



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCION Y DISEÑO
DOCTORADO EN ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESTUDIO DE LA ENERGIA INCORPORADA Y EMISIONES DE GASES
DE EFECTO INVERNADERO EN EL CICLO DE VIDA DE VIVIENDAS
EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE
DOCTOR

AUTOR: Muñoz Sanguinetti, Claudia

Profesores Guías: Zaror Zaror, Claudio Alfredo.
Saelzer Fuica, Gerardo Erich.

CHILE, CONCEPCIÓN 2013

A Jeremías, como una motivación para la
búsqueda permanente de la sostenibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a quien debo expresar mis sinceros agradecimientos por todas las acciones de colaboración en este proceso. En primer lugar agradezco a los directores de esta tesis: Dr. Claudio Zaror y Dr. Gerardo Saelzer por su invaluable apoyo, orientación y motivación durante todo el proceso de investigación.

Agradecimiento particular al Dr. Albert Cuchí, por su permanente espíritu de colaboración, por compartir su valiosa experiencia y por la acogida entregada durante mi pasantía doctoral en Universidad Politécnica de Cataluña, España.

A la decanatura de la Facultad de Arquitectura Construcción y Diseño UBB, a la dirección del Departamento Ciencias de la Construcción, por su apoyo y confianza. Así mismo agradezco a la dirección y equipo colaborador del programa de doctorado DAU-UBB, por las facilidades otorgadas durante estos años.

Agradezco especialmente a los tesisistas, hoy licenciados en Ciencias de la Construcción: Sr. David López, Sr. Sergio Luengo, Sr. Max Casas Cordero, Sr. Francisco Quiroz, Sr. Mario Melo y Sr. Carlos Sanhueza, por su colaboración participativa en los trabajos de campo realizados, aportando de manera significativa a los resultados de esta investigación.

Valla también el agradecimiento al equipo humano del Centro de Investigación CITEC - UBB, dirigido por Sr. Ariel Bobadilla, por la colaboración recibida y por la oportunidad de participar en el proyecto FONDEF D09I1162 constituyendo un gran aporte en el desarrollo y resultados de esta tesis.

Finalmente y con un reconocimiento superior, quiero agradecer a mi familia y amigos, por el apoyo brindado y por las importantes horas restadas a ellos, para la consecución de este objetivo.

RESUMEN

Tradicionalmente los parámetros utilizados en el diseño arquitectónico de edificios han sido mayoritariamente de carácter técnico, económico, estético o sociocultural. Mientras que los aspectos ambientales no necesariamente han sido incorporados, no al menos en un modo sistemático y riguroso (Arenas, 2010).

En este contexto, la presente tesis doctoral estudia la implicancia energética y medioambiental de la energía incorporada en el ciclo de vida de viviendas de interés social mejorada energéticamente. Aportando al desarrollo científico e informativo de la construcción, especialmente al área de diseño sustentable, permitiendo generar criterios en cuanto a la elección de materiales desde el punto de vista energético y cargas medio ambientales asociadas a su producción.

Este trabajo investigativo, busca contribuir y fortalecer en el contexto nacional el uso de la herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14.040), en la mejora del desempeño energético y ambiental de edificaciones. Aportando de igual forma en el ejercicio del diseño, a través de la creación de una base de datos con indicadores ambientales locales de materialidades mayormente utilizadas en envolventes térmicas (madera, cemento, hormigón premezclado y albañilería de ladrillo), como así mismo determinaciones de la huella energética y de carbono durante el ciclo de vida (fases de construcción y uso), de viviendas de interés social.

Los resultados obtenidos muestran que la fase más impactante del ciclo de vida, respecto al consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero es la fase de operación o uso, la cual para este estudio alcanzó porcentajes de participación del orden de un 75 y 80%. Del mismo modo se evidencia el impacto en términos de huella energética y huella de carbono, para diferentes estrategias de diseño utilizadas en el mejoramiento térmico de envolventes, mostrando cómo una mejora en la transmitancia térmica de una envolvente puede aumentar la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero.

ABSTRACT

Traditionally architectural design building parameters have been largely technical, economic, aesthetic and cultural in nature, and have not necessarily included environmental aspects, at least not in a systematic and rigorous manner (Arenas, 2010).

In this context, this doctoral thesis studies the energy and environmental implications of embodied energy in the life cycle of government-funded housing that has undergone energy efficiency improvements. This research provides scientific information on the energy and environmental burdens associated with the production phase of housing life cycles and develops sustainable design criteria for materials selection.

This investigative work aims to promote and strengthen the use of Life Cycle Assessment (ISO 14040) as a tool to improve the energy and environmental performance of buildings in Chile. To achieve this goal, a database was created with local environmental indicators of the most common materials used for thermal envelopes (wood, cement, ready-mix concrete and brick masonry), as well as measurements of energy and carbon footprints during the construction and use phases of the life cycle of government-funded housing.

The results obtained show that the life cycle phase with the greatest impact is the operation or use phase, which accounts for 75 to 80 percent of total energy consumption and greenhouse gas emission. Similarly, it was demonstrated that the use of different design strategies for the thermal improvement of envelopes impacts energy and carbon footprints, and that an improvement in the thermal transmittance of an envelope can increase embodied energy and greenhouse gas emission.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INDICE	8
1 CAPÍTULO 1: OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1 INTRODUCCIÓN: SECTOR CONSTRUCCIÓN Y SUSTENTABILIDAD	12
1.1.1 <i>Sostenibilidad en la Edificación</i>	12
1.2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) EN LA EDIFICACIÓN	15
1.2.1 <i>Ciclo de vida de productos de construcción</i>	16
1.2.2 <i>Edificio como multiproducto y subsistema</i>	17
1.3 ENERGÍA Y CRECIMIENTO ECONÓMICO EN CHILE	18
1.3.1 <i>Sector Construcción. Escenario Mundial y local</i>	18
1.3.2 <i>Chile y consumo energético</i>	20
1.4 SECTOR EDIFICACIÓN Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)	23
1.4.1 <i>Emisiones GEI generadas por el uso de la energía en los edificios</i>	23
1.4.2 <i>Iniciativas y estándares internacionales en la reducción del consumo energético y emisiones de GEI en edificios</i>	27
1.4.3 <i>Chile frente a la reducción del consumo energético y emisiones de GEI en edificios</i>	31
1.5 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS.	34
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	36
1.6 METODOLOGIA Y CONTENIDO DE LA TESIS.....	37
2 CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE: ACV COMO HERRAMIENTA DE SOSTENIBILIDAD EN LA EDIFICACIÓN.	43
2.1 RELACIÓN DEL ACV Y LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE.....	44
2.2 ORÍGENES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	46
2.2.1 <i>Principios Normativos ACV</i>	47
2.2.2 <i>Definición de Análisis de Ciclo de Vida</i>	49
2.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV)	50
2.3.1 <i>Definición de Objetivos y alcance</i>	51
2.3.2 <i>Análisis del Inventario</i>	55

Indice

2.3.3	<i>Evaluación de Impactos</i>	57
2.3.4	<i>Clasificación</i>	57
2.3.5	<i>Caracterización</i>	58
2.4	APLICACIÓN DEL ACV EN EL DISEÑO DE EDIFICIOS	63
2.4.1	<i>Etapas de del ciclo de vida de un edificio</i>	64
2.5	DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTOS (DAP) Y ECOETIQUETA.....	71
2.6	HERRAMIENTAS SOFTWARE ACV	75
2.6.1	<i>Herramientas informáticas ACV, específicas para edificación</i>	77
2.7	SISTEMAS DE CERTIFICACIONES DE SUSTENTABILIDAD DE EDIFICIOS	79
2.7.1	<i>Relación entre las DAP y Sistemas de Certificación de sustentabilidad de edificios</i>	80
2.8	INICIATIVAS INTERNACIONALES DE ACV EN EDIFICACION	82
2.8.1	<i>Experiencia Europea y Norteamericana</i>	83
2.8.2	<i>Iniciativas Latinoamericanas</i>	87
2.9	CONCLUSIONES	90
3	CAPÍTULO 3: INVENTARIO AMBIENTAL (ICV): DETERMINACIÓN DE ENERGÍA CONTENIDA Y HUELLA DE CARBONO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	93
3.1	ACV EN LA DETERMINACIÓN DE ENERGÍA CONTENIDA Y GEI EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	94
3.1.1	<i>Metodología</i>	96
3.2	INVENTARIO AMBIENTAL MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	98
3.2.1	<i>Madera Aserrada Pinus radiata</i>	98
3.2.2	<i>Cemento</i>	136
3.2.3	<i>Hormigón Premezclado</i>	157
3.2.4	<i>Albañilería de ladrillo</i>	185
3.3	CONCLUSIONES	198
4	CAPÍTULO 4: INVENTARIO AMBIENTAL (ICV): DETERMINACIÓN ENERGÍA CONTENIDA Y HUELLA DE CARBONO PARA LA FASE DE COSTRUCCIÓN.....	206
4.1	INTRODUCCIÓN.	207
4.2	ASPECTOS TEÓRICOS	208
4.3	ASPECTOS METODOLOGICOS ICV FASE DE CONSTRUCCION.....	211
4.3.1	<i>Alcances y Justificación Caso Estudio:</i>	213
4.4	RESULTADOS ICV FASE DE CONSTRUCCIÓN - CASO ESTUDIO.....	215
4.4.1	<i>Resultados gráficos datos de entrada ICV fase de construcción - caso estudio</i>	217
4.4.2	<i>Interpretación resultado datos de entrada</i>	220
4.5	RESUMEN GLOBAL DE ACV - CASO ESTUDIO	227
4.6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DATOS	229
4.7	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	231

Indice

5	CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE LA ENERGÍA INCORPORADA EN EL CICLO DE VIDA DE UNA VIVIENDA EVALUANDO DISTINTAS SOLUCIONES MATERIALES EN SU ENVOLVENTE TÉRMICA ...	233
5.1	ANTECEDENTES.....	234
5.2	METODOLOGÍA.....	236
5.2.1	<i>Justificación Selección Caso Estudio</i>	236
5.2.2	<i>Objetivos y Alcances del Estudio</i>	240
5.2.3	<i>Herramientas de análisis y aspectos metodológicos</i>	249
5.2.4	<i>Resultados Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) Caso estudio</i>	253
5.3	CONCLUSIONES	292
6	CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, APORTES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.....	297
6.1	ANTECEDENTES.....	298
6.1.1	<i>Principales conclusiones y síntesis de la tesis</i>	298
6.2	CONTRIBUCIÓN DE LA TESIS.	302
6.2.1	<i>Productividad Científica</i>	304
6.3	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	306
	BIBLIOGRAFIA.....	309
	LISTADO DE ILUSTRACIONES	321
	LISTADO DE TABLAS	326
	ANEXOS.....	329

1 CAPÍTULO 1: OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN: Sector Construcción y Sustentabilidad

1.1.1 Sostenibilidad en la Edificación

La actividad generada por el sector de la construcción, incluida su industria asociada, es la mayor consumidora de recursos naturales. La industria construcción consume 60% de las materias primas de la litósfera, el 12% del agua, el 40% de los materiales que forman parte de la economía global y genera el 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero, convirtiéndola en una las actividades humanas más devastadoras, del punto de vista medioambiental, teniendo en cuenta la construcción y uso de los edificios (Marti i Ragué, 2003).

Las principales causas de impacto ambiental asociadas a la edificación, se encuentran en el consumo de recursos no renovables, generación de residuos contaminantes y consumo energético (Davies, 2005). La consecuencia de ello es la destrucción del stock de capital natural por degradación antrópica (Aranda, et al., 2006). Otros impactos considerados como indirectos, pero igualmente con un efecto adverso a los ecosistemas, son aquellos en los que intervienen los procesos industriales de extracción y fabricación de materiales, la combustión de energía para su transporte, los procesos de generación eléctrica para los consumos de uso de los edificios y finalmente los impactos asociados a la desconstrucción o fin de vida de un edificio” (Hegger, 2006).

Importantes autores han descrito y analizado la génesis de los aspectos ambientales vinculados al sector edificación, coincidiendo desde una visión holística, en la necesidad de vincular la sostenibilidad con la forma de concebir la habitabilidad.

Al respecto (Graedel, 1994), señala que la actividad de la edificación necesita reinventarse, y; generar un cambio de paradigma en el modo de planificar el territorio y sus edificios; convirtiendo los procesos lineales de producción de los materiales utilizados por el sector, en ciclos cerrados de uso, de reutilización, de reciclado y de

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

devolución de los recursos al medio natural, siguiendo los principios de la ecología industrial.

(Cuchí, 2009), señala que: *“La edificación sostenible tiene como objetivo la reducción progresiva del impacto ambiental de la consecución de la habitabilidad, mediante la progresiva adquisición de estrategias de cierre de los ciclos materiales implicados en ella”*.

Indica además que la habitabilidad que proporciona la edificación, cada vez depende menos de estrategias de relación con el entorno inmediato para pasar a ser suministrada por sistemas mecánicos alimentados por energía comercial (basada principalmente en el uso combustibles fósiles). Con ello, la edificación requiere un flujo continuado de recursos energéticos para proporcionar confort térmico, ventilación, movilidad, iluminación y otros tipos de servicios habitualmente asociados a la habitabilidad. Concluye en definitiva que la edificación se ha globalizado, ha cambiado la dependencia del entorno inmediato, por la dependencia de recursos alejados en el espacio en paralelo a la generalización de modos de vida similares en todo el mundo, y que se sustenta sobre un consumo exacerbado de recursos y su inevitable y simétrica emisión de residuos.

En una análisis de la industrialización de la arquitectura (Wadel et al., 2010), sostiene que el impacto ambiental de la edificación es consecuencia del modelo de producción lineal, extractor de recursos y generador de residuos, modelo que debe cambiarse considerando el cierre de los ciclos materiales, (ver Ilustración 1-1, en donde se representa el cierre sostenible del ciclo de vida de los materiales). Si los sistemas constructivos basados en los materiales tradicionales locales, y la utilización de la inercia térmica o las fuentes de energía renovables, como proveedores de energía, eran ejemplos de uso de materiales en ciclo cerrado y de integración en los sistemas biosféricos locales, en la actualidad ni las técnicas de construcción ni los equipos para asegurar la habitabilidad en los edificios cumplen esas condiciones.

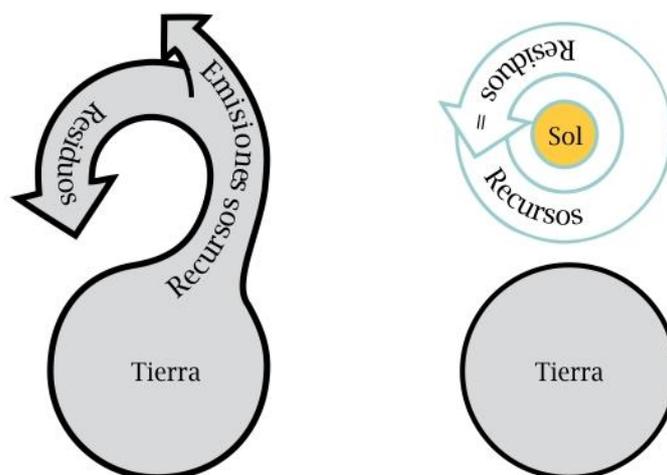


Ilustración 1-1: Representación ciclo de los materiales, Cuchí 2009

Con un enfoque similar (Arcas et al., 2011), establece que la actual crisis ambiental a la que se enfrenta la humanidad nació con la Revolución Industrial, al cambiar el sistema productivo orgánico, basado en un metabolismo circular, reintegrador de los residuos al proceso productivo - por el sistema productivo mineral, caracterizado por operar mediante un metabolismo lineal, consumidor de grandes cantidades de energía y entrega sus residuos fuera del sistema, al medioambiente. De este modo el trabajo en esta área debiera implicar la gestión de los ciclos materiales, como el objetivo de una edificación sostenible y, con ello, la consideración de cuáles son los flujos materiales que circulan a través de los edificios, qué materiales se ven implicados, qué procesos los han generado y qué impactos ambientales están asociados a esos procesos (Ej: consumos energéticos y emisiones), cuál es su destino tras su uso en la edificación y, finalmente, qué estrategias existen para intervenir sobre esos flujos para conducirlos hacia el cierre de ciclos.

Existe una evidente concomitancia en los enfoques y consideraciones referidas al concepto de sostenibilidad para la edificación, y tal como lo plantea (Cuchí, 2010): *“La edificación sostenible debiera enfocarse a trabajar en dos áreas. La primera es la definición de una habitabilidad compatible con la sostenibilidad, que no esté basada en un crecimiento continuado de las necesidades a satisfacer, y que asegure el acceso de todos a una habitabilidad socialmente aceptable. La segunda área es la determinación de los flujos materiales implicados actualmente en la consecución de la habitabilidad hoy socialmente aceptada, su análisis respecto a la condición de cierre de ciclos materiales, el diseño de alternativas y, como tarea ineludible, la definición de estrategias para transformar nuestra edificación hacia la sostenibilidad”.*

De este modo, se advierte que los criterios básicos de *edificación sostenible* pasan indiscutiblemente por un enfoque de ciclo de vida, globalizado, sistémico e incorporador de todos los aspectos ambientales presentes en la vida útil de un determinado proyecto,

que incorpore dentro de las estrategias tanto de diseño como ejecución y desconstrucción del mismo; los flujos energéticos y ciclos materiales incorporados a él y las condiciones de aprovechamiento de las condiciones locales.

1.2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) EN LA EDIFICACIÓN

“Los edificios producen impactos en el medioambiente a lo largo de todas las etapas de su vida útil, comenzando por la extracción de las materias primas y su transporte, el consumo de energía necesario para la fabricación de los materiales constructivos y su transporte desde las plantas de producción hasta la obra, los movimientos de tierra, consumos energéticos y residuos que se producen durante la construcción de los edificios, el consumo de energía y agua para satisfacer las distintas demandas en el uso de los edificios, su mantenimiento y finalmente su demolición, así como la disposición final de todos sus elementos constructivos al final de su vida útil. Además, todas estas etapas de la vida de los edificios están fuertemente interrelacionadas, de modo que los impactos en una de las etapas condicionan los impactos de las etapas siguientes” (Zabalza, 2012).

En el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE, 2012) de Zaragoza - España, se señala que a pesar del elevado impacto energético y ambiental que presentan los edificios en su fase de uso, es imprescindible también analizar el resto de fases del ciclo de vida, con el objetivo de poder contemplar todas las oportunidades de mejora, tanto actuales como futuras. En este sentido, hay que tener en cuenta que la aplicación del actual marco normativo forzaría necesariamente una disminución de los impactos en la etapa de uso de los edificios, aumentando el peso relativo de las restantes etapas que forman parte del ciclo de vida de los edificios, especialmente en lo referente al impacto de la producción de los materiales de construcción utilizados.

Por todo ello, la reducción del impacto medioambiental de los edificios requiere la aplicación de metodologías de evaluación de impacto adecuadas, de carácter global, y que incluyan todas las etapas de la vida de un edificio.

Según la Comisión Europea (COM 2003) 302; COM (2005) 666; COM (2005) 670 Y COM 2008) 397, en la actualidad, la metodología Evaluación de Ciclo de Vida (ECV) constituye el mejor marco disponible para evaluar los impactos ambientales potenciales de cualquier producto o actividad, producto o servicio sin límites geográficos, funcionales o temporales, ya que se examinan todos los procesos seguidos por las materias, desde sus extracción, transformación y uso hasta el retorno a la naturaleza en forma de residuos (CIRCE, 2011).

La ECV, es por tanto una metodología versátil y útil para disminuir los consumos energéticos y emisiones de GEI del sector construcción, como para establecer las estrategias de mejora medioambiental más adecuadas desde una perspectiva global. (Thormark C, 2002; Yohanis, Norton, 2002; Adelberth, 2001; Peuportier, 2001; Sartori, 2007; Zabalza 2010).

1.2.1 Ciclo de vida de productos de construcción

A fin de poder establecer el impacto que la producción de los materiales de construcción tienen sobre el medio ambiente, es necesario considerar todas las fases de su ciclo de vida, desde la extracción y procesado de materias primas, hasta su tratamiento como residuo, pasando por las fases de producción o fabricación del material y por la del empleo o uso racional de estos materiales.

Una manera de acercarse a una correcta definición de lo que significa el Ciclo de Vida de un producto sería la que lo define como *“conjunto de etapas consecutivas e interrelacionadas del sistema del producto desde la adquisición de las materias primas, o generación de recursos naturales, hasta su eliminación final.”* (ISO 14040, 2006), lo cual queda gráficamente representado en ilustración 1-2, referido al ciclo de vida de un producto.

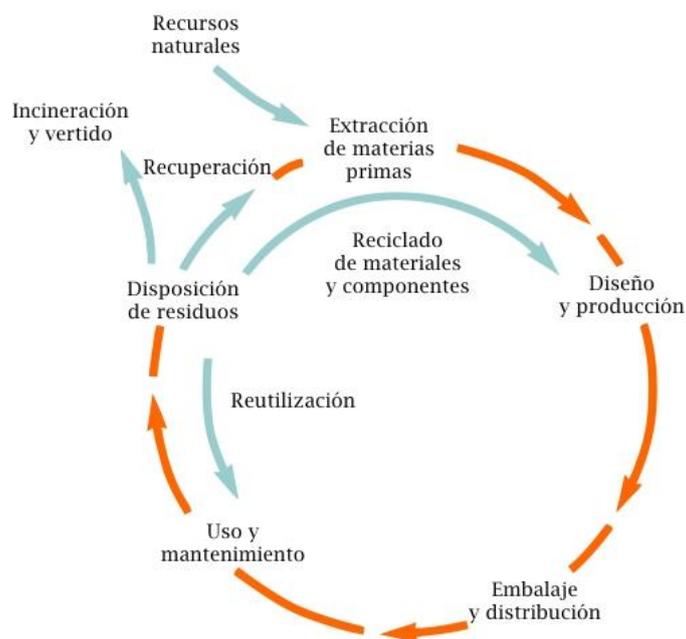


Ilustración 1-2: Ciclo de vida de un producto, Zabalza 2012

La evaluación del ciclo de vida completo de los productos de construcción es altamente compleja. Esto debido a las variadas dimensiones espaciales y temporales que intervienen

en ello, así como la propia estructura del sector, lo que dificulta la elaboración de un análisis completo del producto desde el punto de vista medioambiental, y justifica que ciertos estudios se concentren en determinadas fases de sus ciclo de vida o que estén relacionados sólo con el ciclo de vida de algunos materiales o servicios usados en la construcción.

Existen materiales de uso masivo en la construcción de edificios (Ej.: cemento y sus derivados, madera y sus derivados, albañilerías en general, acero, vidrio, etc.), en los cuales intervienen numerosas variables ambientales, lo que implica una valoración sistemática y una evaluación de este perfil a lo largo de todo su ciclo de vida. *“Estos resultados fiables, representativos y reproducibles constituirían la memoria medioambiental del producto, y consecuentemente, debe ser agregada a las características medioambientales del componente o del elemento que lo utilice, permitiendo profundizar el conocimiento de sus propiedades, bien como uno de sus constituyentes o como uno de sus procesos de fabricación de cada fase de su ciclo de vida”* (Carvallo, 2011).

1.2.2 Edificio como multiproducto y subsistema

Según la NCh 3049/1 2006: Sustentabilidad en la construcción de edificios. Un edificio se puede considerar en sí mismo un producto final.

(Trinius, 1999), sostiene que desde el punto de vista medioambiental, la existencia de diferentes relaciones a lo largo del ciclo de vida del producto de construcción, implica la existencia de distintos grados de complejidad en el mismo. De este modo y siendo el edificio esta suma de elementos y componentes (convirtiéndolo en un multiproducto, según lo muestra la Ilustración 1-3), las evaluaciones del impacto de sus productos, tienen importancia para las evaluaciones del comportamiento ambiental del edificio completo.

En Ilustración 1-3, se muestra un esquema con los distintos niveles de un edificio, como multiproducto y que pueden ser objeto de análisis en un estudio ECV.

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

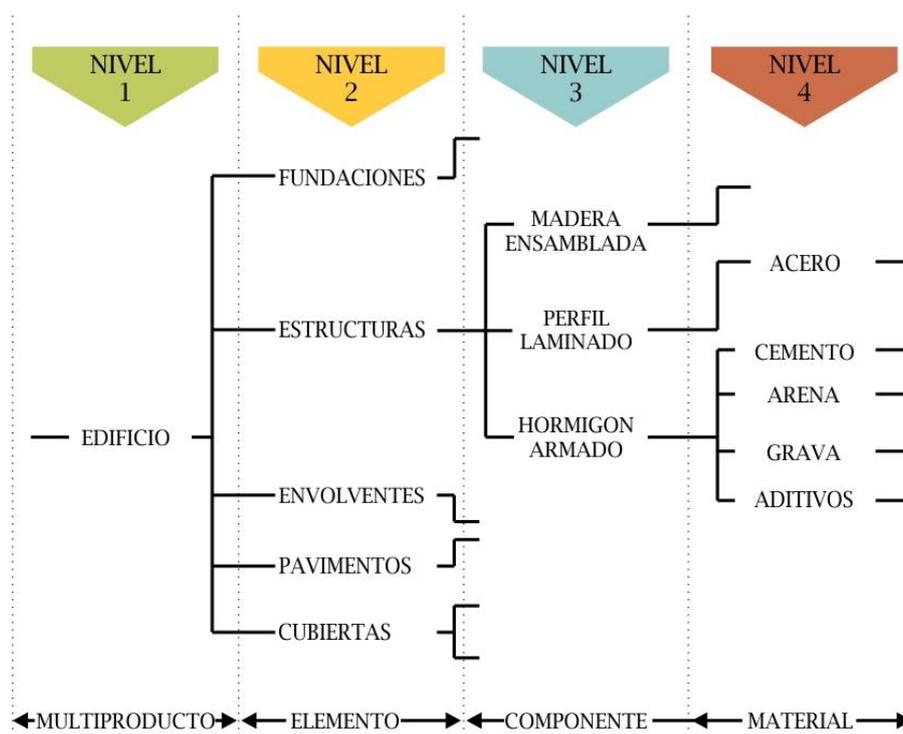


Ilustración 1-3: Esquema edificio como multiproducto, (Carvalho, 2011)

Para la evaluación ambiental de un edificio, pueden utilizar las declaraciones ambientales de productos (DAP), establecidas sobre las base de reglas de categorías de producto (PCR), desarrolladas en conformidad con la normativa ISO 14.025: 2010. Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos. (ISO 14025:2006). Tema que será abordado en detalle en capítulo dos.

Con respecto a lo anteriormente señalado, cabe destacar que a nivel nacional y específicamente para el sector construcción, no se cuenta con declaraciones ambientales de productos ni tampoco con un principio normativo que lo establezca, por lo que no sería posible hoy día realizar una evaluación del comportamiento ambiental de edificios, considerando indicadores nacionales. De este modo, se considera urgente y necesario contar con instrumentos normativos y herramientas de gestión ambiental, que permitan avanzar con medidas concretas a mejorar el desempeño ambiental de las edificaciones, aportando de este modo, a las metas de sustentabilidad de Chile.

1.3 ENERGÍA Y CRECIMIENTO ECONÓMICO EN CHILE

1.3.1 Sector Construcción. Escenario Mundial y local

El sector de la construcción está conformado por las actividades de edificación habitacional, edificación no habitacional y obras de ingeniería pública y privada para la

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

construcción de infraestructura. De este modo, los productos que genera este sector resultan ser heterogéneos, debido a la diversidad de las características físicas y al requerimiento de recursos empleados para su elaboración (Alvarado y Splomann, 2009).

La construcción es uno de los sectores económicos que ha experimentados una continua expansión y diversificación en nuestro planeta, volviéndose uno de los sectores con más rápido crecimiento económico en el mundo, movilizado por la necesidad de más infraestructura (para vivienda, comercio, industria, entre otras), dando respuesta al crecimiento de la población, todo lo cual ha demandado un constante desarrollo tecnológico, en los procesos constructivos, en el desarrollo de los materiales y en eficiencia de las construcciones.

Un estudio realizado por la Global Construction Perspectives y la Universidad de Oxford en el año 2011, indica que a nivel mundial, la actividad de la construcción representa un volumen de negocios de 7.2 trillones de dólares, con una proyección de alcanzar 12 trillones para el año 2020. Dicho crecimiento representa un aumento anual del 5,2%, que supera las expectativas de crecimiento anual promedio del PIB mundial, durante el mismo lapso de tiempo. De este modo, se espera que la industria de la construcción represente el 13,2% del PBI mundial para el año 2020.

En Chile, de acuerdo a cifra del Banco Central, el PIB del sector de la construcción tiene una participación importante en el PIB nacional, promediando un 6,6% desde 2004 a 2008, similar a lo declarado en países de la OECD, (OECD, 2008). Por su parte, y de acuerdo a lo informado por la Cámara Chilena de la Construcción, la inversión en construcción representó en promedio más de 56% de la Formación Bruta de Capital en el periodo 2003 a 2008, lo que equivale una participación de 14,1% del PIB medida a precios constantes, (CCHC, 2009).

Por otro lado, la construcción tiene una participación mayoritaria en determinados sectores económicos, lo que se refleja en la importancia regional en el Producto Interno Bruto sectorial a nivel nacional. Siendo la edificación habitacional la actividad más preponderante del sector, se observa que el PIB sectorial se concentra en las regiones más pobladas del país como las regiones Metropolitana, VIII y V(CCHC, 2010).

Desde hace varias décadas, el principal objetivo de la política de vivienda en Chile ha sido focalizar el gasto público en los sectores más vulnerables de la población, con la intención de mejorar sus condiciones de habitabilidad.

Al respecto, el Balance de la Vivienda del año 2011, realizado por la cámara Chilena de la Construcción, refleja la evolución del déficit habitacional de origen social, entre los años 2006 y 2009. A nivel global, los resultados obtenidos muestran que el déficit habitacional total ascendía a 938.585 soluciones en 2009, (CCHC, 2011).

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

Por otro lado, el efecto que produjo el devastador terremoto y maremoto del 27 de febrero de 2010, que afectó una amplia zona del centro-sur del país, modificó en forma significativa el escenario estudiado. De una evolución proyectada desde 2006 a un ritmo del 2,5% anual acumulado, que en términos absolutos implicó pasar de un déficit de 1.007.253 viviendas en 2006 a 805.796 viviendas a finales de 2009, las cifras aumentaron para 2010 a raíz del evento sísmico, a 1.175.838 viviendas, es decir un incremento respecto al año inmediatamente anterior del 45,9%, lo cual significó un retroceso de más de cinco años, (Escorcia, 2012).

Frente a este escenario y dada la importante participación del sector edificación en el consumo energético (cercano al 22% según CNE, 2009) y las implicancias ambientales que ello conlleva, desde el punto de vista de la generación de emisiones GEI, se presenta una oportunidad relevante para el país en incorporar criterios y consideraciones de sustentabilidad, que mejoren en forma importante el desempeño ambiental del sector edificación en Chile.

1.3.2 Chile y consumo energético

Chile es un país predominantemente importador de recursos energéticos y, en los últimos años, particularmente dependiente de los combustibles fósiles, cuyos altos precios han incrementado los costos marginales de generación de energía y, consecuentemente, el precio de la electricidad.

Nuestro país cuenta con una capacidad instalada total de 16.970 MW, de la cual un 73,6% corresponde al Sistema Interconectado Central (SIC), un 25,6% al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y un 0,8% a los sistemas medianos de Aysén y Magallanes, (CNE, 2012).

Al año 2020 se proyectan para Chile, tasas de crecimiento del consumo eléctrico en torno al 6 a 7%, lo que significa cerca de 100 mil GWh de demanda total de energía eléctrica a dicho año, lo que requerirá aumentar la oferta, sólo en dicho período en más de 8.000 MW en nuevos proyectos de generación. En Ilustración 1-4, se puede observar la proyección de demanda energética para el Chile al año 2030, tanto para SIC como para el SING.

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

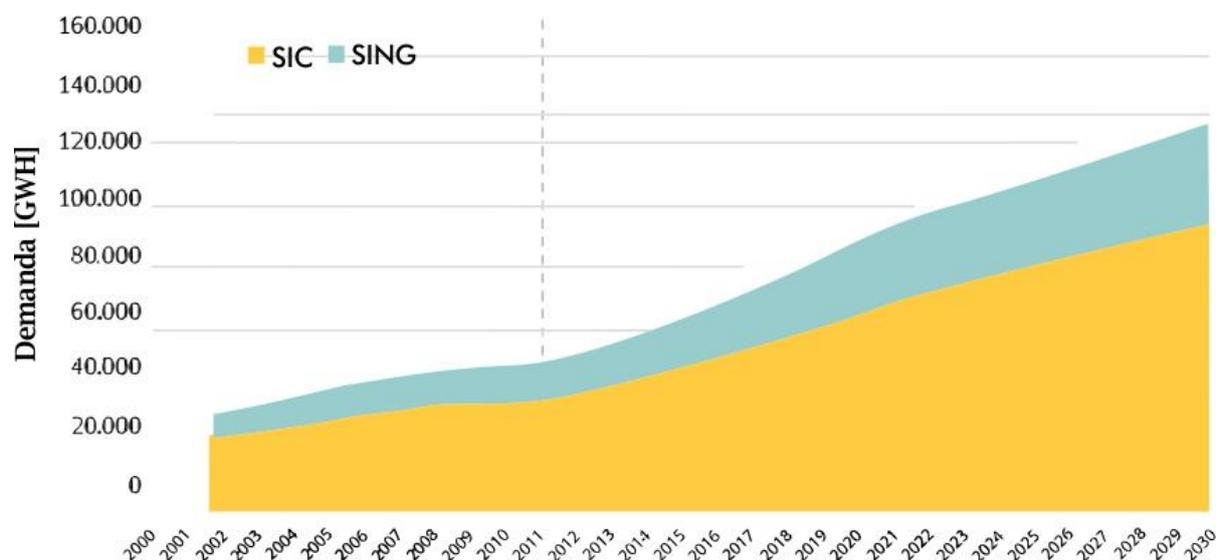


Ilustración 1-4: Proyección Demanda Energética Chile al 2030, (MINENERGIA, 2012).

En los países OECD el producto interno bruto PIB, no crece en directa relación con el consumo de energía, es decir, han aumentado sus producciones, a medida que reducen sus consumos energéticos (desacoplamiento significativo del crecimiento económico del país con respecto al crecimiento del consumo energético). La Ilustración 1-5, muestra la tendencia que ha venido ocurriendo en Chile donde, claramente el crecimiento económico va en proporciones directas al consumo energético.

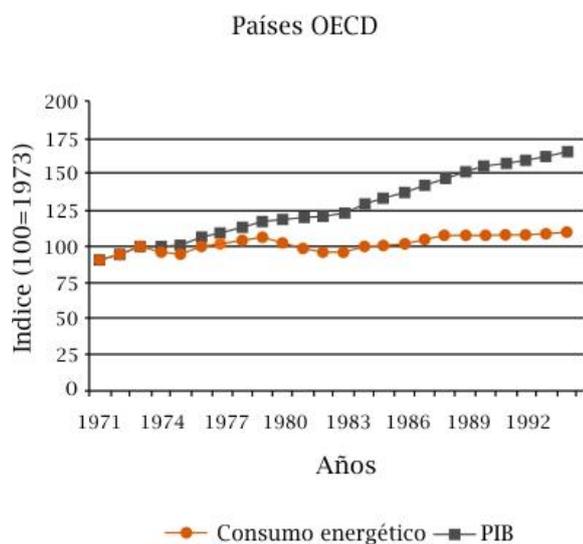


Figura 1: Consumo energético versus crecimiento de la economía en los países de la OECD. (Fuente: IEA, 1998)

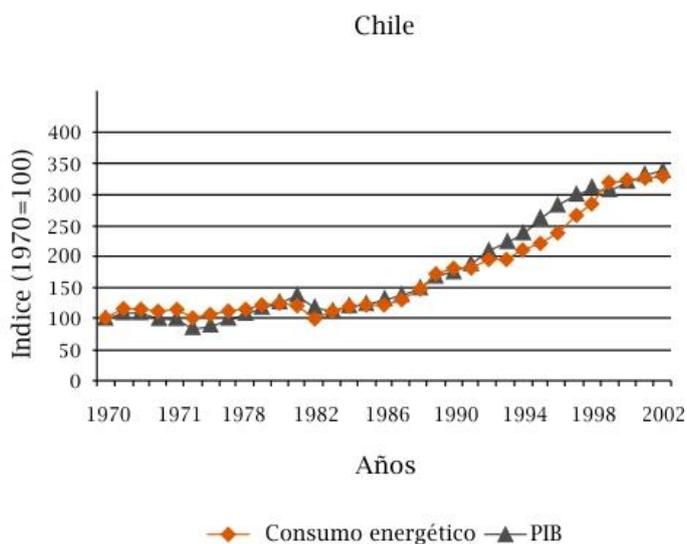


Figura 2: Consumo energético versus crecimiento de la economía en Chile. (Fuente: CNE, 2003 y Banco Central, 2003)

Ilustración 1-5: Consumo de energía v/s crecimiento económico en Chile y países de la OECD.

Los países más desarrollados han comenzado a mostrar que se puede compatibilizar un crecimiento económico, en concordancia con las comunidades y con el cuidado del medio

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

ambiente, todos atributos cada vez más valorados y enfocados hacia al concepto de sustentabilidad.

Para muchos países, la reducción de emisiones y la sustentabilidad ambiental emergen como un imperativo urgente para el futuro energético. Para ello se han adoptado planes y estrategias orientadas a disminuir su dependencia y mitigar las consecuencias del cambio climático. Un ejemplo es la estrategia europea para un crecimiento sostenible, la cual contempla ahorrar un 20% de su consumo de energía primaria al año 2020. Al respecto, Chile cuenta recientemente (año 2012), con una Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética (PAEE20) 2010-2020, elaborado por el Ministerio de Energía, el cual sostiene que el país puede lograr un 12% de reducción de la demanda energética proyectada al año 2020 (Figura 1-6), reduciendo el consumo de electricidad en 41.500 Tcal, lo que representa 1.122 MW de potencia eléctrica desplazada y 4.150.000 Tep (Toneladas equivalentes de petróleo) no consumidas, con los consiguientes beneficios económicos y la disminución de emisiones de contaminantes a nivel global y local.

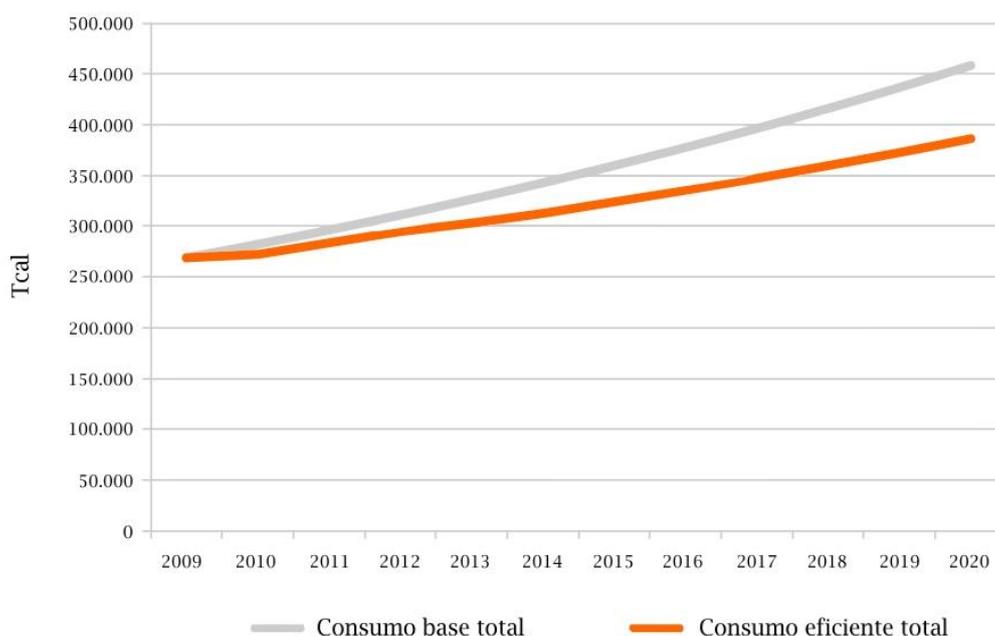


Ilustración 1-6: Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2010- 2020 (MINENERGIA, 2012)

Dentro de las medidas que contempla el PAEE20, se tiene incorporar elementos de eficiencia energética en los distintos sectores productivos. Específicamente en el sector edificación, incluyendo la vivienda social, se buscará mejorar la calidad energética de su envolvente en edificaciones construidas sin criterios de EE, realizar su diseño con altos estándares de EE, llevar a cabo la oferta de productos y servicios de construcción con criterios de eficiencia, entre otros.

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

Con respecto a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, el mayor aporte de emisiones de CO₂ eq. totales en el país, son las que provienen del Sector de Energía, la que se divide a su vez en cuatro sectores, de acuerdo a lo establecido en el Balance Nacional de Energía de la Centro Nacional de Energía (CNE, 2009), los cuatro sectores son: Centros de Transformación; Industria; Transporte y; Comercial, público, residencial. Según lo establecido en el informe final del análisis de opciones futuras de mitigación de GEI, se identificó los sectores con su correspondiente consumo de energía y en términos de emisión de gases de efecto invernadero, identificada en la tabla 1-1.

Tabla 1-1: Emisiones de CO₂-eq provenientes del Sector de Energía, Poch Ambiental, 2010

Sectores	Emisiones	Consumo energía	Peso (%)		
	(tCO ₂ e)	(Tcal)	Emisiones	Energía	Combinado
Centros de Transformación	367,2	86,8	33,1%	24,8%	29,%
Industrias	2860,1	1703,6	21,5%	28,7%	25,2%
Transporte	57	339,3	37,4%	26,7%	32,1%
CPR	898,4	60	7,8%	19,7%	13,7%

A partir de la información de tabla 1-1, se puede señalar que el sector construcción, a nivel nacional, presenta una participación en la generación de emisiones de GEI, cercana al 14% (60 Tcal). Teniendo en cuenta que sólo se ha considerado, el sector CPR (Comercial, Público y Residencial) y que los otros sectores también tributarían en el aporte de emisiones al sector, este porcentaje de participación es evidentemente mayor. Dada la oportunidad que presenta el sector edificación en su acción, tanto para la reducción del consumo energético y emisiones de GEI, es necesario revisar los antecedentes referidos al consumo energético de los edificios y las estrategias y estándares que lo determinan a nivel mundial.

1.4 SECTOR EDIFICACIÓN Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

1.4.1 Emisiones GEI generadas por el uso de la energía en los edificios

El sector de la edificación, a diferencia de otros sectores, deberá dirigirse rápidamente a un menor consumo energético y baja emisividad de GEI, dado que la mayoría de los edificios

que se construyen hoy seguirán en uso en el año 2050, momento en el que las emisiones mundiales, deberán reducirse mínimo a la mitad (Arcas - Abella, et al., 2011).

A nivel mundial, el consumo energético en edificios comerciales, públicos y residenciales (sector CPR), representa un 35% del consumo final (Agencia Internacional de la Energía - AIE, 2012). El principal uso es la calefacción, pero con un crecimiento importante en el consumo por artefactos. En Chile, el consumo energético en el sector CPR equivale a un 25% del consumo final, duplicándose en los últimos 10 años (MINENERGIA, 2012). Es también relevante que el 80% del consumo final del sector CPR lo representa el sub-sector residencial, principalmente por calefacción a leña.

El sector CPR, tanto a nivel mundial como local, es quizás el sector de la economía con mayor potencial de eficiencia energética, comprendido entre un 30% a 50% tanto para edificios nuevos como existentes (WBCSD, 2009). Calefacción, artefactos, iluminación y calentamiento de agua son los usos con mayor potencial de eficiencia energética en edificios.

El programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), señala que el sector de la construcción es responsable de más de un tercio de la energía total y, en la mayoría de los países, es la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero. La energía se consume principalmente en la etapa de uso de los edificios, para la calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación, etc. Un porcentaje menor, normalmente entre el 10 - 20%, de la energía consumida es para la fabricación de materiales, construcción y demolición (UNEP, 2009).

Las proyecciones futuras indican que las emisiones mundiales asociadas al uso de los edificios que en el año 2004 fueron 8,6 GtCO₂, aumentarán, en el mejor de los escenarios, hasta las 11,4 GtCO₂ para el año 2030 - o hasta las 15,6 GtCO₂ en escenarios menos favorables (Barker.T, et al., 2007).

En la Ilustración 1-7, se observa que prácticamente todas las regiones aumentarán sus emisiones y, que solo algunas de ellas, incluso las regiones de los países desarrollados, no se observan reducciones sustanciales, donde la población está prácticamente estabilizada y se aplican medidas de reducción de las emisiones de CO₂ en los edificios (Arcas - Abella, et al., 2011).

De acuerdo al Inventario Nacional de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, el sector Comercial, público y residencial es el responsable del 7,8% de las emisiones de GEI. Este sector que, a su vez se subdivide en dos subsectores asociado al subsector residencial, aporta el 94,24% de las emisiones totales (14.605 GJ) y por su parte, el subsector comercial y público aporta marginalmente el 5,76% (895 GJ).

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC,2007), agrupa las medidas de mejora de la eficiencia energética, en tres categorías: las que reducen el *consumo de energía y la energía incorporada*, las que cambian las *fuentes de energía a otras con menos emisiones de CO₂* (fuentes renovables) y las que controlan las emisiones de CO_{2eq}. Esta clasificación incorpora otras dimensiones ambientales, ya que no solo busca el aumento de la eficiencia energética, sino también reducir la *energía incorporada y las emisiones de gases de efecto invernadero*.

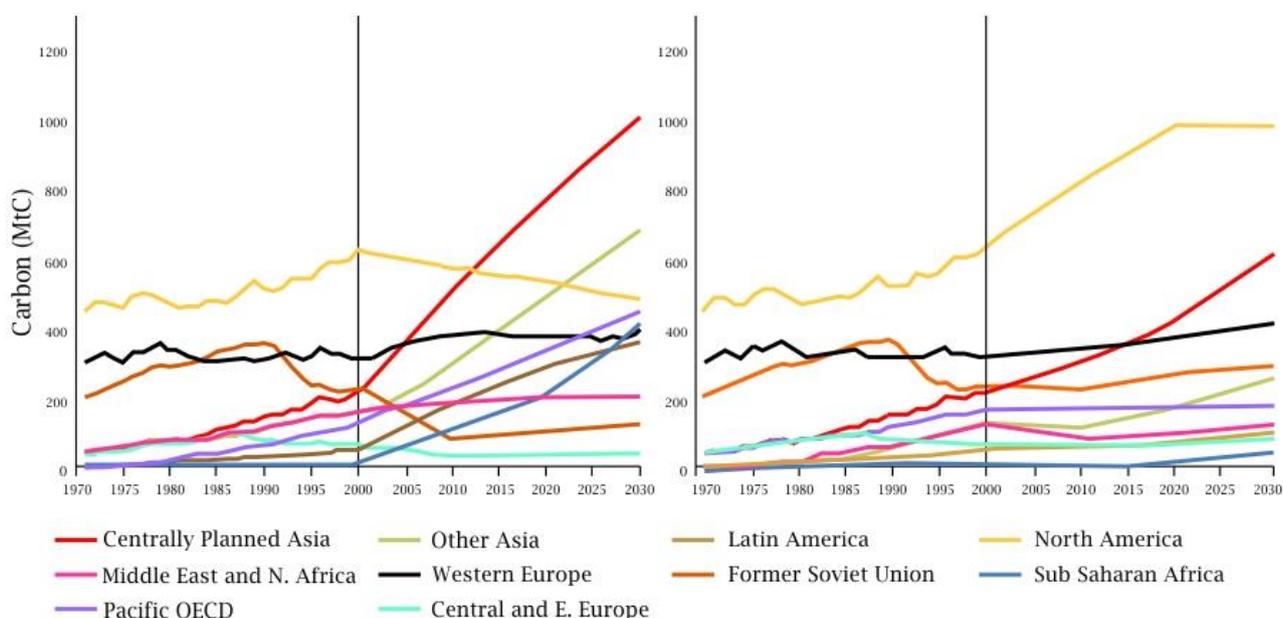


Ilustración 1-7: Emisiones Históricas (1971-2000) y proyectadas (2000-2030) Asociadas al uso de los edificios según diversos escenarios. (Price, L., 2006)

En el mismo contexto, la Comisión Europea (European Commission, 2008) enfatiza que la eficiencia energética es la manera más rentable de reducir el consumo energético manteniendo un nivel equivalente de actividad, y que además aborda los aspectos energéticos claves del cambio climático, la seguridad del abastecimiento energético y la competitividad. El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, 2010) considera que las medidas de reducción de la demanda de energía que se pueden hacer en los edificios son las más baratas, las más fáciles y las más escalables. Además, estas medidas reportan grandes beneficios, como reducción de costos económicos, disminución de la dependencia de suministros externos y mejoras medioambientales (Cuchí et al., 2007).

Al respecto, algunos autores coinciden en que los factores que influyen en el consumo energético y las emisiones asociadas a los edificios residenciales son: la envolvente térmica, la eficiencia energética de los equipos y sistemas, las fuentes de energía

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

utilizadas, y el comportamiento de los usuarios (Charlot - Valdieu, 2010; Cuchí et al., 2007; DGIEM, 2008; López, 2006; Salat; 2009). Otros factores que influyen en el consumo energético son, la zona climática y la forma, volumen y orientación del edificio, entre los más relevantes. Factores significativos en la etapa de diseño, en el caso que se pueda decidir sobre ellos (Hernández, 2012).

Las emisiones de GEI procedentes de la fase de construcción de un edificio, están generalmente relacionadas con la energía incorporada en el edificio y se pueden generar en tres etapas de su ciclo de vida:

- a) durante la fabricación de materiales.
- b) durante el transporte de materiales.
- c) durante la construcción del edificio (Roche, 2010).

La cifra que aportan los materiales de construcción, referidas al consumo energético y las emisiones de GEI, es mayor al 30% de la energía total y del 40% de las emisiones de CO₂ respecto a los producidos en toda la vida útil del edificio, siendo el segundo factor de demanda energética, solamente superado por la calefacción (Zabalza, 2009).

(Cuchí, 2009) en el informe llamado: “Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)”, plantea que, el sector de la edificación no es sólo un sector dedicado a mantener la habitabilidad, sino también a crearla. Haciendo clara alusión a la fabricación de materiales de construcción, de este modo la contabilización de gases de efecto invernadero, debiera incorporar la tributación de esta fase del ciclo de vida del edificio.

El señalado informe da cuenta además, que la fabricación de los materiales que constituyen los edificios exige la utilización de cantidades de energía que oscilan entre cerca un kWh por kilogramo de material cerámico hasta los más de setenta que se precisan para disponer de un kilogramo de aluminio. Asociados al uso de esa energía -y en función del tipo de energía usado en los procesos de fabricación- se producen emisiones de GEI -principalmente de CO₂- que resultan significativas.

Al respecto, en el caso específico de Chile, aún no se cuenta con información oficial que permita conocer las emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación de materiales de construcción, información necesaria para evaluar ambientalmente un edificio con enfoque de ciclo de vida. Esta importante información, debiera ser parte de la Declaraciones Ambientales de Productos (DAP), que tal como se ha mencionado anteriormente, aún no se ha desarrollado en nuestro país, y cuyos detalles serán analizados en capítulo dos.

1.4.2 Iniciativas y estándares internacionales en la reducción del consumo energético y emisiones de GEI en edificios

Las primeras normas de eficiencia energética para edificios, surgen, según Fissore, en la década del 70, durante la crisis del petróleo (Fissore y Colonelli, 2009). A raíz de esto, diversos países lanzaron programas de incentivos para la reducción del consumo de energía, resultando posteriormente normas de eficiencia energética, como el Estándar 90 Conservación de Energía en Diseño de Nuevos Edificios (ASHRAE), la norma de California Título 24 de 1978 y la reglamentación alemana WSchVO 1977, (Hatt, 2012).

Dentro de las iniciativas más importantes para mejorar la eficiencia energética (con directa relación en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero), destaca la impulsada por la Comisión Europea con la publicación de la Directiva 2002/91 CE relativa a la eficiencia energética de los edificios europeos, a través de diferentes instrumentos de aplicación: Métodos de cálculo de eficiencia energética de los edificios, aplicación de requisitos mínimos de eficiencia energética (para edificios nuevos y antiguos), promoción de edificios de alta eficiencia energética a través de su certificación energética, inspección periódica de calderas de más de 20 Kw y de los sistemas de aire acondicionado de más de 12 Kw. (Zabalza, 2010).

Con la finalidad de avanzar hacia edificaciones cero energía, en mayo del año 2010, se completó el proceso de revisión y consolidación de la Directiva 2002/91 dando lugar a la Directiva 2010/31/UE. Con un mayor ámbito de aplicación, reforzando sus disposiciones para potenciar su impacto y hacer que el sector público desempeñe un papel ejemplarizante, en lo que a reducción de consumo energético se refiere. El nuevo texto aprobado, establece en su artículo 9, que todos los nuevos edificios residenciales, de oficinas y de servicios que se construyan en la UE, a partir del año 2020 sean de *cero energía*, es decir, que generen la misma cantidad en el cómputo anual, promoviendo el uso de energías renovables y la incorporación de equipos de alta eficiencia energética. Y para los edificios públicos de nueva construcción, el plazo será el año 2018 (Zabalza 2010).

En concomitancia con esta iniciativa, el gobierno británico ha planteado el objetivo, que a partir del año 2016, todas las viviendas nuevas están libres de emisiones de carbono, mientras que los edificios no residenciales deberán cumplir con este requisito desde el año 2019 (Zabalza, 2010).

Dentro de los estándares orientados al concepto de baja o nula energía, se encuentra el estándar "*PassiveHouse*", uno de los estándares más conocidos, desarrollado en Europa.

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

El cual consiste en un tipo de edificio de bajo consumo energético, cuyo diseño está orientado al máximo consumo aprovechamiento de las tecnologías pasivas, adoptando eventualmente tecnologías solares activas, y asegurando una calidad del ambiente interior durante los meses de verano e invierno, sin necesidad de calefacción ni refrigeración (Feist W., et al., 2005).

Para dar cumplimiento a las exigencias y características referidas al estándar *PassiveHouse* (demanda de calefacción, consumo de energía final, transmitancia de ventanas y muros, estanqueidad al aire), generalmente conlleva un alto nivel aislamiento térmico, ventanas con doble o triple acristalamiento y marcos aislantes, ausencia de puentes térmicos, ventilación mecánica con recuperación de calor, ventilación natural cruzada en verano, orientación óptima del edificio y uso de equipos de bajo consumo energético.

El estándar *PassiveHouse*, ha tenido éxito en sus resultados y se ha ido adoptando en diversos países centroeuropeos como Alemania y Austria, y a la vez que está extendiéndose por el resto del mundo, existiendo un total de más de 15.000 edificios, con este estándar (Zabalza, 2010). Según la Plataforma de Edificación *PassiveHouse* de España, la aplicación de este estándar ha permitido reducir las necesidades energéticas para calefacción y refrigeración de un edificio hasta un 75% respecto de la forma convencional de construcción anual.

En Chile también se tiene experiencia con el estándar *PassiveHouse*, recientemente se realizó un estudio doctoral que muestra que el uso del estándar *PassiveHouse* para el centro sur de nuestro país, puede lograr un ahorro del 80% de la energía en climatización en comparación con viviendas que sólo cumplen con la Reglamentación Térmica vigente. A través de este estudio paramétrico pudo demostrarse, a través de simulaciones térmicas, que en más de 20.000 casos de estudio, los valores límites para las demandas energéticas en refrigeración y calefacción utilizados en el estándar *PassiveHouse* en Europa central, son igualmente válidos para el sur de Chile (Hatt, 2012).

Los edificios convencionales tienen elevados consumos directos y una cierta energía incorporada en materiales. Por otra parte, los edificios de bajo consumo energético suelen presentar valores más altos de energía incorporada; incrementándose aún más en los edificios de cero energía neta, o incluso en los edificios productores de energía. A modo de ejemplo, en climatologías frías, un edificio de baja energía puede llegar a reducir hasta 10 veces la dominante demanda de calefacción, sin embargo debido a su mayor impacto en los materiales utilizados y mantenimiento, la demanda de energía al considerar el ciclo de vida de dicho edificio sólo se reduce en dos veces (Blengini and Di Carlo, 2010).

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

Actualmente existen estándares que permiten incluir la energía incorporada del edificio y sus componentes, al respecto desde la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Dublín (Hernández and Kenny, 2010) se ha definido un nuevo estándar: los “Life Cycle Zero Energy Buildings (LC-ZEB)”, donde la suma de la energía primaria consumida en la operación del edificio y la energía primaria incorporada en sus materiales y sistemas (incluyendo los energéticos) en la vida completa del edificio es igual o menor que la energía producida por los sistemas energéticos renovables del edificio en su ciclo de vida. El estándar considera como indicador la energía primaria, si bien existen otros indicadores que pueden resultar adecuados como las *emisiones de CO₂*, la *exergía* (De Meester et al., 2009) o la *emergía* (Pulselli et al. 2009; Pulselli et al., 2007).

En ilustración 1-8 se muestra el diagrama de flujo del modelo anteriormente señalado, donde queda claramente establecido que la contabilización del consumo anual de energía del ciclo de vida de un edificio incluye la energía contenida en sus componentes, expresados en (kWh/m² año) y el uso de la energía consumida anualmente, expresada en (kWh/m² año). Dando cuenta de este modo, que un edificio LC-ZEB, correspondería a aquel cuyo consumo de energía del ciclo de vida anualizada sea cero.

De este modo se advierte, que la discusión del consumo energético de un edificio va mucha más allá de la etapa de funcionamiento o uso , siendo necesario la incorporación de un enfoque de ciclo de vida (principio que sustenta esta tesis doctoral) para dicha evaluación.

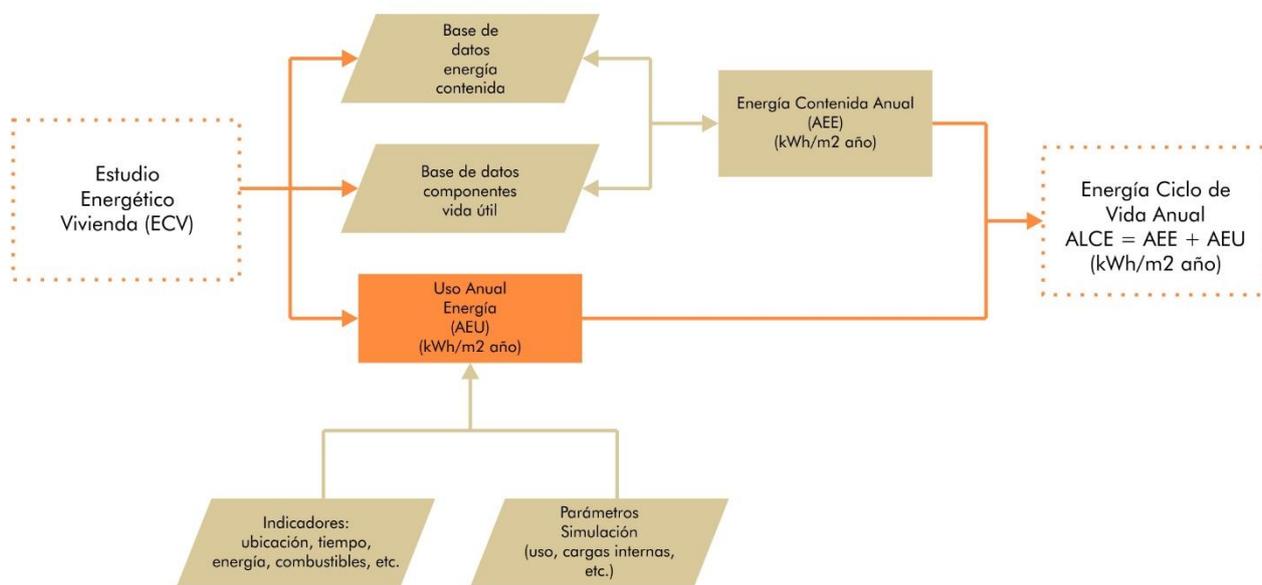


Ilustración 1-8: Diagrama de flujo de edificios LC-ZEB (Hernández and Kenny, 2009)

La ilustración 1-9 muestra la energía anual de ciclo de vida de algunos casos genéricos de edificios con estándar LC-ZEB. En la cual se puede apreciar que en lugar de cuantificar numéricamente el uso anual de energía del ciclo de vida, también puede representarse

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

gráficamente, en donde el eje de las abscisas muestra la energía contenida anual y el eje de las ordenadas muestra el uso anual de la energía. LC - ZEB, estaría representado por una línea a 45° y que por lo general ocupa el cuarto cuadrante que representan los edificios donde la energía anual de uso es negativa e igual a la energía contenida. Edificios a lo largo del eje de las abscisas representan los edificios de energía cero (cero consumo anual de energía), pero debe tenerse en cuenta que podría tener diferentes niveles de energía contenida, por lo tanto parece estar más cerca o más lejos del estándar LC - ZEB (Hernández and Kenny, 2009).

(Zabalza, 2010), plantea que esta nueva definición es acertada, pero debería ampliarse para incluir otros consumos indirectos de energía además de la energía incorporada. De este modo, un “edificio de cero energía de ciclo de vida” (LC - ZEB), sería aquel cuya suma de su consumo anual directo (incluyendo calefacción, refrigeración, agua caliente, iluminación, etc.) y de su consumo anualizado indirecto (incluyendo la energía incorporada en materiales y sistemas, pero también la movilidad de los usuarios del edificio) fuese cero.

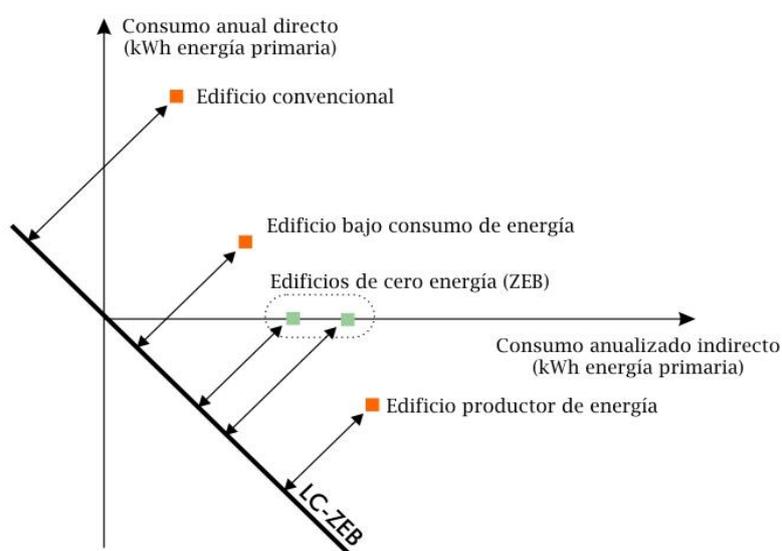


Ilustración 1-9: Casos genéricos de edificios con estándar LC -ZEB (Hernández and Kenny, 2009)

Con respecto a las metodologías específicas relacionadas con la evaluación ambiental de los edificios, por ejemplo BREEAM (BRE, Reino Unido), LEED (US Green Building Council), GB Tool (Green Building Challenge), (HQE, Francia) o Green Globes (Green Building Initiative), entre otras. Las cuales no adoptan un enfoque integrado al considerar algunos aspectos o etapas del ciclo de vida de los edificios, y en ocasiones no son consistentes entre sí, al estar basadas en métodos de cálculo distintos y principalmente cualitativos,

aplican distintos límites del sistema, o manejan distintos niveles de calidad de datos en cuanto a su representatividad tecnológica, geográfica o temporal, el tema también será analizado en detalle, en capítulo N°2.

Como ha podido verse hasta ahora, existen importantes iniciativas en términos de mejoramiento del desempeño ambiental de edificios, utilizando la energía como un indicador de sustentabilidad, aquí se han mostrado parte de ellas y las más relevantes desde el punto de vista de la pertinencia de investigación, pero el tema será complementado en los próximos capítulos.

Las experiencias extranjeras muestran un importante avance en materia de sustentabilidad de edificios, lo interesante es detectar las reales necesidades y capacidades a escala nacional y avanzar gradualmente en la sistematización en el desarrollo y uso de metodología global de carácter horizontal e integrador, que permita evaluar anticipadamente los proyectos de edificación con la finalidad de diseñar edificios con menor impacto, considerando para ello toda la cadena de valor en el proceso de construcción incluyendo los fabricantes de materiales, productos e instalaciones, empresas constructoras, profesionales de arquitectura e ingeniería y usuarios finales. Haciendo avanzar al sector de la edificación en Chile, hacia la sostenibilidad, lo cual es uno de los ejes motivadores de esta investigación.

1.4.3 Chile frente a la reducción del consumo energético y emisiones de GEI en edificios.

Desde la crisis energética (1973), hasta la actual consecuencia del calentamiento global del planeta, una de las mayores preocupaciones en ese sentido a nivel mundial ha sido trabajar en la diversificación de estrategias, tecnologías y sistemas, que permitan hacer un uso eficiente de la energía en construcciones y viviendas. En ese contexto y dada la responsabilidad que el país tiene en esa materia, el Estado chileno, a través del Ministerio de Energía y Ministerio de Vivienda han venido impulsando paulatinamente una política que incorpore el concepto de eficiencia energética en edificios y viviendas.

Por otro lado, Chile buscando cooperar con el objetivo de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), aprobó en diciembre de 2008 su Plan de Acción Nacional en Cambio Climático, estableciendo como uno de sus tres ejes principales el de Mitigación de sus Emisiones. El lineamiento general asociado a este eje es: “propender hacia una economía más baja en carbono, que contribuya al desarrollo sustentable del país y a los esfuerzos mundiales de reducción de emisiones” (CONAMA, 2008). Parte de este eje, identifica los sectores que representan los mayores valores de

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

emisiones o capturas, comprendidos por las actividades de: energía, transporte, minería, construcción y la actividad silvoagropecuaria.

En el marco de la Conferencia de la ONU sobre Cambio Climático, que se desarrolló en Copenhague, en el año 2009. El Gobierno de Chile se comprometió a contribuir a los esfuerzos mundiales de mitigación de los gases de efecto invernadero, a través de una desviación significativa de la línea base de sus emisiones hasta en un 20% al año 2020, financiada significativamente con recursos nacionales. Aunque Chile aporta del orden de un 0,2% de las emisiones totales a nivel mundial, la tarea no es menor si se considera que recién se están impulsando medidas de mitigación en áreas tan importantes como la eficiencia energética, las energías renovables, forestación y reforestación, así como, en la conservación de los bosques naturales y en mejoras en el transporte público, entre otras. Chile desde el año 2006, ha desarrollado distintas iniciativas concretas, en materias de eficiencia energética y sustentabilidad en la edificación, y enfocada al cumplimiento de los compromisos anteriormente descritos, entre los que se destacan:

- I. Modificaciones a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción incorporando nuevas exigencias en materias acústica y térmica. (Año 2006).
- II. Reglamentación Térmica y Acústica. (Año 2007).
- III. Incentivos franquicia tributaria respecto de los sistemas solares térmicos - Ley N° 20.365. (Año 2009).
- IV. Reacondicionamiento térmico de viviendas. (Año 2009).
- V. Creación de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética - ACHEE. (Año, 2010).
- VI. Proyectos pilotos que buscan avanzar en áreas específicas, que apuntan a la sustentabilidad, por ejemplo; recambio de calefactores a leña en las regiones de Aysén y La Araucanía; (Incorporación de Sistemas Solares Térmicos para agua caliente sanitaria en Coquimbo, Metropolitana y BioBío) (2012).
- VII. Inclusión de criterios ambientales en edificios públicos, mandatados por el Ministerio de Obras Públicas.(2012).
- VIII. Sistema de Certificación Energética de Viviendas. (2012).
- IX. Convenio Marco Interministerial de Construcción Sustentable. (2012).

El año 2013 marca un hito relevante, ya que a partir de la firma del convenio marco interministerial entre los Ministerios de: Obras Públicas (MOP), Vivienda y Urbanismo (MINVU), Energía (MINENERGIA) y Medio Ambiente (MMA). Se propone abordar en forma coordinada el “Desarrollo Sustentable” en el área de la construcción en Chile. Siendo el MINVU, a través de la Secretaría Ejecutiva de Construcción Sustentable, el organismo

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

responsable de alinear a los cuatro ministerios involucrados y a los actores interesados en el avance y consecución de objetivos.

Esta estrategia nacional de *construcción sustentable* busca articular y vincular los planes energéticos y ambientales vigentes que se han desarrollado de forma paralela en los distintos organismos gubernamentales. En este sentido, pretende establecerse como un instrumento de coordinación de las distintas acciones, metas y objetivos, en el corto, mediano y largo plazo. Entre los ejes estratégicos y acciones sustentables, se considera: calidad de vida y competitividad, sustentabilidad en la edificación y su entorno, educación, innovación y emprendimiento, gobierno local y responsabilidad global.

A partir del mencionado acuerdo, recién el año 2013, se alcanza la primera definición del concepto de Construcción Sustentable para Chile, definido como: “Un modo de concebir el diseño arquitectónico y urbanístico, que se refiere a la incorporación del concepto de sustentabilidad en el proceso de planificación, diseño, construcción y operación de las edificaciones y su entorno, que busca optimizar los recursos naturales y los sistemas de edificación, de tal modo que minimicen el impacto sobre el medio ambiente y la salud de las personas”, (MINVU, 2013).

A pesar de las iniciativas anteriormente señaladas, el sector de la edificación en Chile, no ha sido capaz de asimilar las exigencias de sostenibilidad y transformarlas en herramientas de competitividad, esto, por varios motivos. Por una parte, Chile no cuenta con sistemas de certificaciones ambientales de edificios y tampoco es un requisito obligatorio, sino una acción voluntaria. Las experiencias de internalizar sistemas de certificación extranjeros, no necesariamente aporta en el tema en forma sustancial, esto debido a la falta de criterios en la selección de los sistemas de certificación, los cuales más bien evalúan impactos directos (sin enfoque de ciclo de vida) y no necesariamente en forma cuantitativa. Como es el caso de la certificación ambiental LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), siendo éste el sistema de certificación con mayor aplicación en Chile, certificando a la fecha 17 edificios y otros 135 que esperan por obtener el sello del U.S Green Building Council (GBC, 2012).

Por otra parte, no existe vinculación y continuidad reglamentaria en materia energética y medioambiental. Lo que conlleva a que todas estas acciones e iniciativas, estén orientadas solamente a los aspectos ambientales relacionados con la fase de uso del ciclo de vida de edificios, la falta de esta visión sistémica retarda el salto hacia una edificación sustentable.

1.5 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS.

Chile comienza a incorporar en sus políticas de Estado los principios de sustentabilidad a nivel sectorial, y de acuerdo a lo descrito, el sector edificación está teniendo una hoja de ruta al respecto. Es un desarrollo incipiente, al cual gradualmente habrá que ir incorporándole indicadores de nivel internacional de sustentabilidad cuali - cuantitativos, con un enfoque de ciclo de vida.

La dependencia de los recursos energéticos a nivel nacional, como así mismo, la directa relación entre el crecimiento económico v/s demanda energética y los compromisos internacionales adquiridos frente a las reducciones de gases de efecto invernadero, hace imperioso seguir avanzando en el mejoramiento del desempeño del sector edificación. Para ello es indispensable una congruente vinculación y continuidad reglamentaria en materia energética y medioambiental.

Hoy día existen oportunidades únicas y relevantes en Chile, para incorporar medidas importantes de sostenibilidad en la edificación considerando al menos, los aspectos ambientales asociados a la dimensión energética. De este modo, y tal como se ha señalado en este documento, Chile por efecto del terremoto 27F tuvo un deterioro cercano al 30 por ciento de las viviendas existentes en las tres regiones afectadas (Maule, Biobío y Araucanía), lo que conlleva a desarrollar diversas iniciativas de construcción habitacional (García, 2012), lo que sumado al déficit habitacional existente hasta finales del año 2009, hablamos de un número cercano a 1.175.838 unidades de viviendas de tipología social (Escorcía, 2012). Por otro lado y considerando que dentro de las medidas establecidas en el Plan de Acción de Eficiencia Energética 2010-2020 (PAEE, 20), para reducir en un 12% de demanda energética al año 2020, se establece incorporar elementos de eficiencia energética en los distintos sectores productivos, específicamente en el sector edificación, incluyendo la vivienda social, mejorando la calidad de su envolvente térmica. De este modo se genera una coyuntura singular, en términos de articular políticas de estado referida a resolver la demanda habitacional existente y mejorar el desempeño ambiental de las edificaciones, a través de la incorporación de estrategias en el diseño de viviendas energéticamente eficientes, obteniendo como importantes resultados: una mejora en la calidad de vida de los usuarios (confort térmico, reducción morbilidad enfermedades respiratorias, mejora en la economía doméstica por menor gastos en combustible, entre otras), como así también, un efecto en los impactos ambientales asociados a la reducción del consumo energético, principalmente lo referido a emisiones de gases de efecto invernadero.

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

La revisión de los estándares de reducción del consumo energéticos de edificios (edificios cero energía, edificios carbono cero y casas pasivas), tienen una característica común, la cual está referida a que ninguno de ellos incorpora la contabilización del impacto energético y medioambiental de los materiales de construcción, por lo que a pesar del importante aporte en la reducción de energía y emisiones de gases de efecto invernadero para la fase de uso del edificio, no permitirían obtener edificios eco eficientes en términos globales en el medio - largo plazo.

Por otro lado, el actual marco normativo no considera la evaluación de ciclo de vida de los edificios necesaria para avanzar en edificaciones sostenibles, sino que se basan principalmente en los consumos de energía y las emisiones de CO₂ asociadas al uso de los edificios, incentivando su disminución en algunos casos mediante la incorporación de energía renovable en edificios.

Una importante reflexión que profundiza en todos los antecedentes presentados en este capítulo, es la planteada por (Zabalza, 2010), la cual señala que además del elevado consumo energético e impacto ambiental asociado a los edificios en su fase de uso, es también necesario analizar el resto de las fases del ciclo de vida con el objetivo de poder analizar todas las oportunidades de mejora. De este modo, hay que tener en cuenta que la aplicación del actual marco normativo referido a eficiencia energética en edificios, forzaría necesariamente una disminución de los impactos de la etapa de uso, aumentando el peso relativo de las restantes etapas que forman parte del ciclo de vida de los ellos, especialmente en lo referente al impacto de la producción de los materiales de construcción utilizados en los edificios.

Es así, que para el desarrollo de esta investigación, se propone profundizar en el conocimiento de los aspectos e impactos ambientales vinculados a consumos energéticos de viviendas en Chile. Se busca, entre otras cosas: opciones de reducción de impactos ambientales en la cadena de valor en los diferentes materiales y procesos constituyentes del proceso, identificar y evitar la transferencia de impactos ambientales entre una etapa y otra de la cadena de valor del ciclo de vida de viviendas, y finalmente, integrar los resultados obtenidos a partir de indicadores ambientales sitio específicos para Chile.

En la misma línea, y dado que importantes autores coinciden que los factores que influyen en el consumo energético y en las emisiones asociadas de los edificios residenciales son: la *envolvente térmica*, la *eficiencia energética*, de los equipos y

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

sistemas, las fuentes energéticas utilizadas, y el comportamiento de los usuarios (Charlot - Valdieu, 2010; Cuchí et al., Salat, 2009). Se ha establecido, como una manera de establecer los límites y alcances a la investigación, aplicar una *metodología de ciclo de vida simplificada*, con la finalidad de estudiar los aspectos e impactos ambientales asociados al balance energético de viviendas en Chile, con énfasis en la energía contenida en los materiales de construcción presentes en la envolvente térmica de ella y determinar su implicancia en la fases de construcción y uso.

Es importante señalar, que la tesis en su contexto más genérico busca situar el uso de la herramienta de ciclo de vida en la edificación en Chile, es decir; todos los alcances, aspectos metodológicos y resultados obtenidos de esta investigación son aplicables transversalmente a cualquier tipo de viviendas, con indicadores ambientales locales. No obstante, y dada la relevancia que tiene social, ambiental y económicamente la vivienda de interés social en Chile, según lo contextualizado en esta investigación, los casos estudios son centrados en esta tipología de vivienda.

De este modo las hipótesis que surgen para el siguiente trabajo de investigación, se definen como:

- a) *Hipótesis 1:* La selección de la materialidad de envolvente térmica de una vivienda tiene directa relación con la dimensión ambiental, por su efecto en la huella energética y su aporte al calentamiento global.
- b) **Hipótesis 2:** A través de un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se demostraría que al aumentar las exigencias de conservación de energía en la fase de uso de una vivienda, implicaría un aumento de la energía contenida en los materiales que forman parte de su envolvente térmica.

A partir de los antecedentes vistos, a continuación se muestran los objetivos generales y específicos que sustentan esta tesis.

1.5.1 Objetivo General.

Estudiar la energía incorporada en el ciclo de vida de una vivienda de interés social, con indicadores ambientales locales y evaluar la implicancia de los impactos energéticos y medioambientales de los materiales de construcción presentes en la envolvente térmica. Para ello se consideran los siguientes *objetivos específicos*:

1. Generar un inventario ambiental con la energía contenida y emisiones de GEI en materiales de construcción mayormente utilizados en envolventes térmicas de viviendas de interés social, con indicadores ambientales locales.
2. Determinar la energía contenida y emisiones de GEI, vinculada a la fase de construcción de una vivienda de interés social en Chile.
3. Determinar la implicancia energética y medioambiental en la fase de uso de una vivienda de interés social mejorada energéticamente.
4. Determinar la implicancia de la energía incorporada y emisiones de CO₂, durante el ciclo de vida de una vivienda de interés social mejorada energéticamente, considerando diferentes materiales para la envolvente térmica.
5. Plantear las bases conceptuales para incorporar la metodología ACV, en los diferentes niveles de las estrategias de diseño de viviendas de tipología social, energéticamente eficientes en Chile.

1.6 METODOLOGIA Y CONTENIDO DE LA TESIS.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se establecen todos los antecedentes y aspectos metodológicos apropiados para realizar un estudio del balance energético de las fases del ciclo de vida de viviendas (tipología social, como casos estudio), con indicadores ambientales locales. Buscando precisar la implicancia de energía incorporada en cada una de sus fases y su impacto asociado a las emisiones de GEI.

Resumidamente puede señalarse que la metodología utilizada corresponde al uso de la herramienta de gestión ambiental: Análisis de Ciclo de Vida simplificada (ACVs) (NCh ISO14.040 - 2006), la cual fue aplicada en la elaboración de inventarios ambientales de materiales de construcción, como así mismo para las fases de construcción y uso de viviendas, a través de “*casos estudios*” específicos.

Los inventarios ambientales de ciclo de vida (ICV), correspondientes a los procesos de producción de materiales mayormente utilizados en envolventes térmicas de viviendas, tal como se ha justifica en capítulo tres, los cuales corresponden a las materialidades; madera, cemento, hormigón premezclado y albañilería de ladrillo (caracterizados en detalle en capítulo tres).

Para la determinación de la energía incorporada en la fase de construcción de una vivienda, se considera como caso estudio una vivienda de interés social, cuya materialidad corresponde a albañilería de ladrillo en primer piso y estructura de madera el segundo piso, construida en la ciudad de Concepción (caracterizada en detalle en capítulo cuatro).

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

A partir de los resultados de los inventarios ambientales, se realiza una Evaluación de Ciclo de vida, considerando la fase de uso u operación de una vivienda (con una vida útil estimada en 40 años) y diferentes materialidades de envolvente térmica, como así mismo diferentes tipos de combustibles para calefacción. Al igual que la etapa anterior (fase de construcción), se trabajó con una solución habitacional de interés social con características únicas en Chile, al tratarse de una solución habitacional mejorada energéticamente (caracterizada en detalle en capítulo cinco).

La tesis se compone de seis capítulos, la estructura de cada uno de ellos muestra un resumen introductorio, desarrollo y conclusiones. A continuación se describe brevemente tanto la metodología desarrollada como los contenidos en cada uno de ellos:

El capítulo uno recoge todos los antecedentes necesarios, para instalar y comprender la problemática vinculada a la sostenibilidad en la edificación y sus implicancias a escala mundial y local. Del mismo modo, se analiza la realidad chilena referida al crecimiento económico y consumo energético vinculado al sector construcción y los impactos ambientales asociados a las emisiones de CO₂. Finalmente se muestran las iniciativas y estándares internacionales más relevantes dirigidos a la sostenibilidad en la edificación, desde la perspectiva del enfoque de ciclo de vida y las acciones y desafíos que tiene Chile en la materia y que justifican la realización de esta tesis doctoral, señalando además los objetivos que se establecen en ella.

El capítulo dos, como resultado de una rigurosa revisión bibliográfica se muestra el estado del arte, referido al uso de la herramienta ACV en la sostenibilidad en la edificación. Se menciona su historia, aplicaciones y principios normativos nacionales e internacionales, oportunidades y limitaciones. Se describen además las fases del ciclo de vida de los edificios (de la cuna a la tumba), y frente a la necesidad de construir el marco teórico necesario para la evaluación ambiental de edificios, se mencionan y analizan los sistemas de certificación ambiental de edificios, bases de datos y declaraciones ambientales de productos existentes y presentes a nivel nacional e internacional. Finalmente se concluye y se pone de manifiesto entre otros aspectos, la necesidad de avanzar en la generación de regulación e incentivos por parte del estado, en la generación de información ambiental apropiada (ejemplo: declaraciones ambientales de productos) para construir inventarios ambientales nacionales aplicados al sector edificación en Chile.

El capítulo tres, muestra la aplicación de la herramienta análisis de ciclo de vida (ACV), en la elaboración de inventarios ambientales vinculados a los materiales de construcción

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

estudiados, correspondientes principalmente a las soluciones de envolvente térmica de muros utilizadas mayoritariamente en Chile; madera, albañilería de ladrillo y hormigón premezclado (INE, 2007). Para la realización de los Inventarios Ambientales de los materiales, se realizó un trabajo de campo directamente en industrias de producción de los materiales señalados, mediante mediciones, entrevistas e información facilitada directamente por los departamentos de Estudio y Desarrollo de los centros productivos, con un convenido compromiso de confidencialidad, dada la sensibilidad de la información tratada. Trabajando de este modo con información fidedigna y representativa de la zona, en este caso la Región del Biobío Chile.

De acuerdo a la metodología ACV, se discuten y definen los alcances y límites de los sistemas y los procesos unitarios a incluir, los cuales se detallan en cada caso particular. Los inventarios ambientales son realizados a partir de la determinación de unidad funcional y, a través de un exhaustivo trabajo de campo se determinaron los flujos de entrada y salida (energía y emisiones de CO₂), de los sistemas en estudio, la temporalidad considerada del estudio abarca un periodo de un año de producción. El enfoque ciclo de vida para los sistemas productos estudiados (materiales de construcción), se considera de la cuna a la puerta, es decir desde la extracción de materias primas hasta la puerta de la fábrica o industria correspondiente.

Para la validación de los resultados, tanto de la energía contenida como para la huella de carbono, se comparan con resultados similares de bases de datos Ecoinvent (incorporando los datos referidos a la matriz energética chilena, principalmente consumo y factores de emisión). A los resultados obtenidos se le realizó un análisis de sensibilidad, de acuerdo a los porcentajes de combustibles presentes en el proceso de fabricación). Finalmente para concluir el capítulo se entregan análisis de los resultados y se concluye con respecto a ellos.

Capítulo cuatro: El inventario ambiental para la fase de construcción, fue desarrollado a través de trabajo de campo en un proyecto de edificación en la Región del Biobío, al cual se le hizo un seguimiento por un período de tres meses. Período durante el cual pudieron establecerse los aspectos e impactos ambientales asociados al consumo energético de la ejecución de ésta. La medición de los datos se efectuó por medio de rendimientos reales de terreno, con lo cual se evaluó el tiempo utilizado del equipo o herramienta en construir 1m² de edificación (unidad funcional).

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

La metodología utilizada corresponde a la establecida en la NCH ISO 14040 - 2006: Gestión Ambiental - Evaluación del ciclo de vida., Para lo cual, se evaluaron los aspectos ambientales referidos al consumo energético y participación en porcentaje de cada una de las partidas, de acuerdo al peso que inciden éstas en la vivienda. Se consideró además la determinación de la huella de carbono vinculado al consumo eléctrico y consumo de los combustibles fósiles ocupados durante la fase de construcción, (principalmente a las partidas de fundaciones y envolvente térmica de la vivienda).

Las características de la vivienda estudio, corresponde a una vivienda de tipología social, pareada de dos pisos (primer nivel de albañilería y segundo nivel de madera), y es parte de un conjunto habitacional de 225 viviendas, ubicado en la comuna de San Pedro de la Paz Región del Biobío, Chile.

Finalmente para concluir el capítulo se entregan análisis de los resultados y se concluye con respecto a ellos.

Capítulo cinco: En este capítulo se hace un significativo aporte conceptual para el ACV de la vivienda estudiada, ya que recoge toda la información levantada en capítulos anteriores y muestra los resultados del balance completo del ciclo de vida de la vivienda “caso estudio”. Dando cumplimiento al objetivo general de la tesis.

En forma consecuente con el enfoque metodológico aplicado en los capítulos anteriormente descritos, el estudio del balance energético para la fase de uso de la vivienda caso estudio, se ajustan a las directrices y principios establecidos por la norma NCh ISO 14.040 - 2006. De este modo se aplica un ACV simplificado, considerando los aspectos ambientales referidos al consumo energético y la categoría de impacto vinculado al potencial de calentamiento global.

La vivienda “caso estudio”, la cual fue considerada como línea base con la finalidad de hacer evaluaciones paramétricas comparativas, corresponde a una vivienda de interés social con características singulares : Vivienda del Programa Fondo Solidario de Viviendas (FSV), con estándares de eficiencia energética cuyo diseño fue realizado por el Centro de Investigación en Tecnologías de la Universidad del Biobío (CITEC-UBB), cuyas características son detalladas en el desarrollo del capítulo cinco del documento.

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

En primera instancia, la vivienda en estudio se caracteriza completamente desde el punto de vista de la materialidad, es decir, se cuantifican e identifican cada uno de los materiales presentes tanto en la estructura como en la envolvente térmica. A partir de dicha información y con los resultados obtenidos en capítulos tres y cuatro, referido a la energía contenida y emisiones de CO₂ tanto para los materiales de construcción, como para la fase de construcción, se establece la energía incorporada para dicha unidad habitacional con sus características constructivas y además las emisiones de CO₂ acumuladas o totales, hasta esta fase del ciclo de vida.

Con la finalidad de integrar otra fase del ciclo de vida de la vivienda “línea base”, se consideran los valores correspondientes a la demanda energética de dicha unidad habitacional, y se proyecta la vida útil de ésta en 40 años (en función de los criterios de tasación del Servicio de Impuestos de Chile - SII), y se asume que la vivienda será calefaccionada con leña (se evalúan adicionalmente otros combustibles tales como; gas licuado, electricidad y parafina), buscando determinar el consumo energético y emisiones durante los 40 años del ciclo de vida de la vivienda “línea base”.

La metodología planteada consideró sensibilizar los resultados obtenidos, de este modo se consideró modificar las materialidades de la envolvente, conservando la transmitancia térmica de las soluciones de muro con la finalidad de comparar los resultados obtenidos desde el punto de vista de la energía incorporada y emisiones de CO₂. Para ello se trabajó con tres soluciones constructivas desarrolladas por el MINVU, las cuales se detallan en extenso en el desarrollo del capítulo cinco, pero que básicamente corresponden a soluciones de muros con materialidades en base a madera, albañilería de ladrillo y hormigón.

También se consideró incluir en la metodología la variable ubicación geográfica, por lo que la vivienda “línea base” diseñada originalmente para la Región de la Araucanía, fue simulada para ubicarla en la Región del Biobío haciendo variar la demanda energética y de este modo sensibilizar los resultados obtenidos.

El análisis para la identificación y cuantificación de los consumos energéticos, se obtuvo previo a la modelación de la vivienda en estudio con las herramientas “*TAS Building Designer - 3D Modeller*” y la introducción de las variables de cada caso con “*TAS BuildingDesigner - Building Simulator*” para la simulación de los 96 casos en estudio,

Capítulo 1/ Objetivos de la Investigación

considerando los diferentes criterios de parametrización. Información que se entrega en forma detallada en Capítulo 5 del presente documento.

Finalmente para concluir el capítulo se entregan análisis de los resultados y se concluye con respecto a ellos.

Capítulo seis: Este capítulo muestra, las conclusiones inferidas de los diferentes trabajos de investigación desarrollados en la presente tesis doctoral. Las cuales muestran los corolarios generales, con un carácter transversal y amplio, vinculadas a los temas concretos desarrollados en los diferentes capítulos.

Seguidamente, se muestra la productividad científica, contribuciones y futuras líneas de investigación generadas a partir de ella.

2 CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE - ACV COMO HERRAMIENTA DE SOSTENIBILIDAD EN LA EDIFICACIÓN.

2.1 RELACIÓN DEL ACV Y LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE

(Luxán, 1996), reivindica el ACV como una herramienta necesaria para una arquitectura sostenible, afirmando que: “Para descubrir la incidencia de la construcción y el alojamiento en los problemas medioambientales hoy, se debe de analizar por entero el proceso que engloba la edificación. Habitualmente al hablar de hábitat, se valora la adecuación o la conciencia energética de los edificios en función solamente del gasto o ahorro energético en la climatización e iluminación durante su uso, así como la contaminación que produce en su entorno inmediato. Sin embargo, las relaciones entre edificación y medio ambiente son mucho más extensas y complejas”.

Al respecto plantea que si se analiza en forma completa, la actividad que implica una construcción, podrá valorarse la incidencia medioambiental en todo el proceso:

Extracción de rocas, minerales y materias primas de todo tipo, gastos energéticos y procedimientos para la fabricación de materiales y elementos constructivos, transportes de materiales, elementos y equipos, puesta en obra, medios y maquinaria, gastos energéticos en climatización e iluminación y contaminación derivada, mantenimiento y uso, agua, residuos y vertidos, reutilización y procedimientos para cambios de uso, desconstrucción y derivaciones del abandono de las edificaciones, entre los más importantes.

Al relacionar cada una de estas fases con los principales problemas medioambientales actuales, se descubre la verdadera extensión de las repercusiones derivadas de la construcción.

De este modo, la evaluación y reducción del impacto medioambiental de los edificios requiere de metodologías de evaluación de impacto adecuada, de carácter global y que incluya todas las etapas de la vida útil de un edificio (Jönsson, 2000).

La herramienta de trabajo más utilizada en el estudio del desempeño ambiental de los edificios, dando cuenta de la implicancia ambiental de materiales y soluciones

constructivas, es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), estandarizado en las normas ISO 14.040 y prEN15.804 (Liébana, 2012).

A diferencia de otras metodologías, que se centran en la mejora de los impactos medioambientales de los procesos, el ACV estudia los aspectos medioambientales y los impactos potenciales a lo largo de toda la vida de los productos y/o servicios, “desde la cuna hasta la tumba”, es decir, desde la extracción de las materias primas y la energía necesaria en su producción, uso y disposición de los productos desde una perspectiva global, sin ningún tipo de límites geográficos, funcionales y/o temporales (CIRCE, 2012)

En términos generales, el ACV corresponde a una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas de la vida útil de un producto (Thormark, 2002).

Los tres aspectos más importantes del ACV son las fuentes, los flujos y los sumideros (Sources, fluxes y sinks). Las Fuentes de Emisión del ciclo de vida son: emisiones por extracción y procesamiento de materiales, emisiones por energía de consumo, emisiones fugitivas y emisiones por huella ecológica (Liébana, 2012).

Desde el año 2000, el número de métodos para la evaluación ambiental de edificios en el mundo se ha multiplicado considerablemente (Macías et al., 2010). En lo relativo al comportamiento ambiental global, la metodología que se presenta como más adecuada para su cuantificación, es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Rivela et al., 2006).

La aplicación de esta herramienta se ha generalizado al marco de definición de políticas ambientales, según (Rivela et al., 2012), para la UE, al ACV se ha constituido en la piedra angular de la Política Integrada de Productos, la Estrategia Temática sobre Prevención y Reciclado de Residuos y la Estrategia Temática sobre el Uso Sostenible de Recursos Naturales. En este contexto, la Unión Europea ha señalado el ACV como la mejor herramienta para evaluar el potencial impacto ambiental de los productos, creando la “*European Platform of Cycle Assessment*” para promover el empleo de la herramienta.

En el ámbito específico del sector construcción, el Comité CEN/TC 350 “*Sustainability of Construction Works*”, responsable de la norma europea de evaluación de sostenibilidad de edificios, ha establecido el ACV como la metodología de referencia para el marco de trabajo de los métodos de evaluación del comportamiento ambiental (Rivela et al., 2012).

Según (Zabalza, 2009), la aplicación de una metodología ACV aplicada en edificaciones, debiera permitir:

- Desarrollar herramientas para evaluar las medidas más rentables para el ahorro de energía y la disminución de impactos ambientales durante todo el ciclo de vida de los edificios.

- Establecer los objetivos a corto, medio y largo plazo dentro de una estrategia global para la disminución del impacto medioambiental del sector edificación.
- Asesorar a los planificadores urbanísticos, promotores inmobiliarios, constructores y diseñadores (arquitectos e ingenieros) para alcanzar objetivos de sustentabilidad establecidos.
- Conseguir un funcionamiento y gestión ecoeficiente de los edificios de modo que sus condiciones reales de funcionamiento se ajusten a las condiciones de diseño.

En este capítulo se presenta el estado del arte de las aplicaciones ACV en el sector edificación. Se describe la metodología, se hace referencia a bases de datos y herramientas existentes para el cálculo ACV, se muestran las principales iniciativas, estudios y proyectos desarrollados a nivel mundial, principalmente europeos en el uso del ACV en la edificación. Se entrega además una visión del escenario nacional y las proyecciones y oportunidades de mejora en el desempeño ambiental de las edificaciones con el uso de la herramienta.

2.2 ORÍGENES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

Según (Zaror, 2002), el Análisis del Ciclo de Vida originalmente se desarrolló en la década del 70, a raíz de la crisis energética. Inicialmente, se limitó a simples balances de materia y energía a lo largo del proceso de generación y consumo energético, con vistas a identificar oportunidades de ahorro de energía a través de la cadena de producción y consumo.

Dada la estrecha relación existente entre el consumo energético, el consumo de recursos materiales y las emisiones de residuos, no fue difícil evolucionar hacia el ACV tal como se conoce en la actualidad.

El primer estudio ACV que registra la literatura, indica que en el año 1969, la firma estadounidense Coca Cola, financió un estudio destinado a relacionar y comparar el consumo de recursos para fabricar los envases para sus bebidas con las emisiones asociadas a los procesos productivos correspondientes. Dicho estudio fue realizado por Midwest Research Institute de EEUU y se definió como un análisis de recursos y perfil ambiental (Zaror, 2002).

Por la misma época, también en Europa se estaba estudiando un inventario ambiental bastante singular, que más tarde se conoció como «Ecobalance». En 1972, en el Reino Unido, Lan Boustead se dedicó a calcular la energía total que se requería para la fabricación de diversos tipos de envases (de vidrio, plástico, acero y aluminio) para

bebidas. Las conclusiones fueron publicadas en su artículo «LCA-How it came about-The beggining in the UK», publicado en International Journal of Life Cycle Assessment, 1996.

A partir de ese entonces se sucedieron decenas de estudios similares, orientados a minimizar el consumo de recursos y generación de residuos. A mediados de la década de los 80, se había logrado constituir una buena base de información acerca de los atributos ambientales de diferentes tipos de envases y embalajes, en cuanto al consumo de energía y materiales, y a las emisiones de residuos (Zaror, 2002).

En la medida que el requerimiento de minimización de consumo de recursos y de generación de emisiones se generalizó en el mundo industrializado, la herramienta ACV fue madurando progresivamente.

“El gran salto metodológico fue dado a comienzos de la década del 90, con las contribuciones de la EPA-EE.UU e Instituciones ambientales europeas, tales como la BUWAL - Suiza, el CML - Holanda y el IVL - Suecia, entre otros” (Zaror, 2002).

En su forma actual, el ACV constituye una herramienta de gestión ambiental y diseño de procesos menos contaminantes. El uso de la metodología ACV, ha sido incorporado en el desarrollo de los sistemas de ecoetiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de “productos ambientalmente favorables” y en las normas ISO.

2.2.1 Principios Normativos ACV

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es el organismo que ha desarrollado una serie de estándares enfocados a la Administración o Gestión Ambiental. Estos estándares incluyen la serie ISO - 14040 sobre el ACV, las cuales son de carácter voluntario.

Al respecto, cabe señalar que las normas ISO, poseen varios estándares asociados a la conducción de ACV, a saber:

Norma ISO 14040:	Presenta los principios generales y requerimientos metodológicos del ACV de productos y servicios.
Norma ISO 14041:	Guía para determinar los objetivos y alcances de un estudio de ACV y para realizar el análisis de inventario.
Norma ISO 14042:	Guía para llevar a cabo la fase de evaluación de impacto ambiental de un estudio ACV.

Norma ISO 14043:	Guía para la interpretación de los resultados de un estudio ACV.
Norma ISO 14048:	Entrega información acerca del formato de los datos que sirven para la evaluación del ciclo de vida.
Norma ISO 14049:	Posee ejemplos que ilustran la aplicación de la guía ISO 14041.

Las técnicas específicas para el análisis del ciclo de vida de un producto o un proceso, aún se encuentran en pleno desarrollo. Aspectos tales como el modelamiento y el análisis de flujo y energía a través del ciclo de vida y su relación con diferentes compartimientos ambientales, representa un gran desafío de investigación, (Zaror, 2009).

La *society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), la ISO, agencias ambientales y agrupaciones industriales diversas, han desarrollado y propuesto diferentes enfoques para la realización del ACV. En tal sentido, se hace necesario un consenso entre todas las partes interesadas para que la información que se obtenga de los ACV, sea comparable sobre una base común. Al respecto, el *Journal of Life Cycle Analysis* y el *Journal of Cleaner Production*, se han especializado en la publicación de artículos sobre diferentes aspectos del ACV, constituyendo un foro internacional de reconocido prestigio para la discusión de las herramientas metodológicas y resultados de estudios específicos.

En los últimos años, se ha propuesto ampliar el enfoque del ACV atendiendo a la triple "P" de la sostenibilidad: people (social) - planet (ambiental) - profit (económica), proponiendo un análisis de ciclo de vida para la sostenibilidad (ACVS), que integre el ACV convencional con el Análisis del Coste del Ciclo de Vida (ACCV) y el análisis del ciclo de vida social (Circe, 2012).

2.2.1.1 Principios Normativos ACV aplicables al sector edificación

En Europa actualmente se está desarrollando un conjunto de estándares metodológicos por parte del Comité Técnico 350 "Sustainability of construction works" del Comité Europeo de Normalización, con la finalidad de avanzar en Normalización en el campo de la gestión integral del comportamiento medioambiental de los edificios (CEN/TC 350, prEN 15643 - 1 - 2 - 3 y - 4). Estos estándares proporcionan un método de cálculo basado

en el ACV para evaluar el comportamiento medioambiental de un edificio y comunicar los resultados de dicha evaluación.

A modo de resumen, se muestran los principios normativos aplicables a la medición de sustentabilidad de edificios, tanto a nivel internacional como nacional (AENOR, 2012; INN 2013):

Comités y Grupos de Trabajo relacionados con la normalización de la Sostenibilidad en Edificios

A nivel internacional: ISO/TC50/SC17/WG1 “Sustainability in buildings and civil engineering works. Civil engineering works”.

- 4 normas publicadas por el SC17 (*ISO 21930:2007* del WG3; *ISO 15392:2008* del WG1; *ISO 21931 1:2010* del WG4; *ISO 21929-1:2011* del WG2)
- 4 normas en desarrollo por el SC17 (*ISO/NP TS 12720* e *ISO/DTR 21932* del WG1; *ISO/NP 16745 1* del WG4; ***ISO/DIS 21929-2*** del WG5).

A nivel europeo: CEN/TC350/WG6 “Sustainability of construction works. Civil engineering works”

- 5 normas publicadas por el TC350 (*CEN/TR 15941:2010* y *EN 15942:2011* del WG3; *EN 15643-1:2010* y *EN 15643-2:201* del TG; *EN 15978:2011* del WG1)
- 3 normas en desarrollo por el TC350 (todas de edificación: *EN 15643-3* del WG5; *EN 15643-4* del WG4; *prEN 16309* del WG5)

A nivel nacional: NCh 3048/1.Of.2007 - NCh 30491.Of.2007. Sustentabilidad en la Construcción de Edificios.

- 2 normas homologadas y adaptadas respectivamente por el INN (adaptadas de *ISO/TS 21929-1:2006 Sustainability indicators - part 1*; adaptada *ISO/TS 15932*, *ISO/TR 21932*; *ISO/TS 21929-1*)

2.2.2 Definición de Análisis de Ciclo de Vida

A continuación se mencionan las definiciones más utilizadas para el ACV:

- Norma ISO 14040 - 2006: “*El análisis de vida es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio*”.

- UNE -EN 14040: 2006: *“El análisis del ciclo de vida es una recopilación y evaluación de las entradas y salidas de materia y energía, y de los impactos ambientales potenciales directamente atribuibles a la función del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida”*.
- Consejo Nórdico de Ministros: *“El análisis de Ciclo de Vida es un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un sistema de producción o actividad, identificando y cuantificando las cantidades de materia y energía utilizados, y los residuos generados, y evaluando los impactos ambientales derivados de estos”*.

El ACV permite obtener un modelo simplificado de un sistema de producción y de los impactos ambientales asociados; sin embargo, no pretende entregar una representación total y absoluta de la interacción ambiental. A pesar de postular a una cobertura sobre todo el ciclo de vida de un producto, en muchos casos, resulta difícil abarcar todas las actividades desde la “cuna a la tumba”, por lo que se debe definir claramente el sistema requerido para que el producto cumpla con una determinada función (Zaror, 2009).

2.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV)

La metodología general del ACV consta de cuatro fases, según lo muestra la Ilustración 2-

1. Si bien es posible realizar estudios simplificados, en los que se elimine alguna de ellas:
 - a) Definición de objetivos y alcance, donde se establece la finalidad del estudio, los límites del sistema, los datos necesarios, otras hipótesis e identificar los componentes del ciclo de vida (ej.: extracción, transporte, almacenamiento, producción, consumo, reciclaje, disposición final del producto, etc.)
 - b) Análisis de inventario, donde se cuantifican todos los flujos de energía y de materiales que entran y salen del sistema durante toda su vida útil. Se desarrollan aquí los balances de materia y energía, a través de los diferentes componentes del ciclo de vida.
 - c) Evaluación de impactos, donde se realiza una clasificación y evaluación de los resultados del inventario, relacionándolos con efectos ambientales observables a través de un conjunto de categorías de impactos seleccionadas. Se debe identificar y caracterizar, previamente, los compartimentos ambientales a incluir en el análisis y su relación con las etapas del ciclo de vida del producto.
 - d) Interpretación, donde los resultados de las fases precedentes son analizados conjuntamente, en consonancia con los objetivos del estudio, con objeto de

establecer las conclusiones y recomendaciones finales. Se debe identificar y evaluar las medidas de mejoramiento que permitan reducir aquellos impactos de mayor relevancia.

La metodología ACV, tiene un carácter dinámico, y las cuatro fases de las que consta están interrelacionadas. Por ello, a medida que se obtienen los resultados se pueden reconsiderar las hipótesis planteadas o refinar los datos utilizados en cualquiera de las fases (Aranda., et al., 2006).

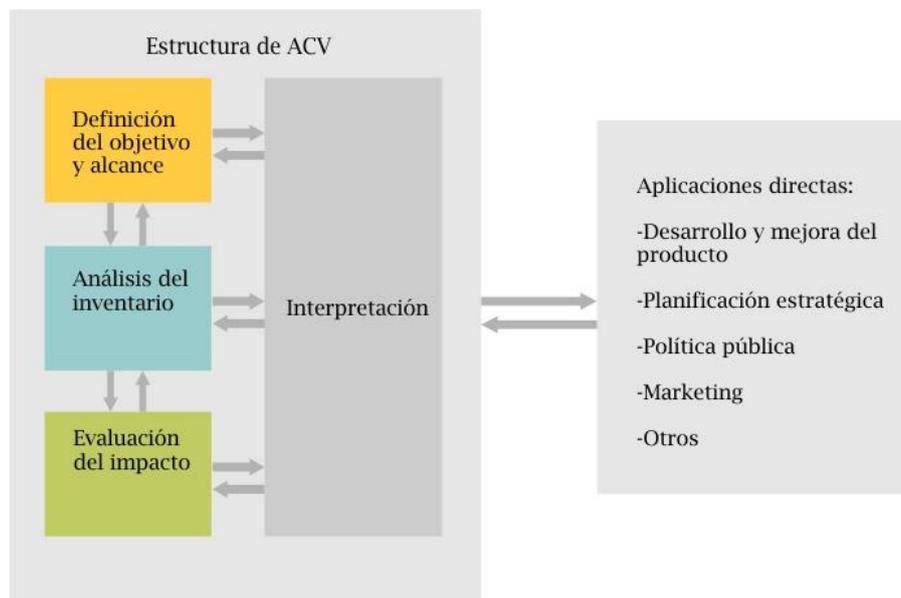


Ilustración 2-1: Estructura de ACV. ISO 14.040-2006

2.3.1 Definición de Objetivos y alcance

El primer paso en el desarrollo de un ACV es la definición de los objetivos del estudio. Se debe especificar las razones que impulsaron el trabajo y la información que se espera obtener como resultado. Debido a su naturaleza global, un ACV podría ser interminable y debe establecerse límites a su extensión. La definición de los límites del sistema a estudiar es una de las etapas críticas del ACV.

Es evidente que en el caso de los estudios de ACV en edificios, el objetivo y alcance pueden variar notablemente en función del tipo y uso del edificio, de su localización geográfica y del momento de la vida del edificio en que se haga el estudio (etapa preliminar de diseño, construcción, uso, rehabilitación o demolición). No obstante, si se pretende comparar los resultados del ACV de distintos edificios, deberán utilizar la misma unidad funcional y consideraciones metodológicas equivalentes como la función, los límites del sistema, la calidad de los datos, la evaluación de impacto, etc (Circe, 2012). Según la norma ISO, en la definición del alcance del ACV se consideran los siguientes aspectos, entre otros.

- a) **Función del sistema:** Se deben describir las funciones que definen el sistema en estudio. Esto es importante en aquellos casos donde el producto puede cumplir varias funciones. Por ejemplo, un edificio de departamentos que cumple la función de habitabilidad con respecto a otro edificio cuyo diseño esté orientado a oficinas, dadas sus características, el ACV no sería comparable.
- b) **Unidad funcional:** que constituye la unidad de referencia para todas las entradas y salidas del sistema que se obtendrán en el análisis de inventario. El “tamaño” de la unidad funcional depende del tipo de estudio que se pretenda realizar. Un ejemplo típico de unidad funcional aplicado a edificios podría ser: un edificio diseñado para un determinado número de residentes o trabajadores suponiendo una ocupación del 100%, en una localización concreta, cumpliendo unas normativas determinadas relativas al confort térmico, limitación de demanda energética, etc., durante una vida útil estimada de 50 años. En estudios de ACV comparativos de edificios, debido a las múltiples funciones que puede desempeñar un edificio y las distintas exigencias normativas existentes en función de su ubicación, se suele utilizar el concepto de “equivalente funcional”, definido como la unidad de referencia que cumple con la legislación vigente y con los requisitos de la propiedad y que considera la cantidad analizada (1m², 1m³, 1 edificio, etc.), la función, (proporcionar espacio para vivir y/o trabajar, etc.), la calidad de dicha función (requisitos de confort térmico, calidad de vida, etc.), el patrón de uso (porcentaje de ocupación), su ubicación (condiciones ambientales de radiación, humedad y temperatura, requisitos normativos, etc.) y su duración (50 años, 80 años, etc.) (Zabalza, 2009).

- c) **Límites del sistema:** Se debe identificar el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que permiten producir el producto en estudio. Ello incluye la obtención de los recursos primarios, todos los procesos de fabricación y transporte de los componentes del producto y sus materias primas, además de todas las fases del ciclo de vida del producto terminado. Es necesario decidir qué procesos y etapas del sistema se van a incluir en el estudio, así como los criterios que se utilizan para tal decisión y su compatibilidad con los objetivos del ACV. Por ejemplo, se puede excluir del análisis los componentes que se encuentren bajo un % límite (ej. menor de 0,5% del peso del producto). Es importante establecer los límites geográficos (Zaror, 2009).

*Sistema: que se define como el conjunto de procesos unitarios o subsistemas necesarios que, interconectados material y energéticamente, permiten la presencia del producto estudiado en el mercado.

- d) En el caso de edificios, según las recomendaciones del (CEN 350, 2008), el sistema a analizar debe incluir las siguientes 4 etapas o subsistemas del edificio: producción, construcción, uso y disposición final, tal como se indica en la Ilustración 2-2.

Dentro del alcance, hay que definir también las categorías y metodologías de evaluación de impacto que se van a emplear en el estudio. Cada método de evaluación difiere en las categorías de impacto consideradas y en el peso asignado a cada una de ellas. La tabla 2-1 muestra, sobre la base del mayor consenso científico existente, las categorías de impacto recomendadas por el Comité Europeo de Normalización para llevar a cabo estudios de ACV en edificios (CEN/TC 350, 2008; Ilomáki A., 2009).

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

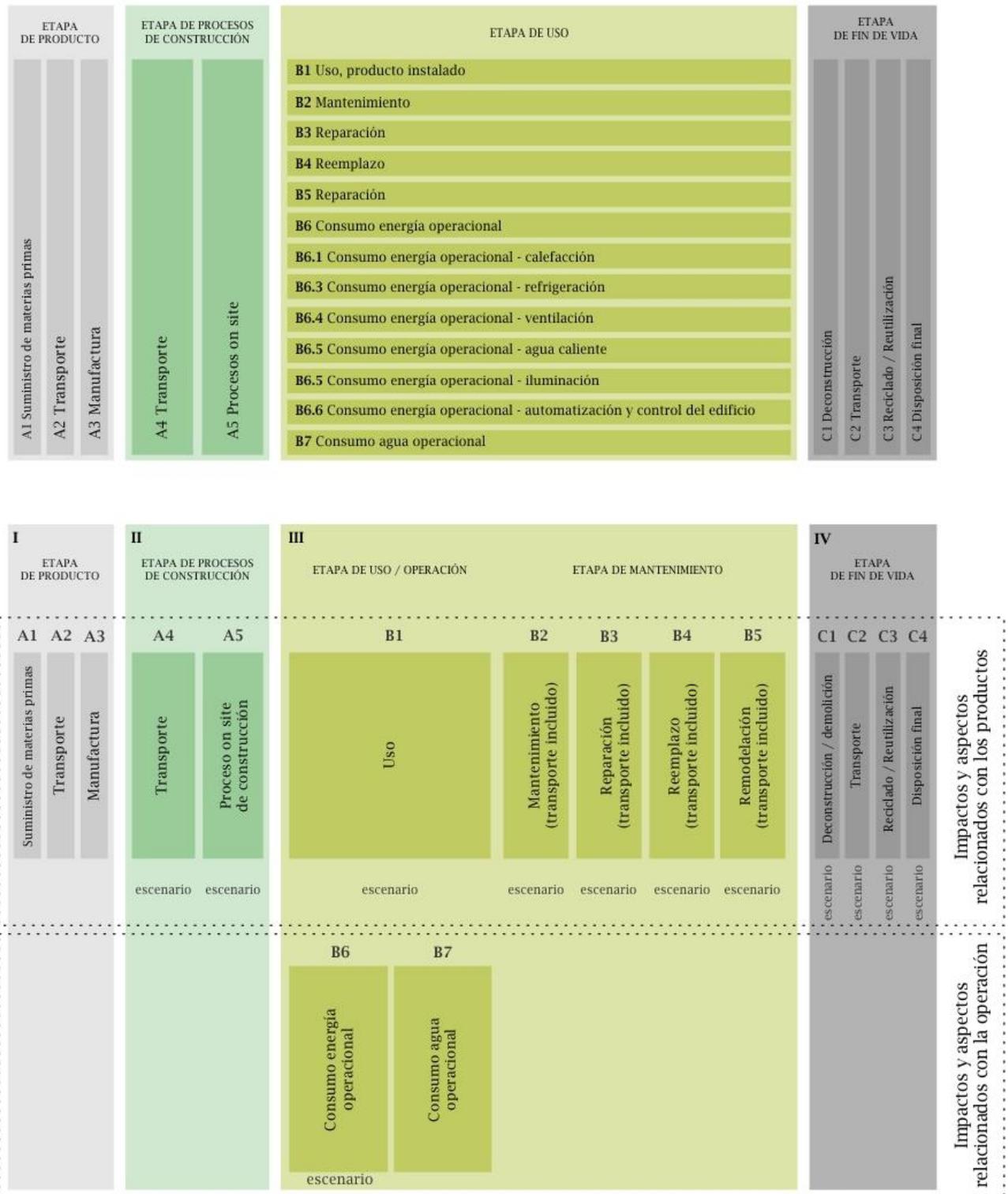


Ilustración 2-2: Etapas del ciclo de vida de un edificio según el estándar prEN 15643-2 del CEN/TC 350.

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

Tabla 2-1: Categorías de impacto sugeridas para ACV en edificios. (CEN/TC 350, 2008; Ilomáki A., 2009)

Categoría de impacto	Unidad
Calentamiento global potencial	kg CO ₂ -equivalentes
Destrucción de la capa de ozono estratosférico	Kg CFC-11-equivalentes
Acidificación de la tierra y el agua	kg SO ₂ -equivalentes
Eutrofización	kg PO ₄ -equivalentes
Formación de ozono troposférico	kg C ₂ H ₂ -equivalentes
Residuos radioactivos	Kg
Uso energía renovable/no renovable	MJ
Uso recurso de agua dulce	m ³
Uso energía renovable/no renovable (diferente energía primaria)	Kg
Uso de recursos reciclados /reutilizados (distintos energía primaria)	Kg
Materiales para reciclaje o para valorización energética	Kg
Residuos peligrosos y no peligrosos para disposición final	Kg

Otro aspecto a definir dentro del alcance son los requisitos de calidad de los datos, que deberán definirse de modo que permitan lograr los objetivos del estudio. Estos requisitos deberían especificar la cobertura temporal (antigüedad de los datos utilizados), la cobertura geográfica (local, regional, nacional, continental, global, etc.), la cobertura tecnológica (mejor tecnología disponible, media ponderada de tecnologías, etc.), la precisión, amplitud y representatividad de los datos, la consistencia y reproducibilidad de los métodos usados en el ACV, las fuentes bibliográficas de los datos y su representatividad, y la incertidumbre de la información.

2.3.2 Análisis del Inventario

El análisis de inventario comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de cada uno de los procesos unitarios que formen parte del sistema analizado. En definitiva se trata de realizar un balance de los flujos elementales que entran y salen del sistema a lo largo de toda su vida útil para la unidad funcional seleccionada. Los flujos elementales son los flujos energéticos y de materiales que provienen de la naturaleza (como por ejemplo, el petróleo, el carbón, el agua, la arena natural, etc.) sin ninguna transformación previa realizada por el ser humano, o que van directamente a la naturaleza (como por ejemplo, las emisiones al aire

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

de CO₂, los vertidos de nitratos al agua, etc.). Para cada proceso unitario, las entradas cuantificadas incluyen el uso de energía y materias primas, mientras que las salidas cuantificadas incluyen las emisiones al aire, agua y suelo, subproductos y otros vertidos, representado en la ilustración 2-3.

Parte de los flujos materiales y energéticos proceden de la naturaleza o se destinan a ella, mientras que otros flujos tienen su origen o destino en la tecnósfera.

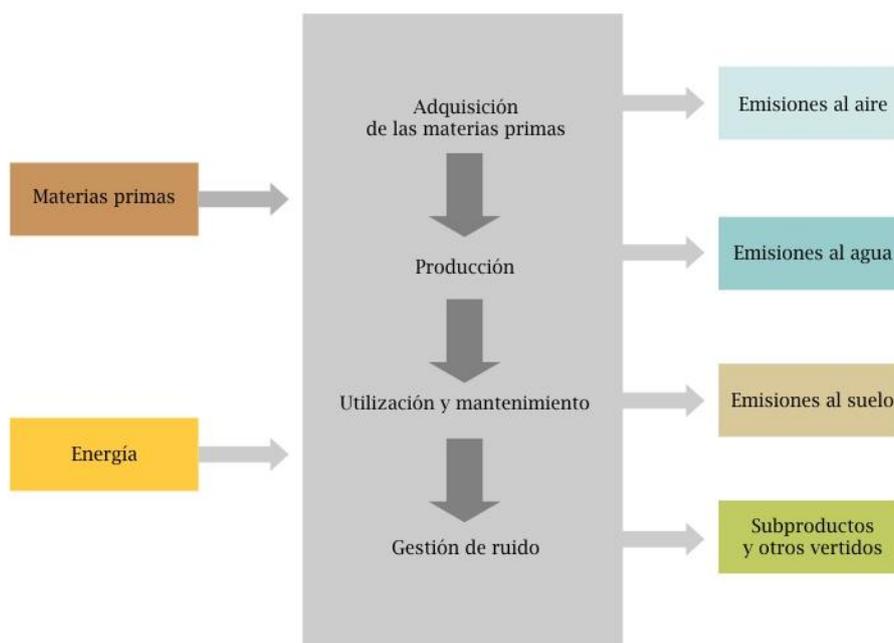


Ilustración 2-3: Inventario del ciclo de vida aplicado a un proceso unitario del sistema (Proyecto EnerBuiLCA, 201

En caso de que existan procesos que den lugar a más de un producto, o los residuos del producto sean reciclados o reutilizados para crear un nuevo producto, se deben aplicar criterios de asignación que permitan un adecuado reparto de los impactos entre los distintos productos.

El análisis de inventario es un proceso iterativo, ya que existen los nuevos datos y el mayor conocimiento obtenido durante el desarrollo del trabajo permiten redefinir con mayor precisión las fases del ciclo o los flujos materiales y energéticos.

El procedimiento recomendado para realizar el análisis de inventario incluye las siguientes etapas:

- Construcción del diagrama de flujo
- Establecer la calidad de los datos (niveles de precisión requeridos)
- Definir los límites del sistema
- Recolección de los datos y cálculos de balances
- Redefinición de los objetivos y alcances

Una vez construido el diagrama de flujo, el sistema se subdivide en subsistemas y estos a su vez en procesos unitarios, para facilitar los cálculos de balance (Zaror, 2009).

2.3.3 Evaluación de Impactos

Una vez completada la fase de inventario, es necesario evaluar los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en éste. El inventario puede constar de cientos de datos de consumos y emisiones para un gran número de compuestos, lo que es muy difícil de interpretar. En la práctica del ACV, se habla de *impactos ambientales potenciales*, ya que las actividades o subsistemas del sistema en estudio están ubicadas en diferentes lugares y se pueden llevar a cabo en distintas épocas. En muchos casos, no se trata de sistemas localizados en una ubicación espacial específica, ni de consumos y emisiones que se efectúa en el mismo instante de tiempo. Por lo tanto, no es correcto suponer que los impactos totales se obtienen de una simple sumatoria de los impactos esperados en cada subsistema.

Ello es más crítico en el caso de impactos muy locales o de ámbito temporal reducido. Sin embargo, en el caso de impactos globales o de efectos prolongados (ej. calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico), es posible sumar las contribuciones de cada fase del ciclo de vida.

Según (Zaror, 2009), la evaluación de impacto ambiental en el contexto de un ACV aún es materia de debate. Sin embargo, existe cierto consenso respecto a los elementos que constituyen la evaluación de impacto en un ACV, a saber: Clasificación, Caracterización y Valoración.

2.3.4 Clasificación

En esta fase las cargas ambientales se clasifican de acuerdo a diferentes categorías de impacto, según el tipo de efecto ambiental esperado. Las categorías de impacto se agrupan de acuerdo a 3 áreas de protección ambiental, según la proposición de SETAC (adoptada por la mayoría de las metodologías de ACV en uso actual), según se muestra en tabla 2-2:

- ✓ Recursos Naturales.
- ✓ Salud humana.
- ✓ Salud ecológica.

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

Tabla 2-2: Principales categorías de impacto (SETAC, 1993)

Categorías de impacto relativas a las entradas del ICV		
Categorías	Indicador	Carácter
Uso de recursos abióticos		Global
Uso de recursos bióticos	Varios	Global
Uso del suelo		Local
Categorías de impacto relativas a las salidas del ICV		
Categorías	Indicador	Carácter
Calentamiento global	kg CO ₂	Global
Disminución capa ozono	kg CFC 11	Global
Toxicidad humana	Varios	Varios
Acidificación	kg SO ₂	Continental, regional o local
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻	Continental, regional o local
Ruido	Varios	Local

Cada método de evaluación considera unas determinadas categorías de impacto. El resultado final es un inventario agrupado y simplificado donde solo aparecerán aquellos flujos energéticos y materiales que afecten a las categorías seleccionadas.

2.3.5 Caracterización

En esta fase, se aplican modelos a cada categoría de impacto para obtener indicadores ambientales. El cálculo de los indicadores numéricos de categoría para cada categoría de impacto, se basa en la conversión de los resultados del ICV (Inventario de Ciclo de vida), a unidades comunes utilizando factores de caracterización, obteniendo como resultado un indicador numérico para cada categoría de impacto. En definitiva, en esta fase se multiplican los resultados del ICV en la fase de clasificación por factores de caracterización de cada sustancia incluida dentro de cada categoría de impacto. El resultado de la caracterización es el perfil ambiental del sistema, compuesto por el conjunto de indicadores ambientales de las categorías de impacto consideradas.

Por ejemplo dentro de la categoría de impacto ambiental: calentamiento global, se incluyen principalmente las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O; gases emitidos por la acción humana que se ha demostrado que contribuyen al sobrecalentamiento del planeta. No obstante, cada uno de estos gases contribuye con distinto peso al calentamiento global. Para realizar la caracterización, se toma como indicador de referencia los kg de CO₂

emitidos, por lo que su factor de caracterización será la unidad. A partir de ahí, sobre la base de estudios científicos (en este caso podrían servir de referencia los estudios que periódicamente publica el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático se conoce que el CH₄ (Metano) contribuye al calentamiento global 21 veces más que el CO₂ emitiendo la misma cantidad de masa, y que en el caso del N₂O (Óxido Nitroso), su contribución es 290 veces mayor que la del CO₂. Por tanto los factores de caracterización del CH₄ y del N₂O para el calentamiento global serían de 21 y 290 respectivamente. El indicador numérico de la categoría “calentamiento global” se obtendría a partir de la suma ponderada de la masa emitida de cada contaminante multiplicada por su factor de caracterización, de acuerdo con la siguiente fórmula, (CIRCE, 2012):

$$\text{Calentamiento global (kg CO}_2\text{)} = \sum_i \text{CG}_i \times \text{m}_i;$$

Donde:

CG_i: Factor de caracterización para el calentamiento global de la sustancia i (kg CO₂/kgi).

m_i: Masa emitida de la sustancia i (kgi).

El resultado final de la caracterización es un inventario agrupado por categorías de impacto, evaluadas cada una de ellas mediante un indicador numérico, para el ejemplo descrito en Ilustración 2-4, se muestra la relación del Inventario (ICV) caracterizado para la categoría de impacto, potencial de calentamiento global a partir del modelo de caracterización y los factores caracterización asociados a él.

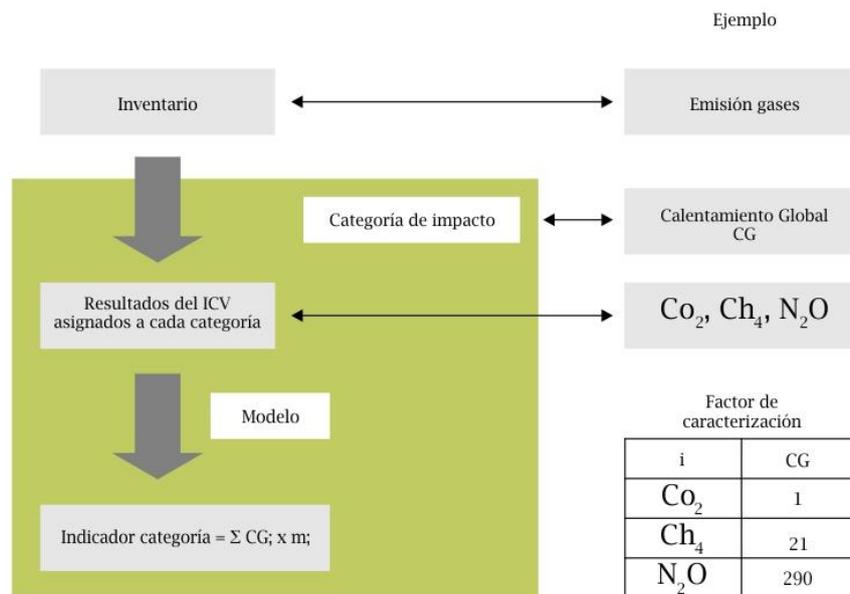


Ilustración 2-4: Fases de clasificación y caracterización de la EICV. Categoría de impacto: calentamiento global (Circe, 2012)

Es importante destacar que opcionalmente los resultados numéricos de la caracterización pueden además normalizarse, agruparse y ponderarse en las siguientes etapas:

- a) *Normalización*: Cálculo de la magnitud de los resultados de los indicadores de categoría con relación a las magnitudes reales o previstas a escala nacional, continental o global para dichos indicadores. Es una etapa opcional de la fase de evaluación de impactos que muestra el grado de contribución de cada categoría de impacto considerada sobre el problema global. De este modo ayuda a comprender mejor la magnitud relativa de los indicadores numéricos obtenidos en la caracterización. En la normalización se dividen los resultados de la caracterización por factores normalizados. Los factores de normalización constituyen la magnitud real o predicha de la categoría de impacto correspondiente al área geográfica y momento de tiempo. La recopilación de resultados de indicador de categoría normalizados representa un perfil normalizado de EICV.
- b) *Valoración o ponderación*: Cálculo subjetivo de resultados ponderados para cada categoría de impacto y posible agregación de los mismos. En esta etapa se convierten los resultados de los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto, utilizando factores numéricos basados en valoraciones subjetivas o juicios de valor. Es decir en un país con pocos recursos hídricos será una categoría con mucha importancia el consumo de

estos recursos. La ponderación consiste en multiplicar los factores de ponderación por el resultado de la normalización para cada categoría de impacto y sumarlos posteriormente para poder obtener una puntuación total del sistema analizado. En un estudio de ACV puede resultar aconsejable utilizar factores de ponderación diferentes y realizar un análisis de sensibilidad para evaluar las consecuencias sobre los resultados de la EICV de los diferentes factores de ponderación empleados. Los factores de valoración son obtenidos con criterios socioeconómicos y no científicos y la suma de todos ellos debe ser la unidad. Se pueden basar en valores monetarios, estándares fijados por las autoridades o criterios establecidos por panel de expertos.

Finalmente conviene destacar que en un estudio determinado se pueden utilizar diferentes metodologías de evaluación de impacto con objeto de contrastar los resultados obtenidos para distintas categorías de impacto. Las metodologías de evaluación incluyen normalmente varios de los indicadores medioambientales presentados anteriormente.

A partir de la tabla 2-3, se obtiene información referida a las metodologías más comunes, utilizadas en los estudios de ACV (CIRCE, 2012).

En la interpretación se combinan los resultados de las fases anteriores del ACV para obtener conclusiones y recomendaciones útiles para la toma de decisiones sobre el sistema analizado. En la interpretación se engloban 3 elementos fundamentales:

- a. Identificación de las variables significativas: qué procesos conllevan un mayor impacto y cuáles se podrían obviar.
- b. Verificación de los resultados: Se pretende establecer y reforzar la confianza y fiabilidad de los resultados del estudio mediante análisis de integridad, de sensibilidad y de consistencia.
- c. El análisis de integridad pretende asegurar que toda la información relevante y los datos necesarios para la interpretación están disponibles y completos. En el análisis de sensibilidad se evalúa la fiabilidad de los resultados finales y de las conclusiones determinando si se ven afectados por incertidumbres en los datos o en los métodos de evaluación seleccionados. El análisis de consistencia valora si las hipótesis, métodos y datos son coherentes con el objetivo y alcance del estudio.
- d. Conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

Tabla 2-3: Principales metodologías de evaluación de impactos del ciclo de vida, (CIRCE, 2012)

Metodología	Características	Entidad desarrolladora
CML 92	Método de impacto intermedio muy utilizado con una caracterización relativamente simple y diversas opciones de normalización	CML (Holanda)
CML 2 baseline 2000	Actualización del método CML 92 con modelos más avanzados	CML (Holanda)
EPS 2000	Método orientado a daños, que considera la monetarización (disposición a pagar) como ponderación	IVL (Suecia)
Eco indicador 95	Método de distancia al objetivo, basado en objetivos científicos. Incluye modelos orientados a los daños	PRé (Holanda)
Eco indicador 99	Actualización del método Eco indicador 95. Método orientado a los daños, utiliza indicadores de categoría de impacto final. Incluye 3 versiones que consideran distintas hipótesis	PRé (Holanda)
IMPACT 2002+	Método orientado a los daños con muchas semejanzas al método Eco indicador 99, pero con los factores de toxicidad completamente recalculados	EPFL (Suiza)
TRACI 2002	Método de impacto intermedio desarrollado por US EPA	US EPA (Estados Unidos)
Eco puntos 97 y 2006	Método de distancia al objetivo, basado en los objetivos de la política suiza. También conocido como método Ecoscarcity o UBP. Existen dos versiones: 1997 y 2006, siendo ésta la última actualización	E2, ESU services (Suiza)
EDIP 97 y 2003	Método de caracterización y normalización desarrollado por la DTU. Existen dos versiones: 1997 y 2003, siendo ésta la última actualización	EDIP - DTU (Dinamarca)
LIME	Método japonés que incluye diversas categorías de impacto intermedio y final	AIST (Japón)
LUCAS	Método canadiense de impacto intermedio que adapta algunos modelos de caracterización de TRACI 2002 e IMPACT 2002+	CIRAIG (Canadá)
RECIPE	Método reciente que integra y actualiza los métodos Eco indicador 99 y CML 2, incluyendo categorías de impacto intermedio y final	RUN, PRé, CML y RIVM (Holanda)
MEEUP	Metodología de impacto intermedio enfocada al diseño ecológico de productos	VhK (Holanda)

2.4 APLICACIÓN DEL ACV EN EL DISEÑO DE EDIFICIOS

Hay que considerar que la metodología ACV fue desarrollada principalmente para el diseño de productos de bajo impacto ambiental. En contraposición con los edificios, ya que estos constituyen un tipo de “producto” especial, considerando una mayor vida útil, modificaciones y/o transformaciones (afectando principalmente a su unidad funcional utilizada en el ACV), contiene gran cantidad de materiales y componentes diferentes, estrategias de diseño diferentes, singularidades del entorno urbano de emplazamiento, donde existen otras estructuras (complejidad en la asignación de impactos por efecto de esas estructuras y dificultad en el establecimiento de los límites del sistema, entre otras). Todo ello conlleva que la realización de un estudio completo ACV no sea un proceso tan sencillo comparado con otros productos de consumo.

Las directrices para el ACV simplificado de edificios, muestran que un problema general cuando se aplica la metodología del ACV en el proceso de diseño, es que en las fases preliminares las posibilidades para elegir son muchas, mientras que la disponibilidad de datos para realizar el estudio de ACV es reducida. Conforme va avanzando el proceso de diseño y se van acotando las opciones de diseño como consecuencia de los diversos condicionantes externos, mejora la disponibilidad de datos y, por tanto, la precisión de los resultados, si bien las posibilidades de utilizar éstos para la propuesta de diseños alternativos son cada vez menores, tal como se muestra en Ilustración 2-5. Las mismas directrices establecen que hay distintas formas de afrontar este problema, todas ellas relacionadas con buscar el modo de conseguir una mejor información sobre las opciones alternativas existentes al principio del proceso de diseño, e intentar disponer de unos primeros resultados estimativos anticipadamente, para lo cual es necesario disponer de las aplicaciones más adecuadas en cada momento (ENSLIC, 2012). Una posible solución es emplear una serie de herramientas con resultados ya calculados. Otra solución es analizar las instalaciones para crear fácilmente opciones alternativas y extraer los datos con nuevos programas informáticos (BIM - Building Information Modelling).

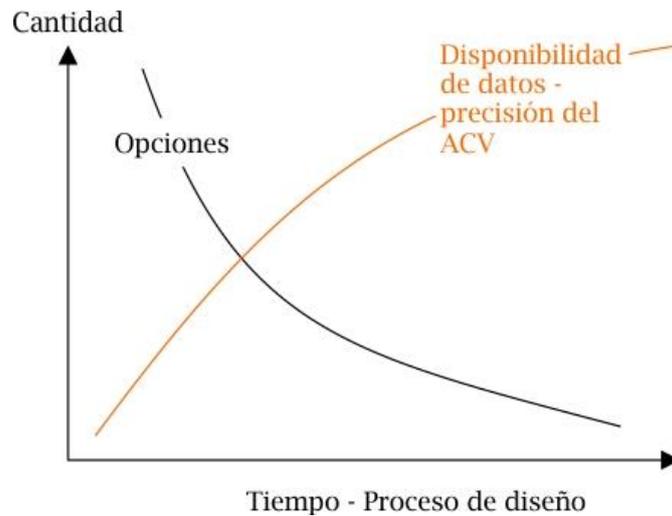


Ilustración 2-5: Relación entre opciones de diseño de un edificio frente a la disponibilidad de datos durante el proceso de diseño (CIRCE, 2010)

2.4.1 Etapas de del ciclo de vida de un edificio

Al realizar un ACV en un edificio, por definición, debe cubrirse todo el ciclo de vida del mismo. Esto significa que los factores genéricos relacionados con los impactos medioambientales, en las actividades de cada una de las etapas del ciclo de vida, son necesarios desde un principio. Según las recomendaciones del CEN 350, el sistema a analizar debe incluir las siguientes 4 etapas: producción, construcción, uso y disposición final.

Al respecto la NCh 3048/1: Sustentabilidad en la Construcción de Edificios, señala que siempre que sea posible los indicadores ambientales de los edificios debieran considerar el ciclo de vida del edificio. Es decir los indicadores que tratan cargas ambientales o los impactos ambientales, durante todo el ciclo de vida deben, como mínimo, mantener la distinción de las etapas del ciclo de vida de la fabricación, la construcción, el uso y el término de la vida. Si el impacto ambiental de un edificio es evaluado para una etapa diferente al ciclo de vida completo, como es el caso de esta investigación, en la cual se excluye la fase de desconstrucción de edificios, esta variación debe ser transparente y justificada.

El principio normativo EN 15978:2011, incluso considera fases del ciclo de vida de un edificio, que van más allá de los ya señalados, indicando que debieran considerarse aquellas actividades que pudieran generar información adicional más allá de los límites del sistema estudiado. Por ejemplo rehabilitaciones, reparaciones, u otra actividad que pudiera extender al vida útil del edificio, lo que queda representado en la Ilustración 2-6.

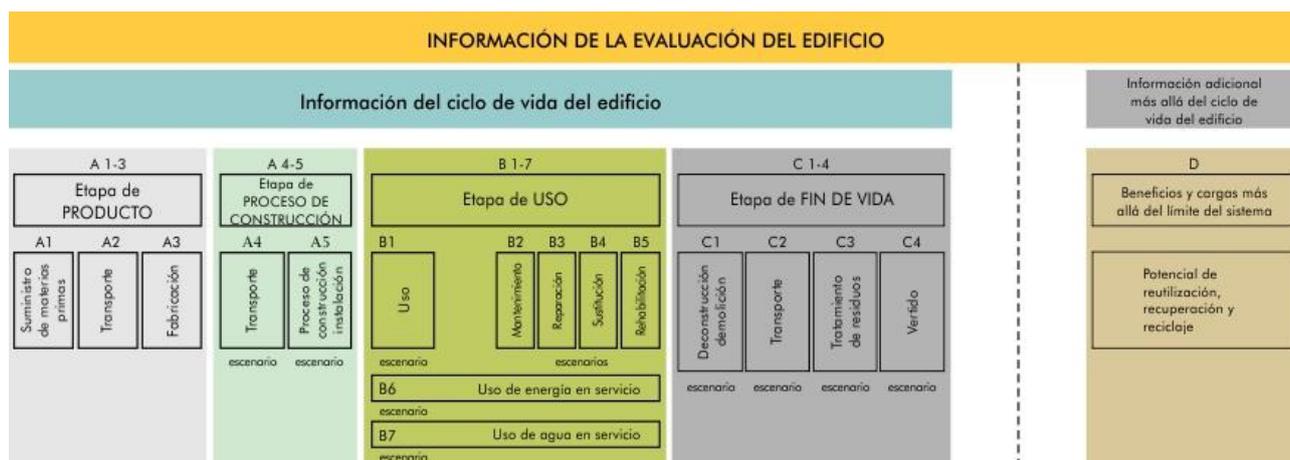


Ilustración 2-6: Relación entre casos de aplicación y etapa de ciclo de vida del edificio (EN 15978, 2011)

BASES DE DATOS PARA INVENTARIOS ACV

Para la realización de estudios de Análisis de Ciclo de Vida de elementos complejos, como lo son los componentes constructivos y los edificios, se pueden utilizar diferentes bases de datos. El ACV para este tipo de “producto”, implica la recolección de una gran cantidad de datos cuantitativos para cada una de las etapas del ciclo de vida. Son muchos los procesos a tener en cuenta, desde: la extracción de materias primas, el transporte, el consumo de energía primaria en etapas de fabricación de materiales, consumo energético durante la construcción y fase de usos del edificio, el vertido de residuos, la desconstrucción, etc. Según el alcance del estudio en cuestión, fácilmente se puede llegar a una cantidad importante de productos o procesos a inventariar y esto incrementa la dificultad y la necesidad de invertir recursos para poder completar el estudio de ACV.

Para avanzar en esta tarea, diferentes organizaciones internacionales y empresas han desarrollado bases de datos con información de inventario de ciclo de vida en las últimas décadas, principalmente en la Comunidad Europea y EE.UU.

Hay que considerar que dependiendo del producto analizado, datos con una cierta antigüedad o procedentes de una zona geográfica concreta pueden ser o no válidos.

Existen aplicaciones informáticas utilizadas para realizar estudios ACV, las cuales incorporan una o varias bases de datos para obtener un inventario ACV, teniendo incluso la posibilidad de editar las bases de datos incluidas y crear nuevas.

(Zabalza, 2010), recomienda que el inventario ACV incluya, en la medida de lo posible, datos personalizados para el proceso analizado. Pudiendo hacerse a partir de un trabajo de campo ajustándose a los principios normativos ACV, pudiendo

complementarse esta información con Declaraciones Ambientales de Productos (DAP), tema que será desarrollado en detalle en el siguiente punto.

En la actualidad el “*Life Cycle Inventory Programme*” que forma parte de la “Life Cycle Initiative) de la UNEP y la SETAC, buscan poner en marcha mecanismos que estimulen la mejora continua de la accesibilidad, transparencia y calidad de los datos de inventarios ACV. Al respecto a través de la UNEP, el año 2011 se lanzó la Guía Mundial de Principios Globales de Orientación para la Evaluación de Ciclo de Vida. Base de Datos (UNEP, 2011).

Dentro de la misma línea, la Comisión Europea (CE), promueve desde el año 2006, a través de la Plataforma Europea de ACV, el desarrollo de una base de datos para Europa “European Reference Life Cycle Database” (ELCD) con criterios de calidad, consistencia y aplicabilidad, que incluyen datos suministrados o aprobados por el sector industrial sobre materiales y procesos básicos, como el transporte, transformación energética y la gestión de residuos.

Otra iniciativa destacable es el Inventario del Ciclo de Vida de EE.UU *U.S: Life Inventory Database*, proyecto que, a partir del año 2001, trabaja en una base de datos pública que permite a los usuarios revisar objetivamente y comparar los resultados del análisis, que se basan en métodos de recolección y análisis de datos similares. Contiene módulos de datos on-line para cuantificar los flujos de energía y materiales que entran o salen del medio ambiente para los procesos unitarios más comunes. El centro de Investigación *NREL’s High -performance Buildings* y el Instituto Athena trabajan estrechamente con organismos del Estado y varios colaboradores industriales en el desarrollo y mantenimiento de la base de datos. El protocolo de datos se basa en la norma ISO/TS 14048:2002 y es compatible con el formato *EcoSpold* (Frischknetch R.,Rebitzer G.,2005), formato común para el intercambio de datos de inventario de ciclo de vida. Según establece dicho protocolo, los datos han sido revisados críticamente.

Otra importante base de datos, corresponde a la base de datos *Input-Output* de Estados Unidos, la cual se centra en 481 sectores de la economía de este país. La base de datos consta de una matriz de productos básicos del año 1998, complementada con otros bienes de capital. Los datos medioambientales han sido recopilados a partir de diversas fuentes de datos tales como: *Toxic Releases Inventory 98, Air Quality Planning and Standard, US EPA, US DOE, Bureau of Economic Analysis, Department of Commerce, National Center for Food and Agricultural Policy y World Resource Institute*.

Existen otras experiencias destacadas en el desarrollo de base de datos es el caso de la experiencia danesa *Input-Output* se basa en un conjunto de datos estadísticos (NAMEA) del año 1999 para Dinamarca y en otros sectores productivos (sector industria de los

alimentos) destaca, la base de datos LCA Food DK, la cual proporciona datos medioambientales de productos alimenticios de Dinamarca en toda la cadena alimentaria. Ambas bases de datos han sido desarrolladas por *2.0 LCA Consultants*.

La mayor base de datos elaborada y de reconocido prestigio es *ECOINVENT*, base de datos desarrollada por el centro suizo del mismo nombre, creada a partir de una iniciativa conjunta del Instituto suizo de investigación ETH y diversas Oficinas Federales de Suiza (*PSI, EPFL, EMPA, ART y PSI*). En su versión 2.0 de 2007 se incluyen 4.000 procesos unitarios y 4.000 procesos de sistema con una amplia documentación justificativa. Los inventarios engloban datos internacionales sobre el suministro de energía, extracción de recursos, distintos tipos de materiales, productos químicos, metales, procesos agrícolas, servicios de gestión de residuos y servicios de transporte (Zabalza, 2010).

Los inventarios han sido recogidos, armonizados y completados en el marco del proyecto *Ecoinvent 2000*, dando lugar a la base de datos europea más completa y de más calidad, incorporada en la mayoría de las herramientas de ACV. Si bien, los datos proceden principalmente de la industria suiza y alemana, son aplicables (con ciertas limitaciones) al resto de Europa y del mundo (tomando en cuenta las condiciones geográficas, de producción y ambientales).

Es importante destacar que aunque otras bases de datos (como IVAM, ETH-ESU o IDEMAT) incluyen algunos inventarios de materiales de construcción, la versión 2.0 de *ECOINVENT* contiene la información más amplia, detallada y actualizada sobre estos materiales. En concreto, contiene datos de inventarios de 11 materiales aglutinantes (mortero adhesivo, de cemento, ligero, cementos Portland, etc.), 6 tipos de ladrillo (común, de arcilla aligerada, refractario, sílico-calcáreo, etc.), 12 tipos de hormigón (normal, ligero con arcilla, con poliestireno, perlita o vermiculita expandida, especial para forjados, etc.), 16 tipos de revestimientos (baldosas y tejas cerámicas, tejas de hormigón, paneles de yeso, etc.), 4 tipos de puertas, 4 tipos de marcos de ventana etc.), 13 materiales aislantes tanto naturales como artificiales (fibra de celulosa, corcho, lana de vidrio, poliestireno, etc.), 3 tipos de pinturas, 7 materiales bituminosos, diversos tipos de áridos (arena, grava, gravilla, etc.), metales (acero, aluminio, cobre, etc.), materiales plásticos (polietileno, PVC, poliuretano, etc.), maderas (laminada, tablero de partículas, OSB, etc.), captadores solares térmicos y paneles fotovoltaicos de distintas tecnologías, entre otros. Lo que la convierte en una de las bases de datos más importante y pertinente para estudios ACV, asociados al sector construcción.

Además de *Ecoinvent* existen otras bases de datos, que cuentan con inventarios para la realización de ACV en el sector construcción, las cuales han sido identificadas por el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energético de Zaragoza, España:

- La base de datos canadiense ATHENA contiene inventarios de productos de la construcción, que incluye consumos energéticos y emisiones a la atmósfera asociadas a la construcción in-situ, mantenimiento, reparación y sustitución de elementos de un edificio a lo largo de su vida útil, así como su demolición y disposición final. A partir de los inventarios es posible modelar más de 1.200 soluciones constructivas diferentes para edificios.
- La base de datos INDUSTRY DATA contiene datos recogidos y publicados por diversas asociaciones de industrias de carácter internacional. En la versión de 2001, se engloban 74 tipos de procesos. Mayoritariamente se trata de datos “desde la cuna hasta la puerta”.
- IDEMAT 2001 es una base de datos que se centra en la producción de diversos materiales utilizados en ingeniería (metales, aleaciones, plásticos, madera), energía y transporte. Fue desarrollada por la Delft University of Technology de Holanda compilando diversas fuentes de datos. Engloba un total de 508 tipos de procesos en la versión de 2001.
- *BUWAL 250* es una base de datos desarrollada por el Instituto Suizo de Embalaje y basada parcialmente en la base de datos *ETH -ESU*. Incluye inventarios relativos a la producción de energía, transporte, residuos, y diversos procesos de producción de materiales, incluyendo materiales de embalaje como plásticos, cartón, papel, etc. La versión de 1997 engloba un total de 248 tipos de procesos.
- La base de datos *ETH -ESU*, elaborada por el Instituto de Investigación *ETH-ESU* de Zurich (Suiza), se centra en energía, transporte y tratamiento de residuos. En ella se abarca la producción e importación de combustibles, la generación y distribución de electricidad. En la versión completa de esta base de datos se incluye información relativa a un total de 1.200 tipos de procesos, aplicables principalmente a países del Oeste de Europa.
- La base de datos *GEMIS* engloba numerosos procesos energéticos (energía fósil, nuclear, renovables, etc.) y de transporte (de personas y mercancías), materiales (metales, minerales, alimentos, plásticos, etc.) así como procesos de reciclaje y de tratamiento de residuos. Los procesos energéticos están desglosados para todos los países de la UE-27, y otros países como Rusia, EE.UU., etc. Los procesos relacionados con los materiales se basan en datos de la UE, diferenciados regionalmente en cuanto a la extracción y el procesamiento. Los procesos de transporte se basan en datos de la UE y EE.UU.,

incluyendo procesos específicos para países en desarrollo. En la actualidad, *GEMIS* dispone cerca de 10.000 procesos, y alrededor de 1.000 productos.

- *FRANKLIN* es una base de datos norteamericana que incluye inventarios de energía, transporte y materiales de uso general como acero y plástico recopilados por *Franklin Associates Ltd.* (USA). Los datos están basados en diversas fuentes públicas y privadas de Estados Unidos, estadísticas, informes y conversaciones telefónicas con expertos. En la versión de 1996 se incluyen un total de 78 tipos de procesos.
- El Banco *BEDEC* es una base de datos de libre acceso on-line elaborada por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITEC). Contiene 375.000 elementos de edificación, urbanización, ingeniería civil, rehabilitación y restauración, seguridad y salud, ensayos de control y gastos indirectos, con precios de referencia para todas las provincias y Comunidades Autónomas de España, 5.000 pliegos de condiciones técnicas, la integración de los productos comerciales de 80 empresas y datos medioambientales, que incluyen residuos de obra y de embalaje, coste energético y emisión de CO₂.
- La base de datos *LCA_SOSTENIPRA* recopila datos de varios procesos productivos relacionados con la producción de biomasa (cultivos energéticos y biomasa forestal), el uso de la madera, el reciclaje (de la energía y los productos), el ecodiseño, la arquitectura sostenible y la química verde.

En el contexto nacional, la realidad es absolutamente diferente a lo anteriormente descrito, ya que en Chile a la fecha no existen iniciativas orientadas en ese sentido y no se cuenta con información documentada que permita generar bases de datos oficiales para el desarrollo de una ACV de edificios. En estricto rigor, estas iniciativas debieran venir lideradas desde el Estado, a través de los organismos sectoriales con pertinencia en las metas de sustentabilidad para el sector edificación.

Para suplir esta falta de información, y trabajar en ACV en edificación en Chile, lo recomendable sería trabajar con bases de datos reconocidas, con información de inventarios para el sector edificación, considerando las desviaciones por las condiciones geográficas, de producción y ambientales locales (Muñoz et al., 2012), como es el caso de las bases de datos ya descritas Ecoinvent, Bedec e Idemat.

A continuación se muestra en tabla 2-4 las principales bases de datos que pueden ser utilizadas en estudios ACV.

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

Tabla 2-4: Principales bases de datos para estudios ACV (Circe, 2012)

Base de datos (año)	Contenido	Entidad desarrolladora	Nº de procesos
ELCD core database v.II (2009)	Materiales, transformación de energía, transporte y gestión de residuos	Diversas entidades, asociaciones y organizaciones europeas < http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetCategories.vm >	316
U.S. Life-Cycle Inventory database v.1.6.0 (2008)	Flujos de energía y materiales para los procesos unitarios más comunes	National Renewable Energy Laboratory (Estados Unidos) < www.nrel.gov/lci/database >	355
US IO database (2003)	Datos Input-Output para Estados Unidos	CML, University of Leiden (Países Bajos) < www.leidenuniv.nl/interfac/cml >	481
Danish IO database (1999)	Datos Input-Output para Dinamarca	2.0 LCA Consultants (Dinamarca) < www.lca-net.com >	793
LCA Food DK (2003)	Datos de alimentación		671
Ecoinvent v1.2 (2005)	Gran variedad de procesos incluyendo energía, transporte, materiales de construcción, productos químicos, agricultura, gestión de residuos, etc. de Suiza y Alemania	Ecoinvent centre (Suiza) < www.ecoinvent.ch >	2.700
Ecoinvent v2.0 (2007)			4.000
IVAM LCA Data v.4.06 (2004)	Datos holandeses sobre materiales, transporte, energía y tratamiento de residuos	IVAM Environmental Research (Holanda) < www.ivam.uva.nl/index.php?id=164&L=1 >	1.350
Boustead Model v.5.0.12 (2006)	Amplia base de datos de materiales, producción de combustibles y energía	Boustead Consulting Limited (Reino Unido) < www.boustead-consulting.co.uk >	-
Athena database v.4 (2009)	Consumos energéticos y emisiones de productos de la construcción a lo largo de su vida útil	Athena Institute (Canadá) < www.athenasmi.org/tools/database/index.html >	1.200
Industry data (2001)	Diversos datos publicados por asociaciones industriales	Varios asociaciones internacionales, como la asociación PlasticsEurope < www.plasticseurope.org >	74
Idemat (2001)	Base de datos holandesa, compilada a partir de distintas fuentes	Delft Technical University (Países Bajos) < www.io.tudelft.nl >	508

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

Buwal 250 (1997)	Materiales generales, energía, transporte, residuos, etc	Swiss Institute of Packaging (Suiza) <www.umwelt-schweiz.ch/buwal/eng/index>	248
ETH-ESU (1996)	Amplia base de datos suiza centrada en energía, transporte y residuos	ETH-ESU (Suiza) <www.uns.ethz.ch>	1.200
GEMIS 4.5 (2009)	Base de datos gratuita que engloba procesos energéticos y de transporte, materiales, procesos de reciclaje y de tratamiento de residuos	Öko-Institut (Alemania) <www.gemis.de>	-
Franklin (1996)	Base de datos estadounidense sobre energía, transporte y materiales generales	Franklin Associates Ltd (EEUU) <www.fal.com>	78
Banco Bedec (2009)	Coste energético y emisión de CO ₂ de elementos de edificación, urbanización, ingeniería civil, etc	ITEC (España) <www.itec.es/nouBedec.e/presentaciobedec.aspx>	-
LCA_sostenipra v.1.0 (2007)	Producción de biomasa, uso de madera, reciclaje, arquitectura sostenible	SosteniPrA - Universitat Autònoma de Barcelona (España) <www.sostenipra.cat>	-

2.5 DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTOS (DAP) Y ECOETIQUETA

Según la normativa ISO 14025 una *Etiqueta ambiental; Ecoetiqueta; Declaración ambiental, corresponde a una Manifestación que indica los aspectos ambientales de un producto o servicio. Una etiqueta o una declaración ambiental puede tomar la forma de un enunciado, símbolo o gráfico en la etiqueta de un envase de un producto, en la documentación que acompaña el producto, en los boletines técnicos, y en los medios de publicidad o divulgación, entre otros*" (ISO 14020:2000).

Las *ecoetiquetas* de productos son un mecanismo de carácter voluntario, siendo su objetivo principal el informar al usuario que un determinado artículo tiene una incidencia ambiental adversa menor que otros productos de su misma categoría; es decir, que son ambientalmente preferibles a otros de función equivalente.

Al respecto (Aranda et al., 2006), sostiene que a través de los programas de ecoetiquetado, las empresas que desarrollan productos ambientalmente sostenibles, adquieren una ventaja competitiva usando el sello como un mecanismo para mantener y atraer a más clientes.

El principio normativo ISO, establece las directrices para el desarrollo y uso de las etiquetas y declaraciones medioambientales. La ISO 14020 establece en la actualidad tres tipos de ecoetiquetas ambientales: tipo I, tipo II y tipo III.

La ecoetiqueta tipo I indica un mejor comportamiento medioambiental del producto para unas determinadas características funcionales. Este tipo de ecoetiqueta, según establece la norma ISO 14024, debe ser certificada por una entidad externa, pero no requiere necesariamente la realización de un ACV del producto.

En el ámbito europeo, las ecoetiquetas tipo I más destacadas son: AENOR Medio Ambiente, la Etiqueta Ecológica de la Unión Europea, el Ángel Azul del Ministerio Federal de Medio Ambiente de Alemania, el Cisne Blanco de los países nórdicos, etc.

La ecoetiqueta tipo II consiste en una autodeclaración ambiental del producto por parte del fabricante según la norma ISO 14021, por lo que, en este caso, no requiere (aunque podría) ser certificada por una entidad externa, ni conlleva la realización de un estudio de ACV. Un ejemplo típico de ecoetiqueta tipo II es el bucle de Möbius, que indica que un producto es reciclable o contiene material reciclado.

La ecoetiqueta tipo III consiste en una Declaración Ambiental de Producto (DAP o *EPD-Environmental Product Declaration*) con verificación externa donde se comunican los resultados del ACV del producto. El desarrollo de DAP se ha convertido en un importante campo de aplicación del ACV. La declaración ofrece generalmente el resultado del ACV según distintos indicadores de categoría de impacto.

Los estándares UNE-ISO 14025:2007, ISO 21930:2007 y prEN15804:2008 normalizan este tipo de ecoetiqueta. En tabla 2-5, se muestran diferentes sistemas de ecoetiquetado tipo III a nivel mundial.

La norma ISO 14025 proporciona las orientaciones generales para el desarrollo de DAP y describe un procedimiento para establecer reglas de categoría de producto (*RCP* o *PCR - Product Category Rules*) que garantizan que las DAP obtenidas para una determinada categoría de productos sean comparables entre sí. Por tanto, las RCP se fijan, para cada categoría de productos, las normas y requisitos a considerar a la hora de realizar el ACV, como por ejemplo, el listado de sustancias químicas a declarar, el objetivo y alcance del ACV para la categoría de producto considerada, etc.

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

Tabla 2-5: Principales DAP para el sector edificación a nivel mundial (EnerBuiLCA, 2012)

Sistema/Programa DAP	Administrador	País	Logotipo y página web
Déclaration sur les caractéristiques écologiques de produits utilisés dans la construction	SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein)	Suiza	 http://www.sia.ch
BRE	BRE Environmental Profiles Certification	Reino Unido	 http://www.bre.co.uk
MRPT (Milieu Relevante Product Informatie)	NVTB (Nederlands Verbond Toelevering Bouw)	Holanda	MRPI® http://www.mrpi.nl
Umwelt-Deklarationen (EPD)	IBU (Institut Bauen und Umwelt e.V.)	Alemania	 Institut Bauen und Umwelt e.V. http://bau-umwelt.de
Programme de Déclaration Environnementale et Sanitaire pour les produits de construction (FDE&S)	AFNOR Groupe	Francia	 http://www.inies.fr
RT Environmental Declaration	The Building Information Foundation RTS	Finlandia	 http://www.rts.fi
EPD- Norge	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner	Noruega	 NÆRINGSLIVETS HOVEDORGANISASJON http://www.epd-norge.no
EPD® system	International EPD Consortium	Internacional	 THE GREEN YARDSTICK http://www.environdec.com
The Green Standard EPD System	The Green Standard	Estados Unidos	 http://www.thegreenstandard.org
DAPc - Declaración Ambiental de Productos en el sector de la Construcción	CAATEEB (Col·legi d'Aparelladors, Arquitectes Tècnics i Enginyers d'Edificació de Barcelona)	España	 http://es.csostenible.net/dapc/

Actualmente existen una cantidad importante de DAP y RCP disponibles a través de la Red Global de Declaraciones Ambientales de Producto de Tipo III (GEDnet), en la que participan representantes de Australia, China, Dinamarca, Alemania, Japón, Corea del Sur, Suecia y Taiwán; y también a través del sistema internacional *EPD*[®] creado originariamente en Suecia (SEMC, 2000). En este momento, el sistema *EPD*[®] cuenta con un total de 104 declaraciones medioambientales de productos de fabricantes de los siguientes países: Italia, Japón, Países Bajos, Polonia, Suecia, Suiza y España; de los que 33 están aún en proceso de verificación. Entre los productos incluidos en el sistema *EPD*[®] hay algunos materiales de construcción como los ladrillos, ventanas, tejas cerámicas y de hormigón, tableros de partículas, cemento, etc. Todas las DAPs del sistema *EPD*[®] pueden estar disponibles para consulta en su sitio web.

Del mismo modo en Noruega se está elaborando la base de datos “EcoProduct” en base a las DAP actualmente disponibles. Para promover el desarrollo de DAP, la entidad noruega EPD-Norge está recopilando datos del mix eléctrico nacional, del transporte y el embalaje aplicables al sector noruego de la construcción, a la vez que está desarrollando reglas de categoría de producto para materiales de la construcción. De este modo se espera disponer próximamente de una base de datos noruega de materiales de la construcción: “Norsk Byggtjeneste”.

Por otra parte, la Declaración Ambiental RT finlandesa (Häkkinen T., et al., 2006) está basada en una metodología nacional que sigue los principios de la normativa ISO, desarrollada mediante la colaboración de la Confederación Finlandesa de Industrias de la Construcción RT, la Fundación Building Information, el centro de investigación VTT y las empresas del sector de la construcción. La Declaración Ambiental RT es un documento de carácter voluntario y público que proporciona información comparable e imparcial sobre los impactos medioambientales de los materiales de construcción a usuarios, diseñadores y constructores.

En Reino Unido existe cada vez una mayor demanda de disponer de una información medioambiental fiable e independiente de los materiales de construcción. En este sentido, los perfiles ambientales promovidos por la entidad inglesa BRE proporcionan dicha información de manera estandarizada, identificando y evaluando los impactos medioambientales de los materiales de construcción durante su ciclo de vida.

Con respecto a la Declaración Ambiental de Producto (DAP) y Reglas por Categoría de Producto (PCR) para materiales de construcción para Chile, la realidad es muy disímil con respecto a lo hasta aquí descrito. Al no existir exigencias reglamentarias en el país, no se ha avanzado en el desarrollo de iniciativas orientadas a evidenciar ni medir el desempeño

ambiental de productos. A nivel nacional el tema es incipiente, destaca en forma positiva y marca un hito la iniciativa llevada adelante por el proyecto I+D: *Declaración Ambiental de Productos Certificados, ISO 14025, para el Cobre y productos de cobre (Proyecto: D09I1188)* liderado por la Centro de Investigación Minero y Metalúrgico (CIMM) y la Universidad de Concepción, que dentro de sus productos resultado, tiene la publicación de los PCR del cobre, los primeros sobre este material disponibles en el EPD system para realizar declaraciones ambientales de productos (DAP o EPD) (*Red Iberoamérica ACV, 2012*).

Existen otras iniciativas por parte de algunos centros de investigación académicos y privados, para trabajar en forma conjunta para iniciar la construcción de una metabase de datos (Ecobase) , que agrupe información referida a los aspectos ambientales de diferentes materiales de construcción , tal es el caso del centro de Investigación Idiem (Universidad de Chile), Fundación Chile (Privada) y la Cámara Chilena de la Construcción (CChC - Privado), con el proyecto denominado DAPCO, pero en estricto rigor aún no se conocen las metodologías que serán empleadas como tampoco los organismos externos que revisarán y validarán los resultados que pudieran obtenerse. De este modo, claro está que urge avanzar a nivel de Estado en el desarrollo de iniciativas desarrolladas dentro en un marco metodológico con estándar internacional, que permitan avanzar en esta materia, para mejorar la sustentabilidad de las edificaciones en Chile.

Puede señalarse entonces, que las Declaraciones Ambientales de Productos, permiten disponer de información más precisa de los impactos de un producto determinado que la obtenida a partir de las bases de datos descritas anteriormente (punto 2.4). No obstante, al día de hoy y debido a su carácter voluntario, sólo existen declaraciones para un reducido número de productos, por lo que en esta tesis, los estudios de ACV se realizarán utilizando datos de inventario adaptados, procedentes de bases de datos como Ecoinvent, IDEMAT Y BEDEC.

2.6 HERRAMIENTAS SOFTWARE ACV

Existe una amplia variedad de herramientas softwares disponibles para llevar a cabo un ACV, las cuales tienen, como componentes principales y prioritarios, la presencia y variedad de Bases de datos y de metodologías de Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV), señaladas en tabla 2-3.

Para el caso de las Bases de Datos, es recomendable que se encuentren bien definidas (grado de conocimiento de los datos disponibles en función del formato de los mismos) y con un período regular de actualización, debido a que los avances tecnológicos provocan la caducación prematura de la validez de los datos existentes.

Para el caso de las metodologías de EICV, es recomendable que la herramienta, en lo posible incorpore más de un método (por ejemplo; CML2 Baseline 2000, Ecoindicator 99, otro). De este modo, se podrían obtener resultados concretos a través de una metodología específica, como por ejemplo, el cálculo de la Huella de Carbono a través de la metodología IPCC3. Poder comparar los resultados que proporcionan diferentes metodologías para el cálculo del mismo impacto ambiental, como por ejemplo, ver la diferencia de “kg eq. CO₂” que dan como resultado, por un lado, aplicar la metodología IPCC y por otro, aplicar la metodología CML2001. La utilidad de esta opción radica, en que puede ocurrir que los resultados sean muy diferentes, aunque el impacto ambiental analizado sea el mismo, ya que las metodologías de EICV tienen sus propios alcances, factores de conversión y suposiciones. A través de esta comparación, se puede enriquecer la interpretación de los resultados y permite evaluar la idoneidad, o no, de una metodología u otra. Poder manejar resultados, tanto específicos como generales, como por ejemplo, obtener resultados sobre el “consumo de energía” y las “emisiones de kg eq. CO₂” por un lado, y por otro, la carga ambiental del sistema analizado en “puntos”.

En el caso de aplicaciones informáticas de ACV de uso general, el usuario tiene más libertad a la hora de seleccionar la hipótesis inicial. No obstante, ello requiere normalmente de un alto conocimiento de la metodología del ACV y un mayor tiempo de uso, ya que además, es preciso el uso de otras herramientas para cuantificar las masas de los distintos materiales de construcción utilizados, los consumos energéticos del edificio, entre otros. En el caso de herramientas adaptadas, las interfaces están más adaptadas al análisis de edificios, simplificando y agilizando la entrada de datos y la interpretación de los resultados obtenidos, e integrando los distintos cálculos requeridos en la misma aplicación. (CONAMA, 2012).

En tabla 2-6 se muestra un resumen de las principales herramientas informáticas para ACV disponibles, con licencia comercial como gratuitas.

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

Tabla 2-6: Herramientas Informáticas de uso general para ACV (Zabalza, 2010)

Programa	Compañía desarrolladora	Contacto	Comentarios
Boustead	Boustead Consulting (Reino Unido)	<www.boustead-consulting.co.uk>	Herramienta muy completa indicada para realizar estudios de ACV dentro de la industria química, plásticos, acero, etc.
Eco-it	Pré Consultants (Países Bajos)	<www.pre.nl>	Especialmente indicado para diseñadores de productos y envases. Utiliza el Ecoindicador 99. Su manejo es sencillo.
Ecopro	Sinum AG - EcoPerformance Systems (Suiza)	<www.sinum.com>	Permite la realización sencilla de ciclos de vida del producto. Utiliza la base de datos BUWAL.
Ecoscan	TNO Industrial Technology (Países Bajos)	<www.ind.tno.nl>	Puede utilizarse por encargados y técnicos responsables de implantación del ecodiseño de productos. Dispone de varias bases de datos y su manejo es sencillo.
Euklid	Fraunhofer-Institut (Alemania)	<www.ivv.fhg.de>	Programa orientado a estudios de ACV de productos industriales.
KCL Eco	Finnish Pulp and Paper Research Institute (Finlandia)	<www.kcl.fi/eco>	Presenta una interfaz gráfica muy completa. Posee los indicadores Ecoindicador 95 y DAIA 98 y destaca por sus datos de la industria papelera.
LCAit	Chalmers Industriteknik (Suecia)	<www.ekologik.cit.chalmers.se>	Su aplicación principal es en el sector de envases y productos de papel.
Miet	Universidad de Leiden (Países Bajos)	<www.leidenuniv.nl/cml/ssp/software>	Trabaja con MS Excel y se basa en datos ambientales de Estados Unidos. Gratuito.
GaBi	Universidad de Stuttgart (Alemania)	<www.gabi-software.com>	Además de las posibilidades convencionales de ACV, este programa permite asociar costes a los flujos y realizar análisis económicos.
Pems	Pira International (Reino Unido)	<www.piranet.com/pack/lca_software.htm>	Puede ser utilizado tanto por principiantes como por expertos en la materia. Su interfaz gráfica es flexible.
SimaPro	Pré Consultants (Países Bajos)	<www.pre.nl>	Permite realizar ACVs completos con múltiples métodos de evaluación de impactos. Presenta completas y variadas bases de datos. Adecuada para Departamentos de diseño o I+D.
Team	Ecobilan (Francia)	<www.ecobilian.com>	Herramienta muy completa, flexible y potente aunque algo más compleja de utilizar. Permite introducir información relativa a costes.
Wisard	Pricewaterhouse Coopers (Francia)	<www.pwcglobal.com>	Indicado para análisis del impacto económico y medioambiental de residuos sólidos municipales.
Umberto	Ifeu-Institut (Alemania)	<www.umberto.de>	Ofrece datos de gran calidad y resultados transparentes. Las librerías de datos son completas y flexibles. Indicado para realizar ecobalances empresariales.

2.6.1 Herramientas informáticas ACV, específicas para edificación

Para el trabajo de ACV en edificios, se han desarrollado herramientas específicas, las cuales facilitan el uso del ACV entre los agentes de la industria del sector de la construcción (especialmente arquitectos e ingenieros). Dichas aplicaciones disponen de un interfaz adaptado para el ACV en edificios, incluyendo algunas simplificaciones, lo

Capítulo 2/ Estado del arte: ACV como herramienta de sostenibilidad en la edificación

que facilita la entrada de datos e interpretación de resultados obtenidos y permite integrar los distintos cálculos requeridos en la misma aplicación.

En tabla 2-7 se muestra las herramientas que evalúan el impacto medioambiental de un edificio, con metodología ACV.

Tabla 2-7: Aplicaciones del ACV adaptadas para el uso de edificios (Proyecto Cíclope, 2011)

Programa	Compañía desarrolladora	Contacto	Comentarios
ECOEFFECT	KTH - Kungliga Tekniska högskolan, Högskolan i Gävle (Suecia)	<www.ecoeffect.se>	Evaluación de los impactos "externos" (uso de energía y materiales) e "internos" del edificio (ambiente interior y exterior) y evaluación de costes de inversión, operación y mantenimiento.
ECO-SOFT	IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (Austria)	<www.ibo.at/de/ecosoft.htm>	Cálculo de las necesidades de materiales, transporte y energía, así como emisiones al aire, vertidos al agua y suelo, y residuos asociados a la vida útil de un edificio. No válido para estudios de ACCV.
EQUER	Armines, IZUBA Energies (Francia)	<www.izuba.fr>	Simulación del ciclo de vida de un edificio, proporcionando diversos indicadores medioambientales del edificio. Posibilidad de entrada de datos en 2D y 3D y vinculación con la herramienta de simulación energética COMFIE.
GREENCALC+	Sureac Trust (Holanda)	<www.greencalc.com>	Evaluación del coste de prevenir los daños medioambientales de la construcción y uso de un edificio y obtención de un índice medioambiental global del edificio. El análisis abarca aspectos relacionados con la energía, materiales, agua y movilidad del edificio.
ECO-QUANTUM	IVAM-ER (Holanda)	<www.ivam.uva.nl>	Evaluación del comportamiento medioambiental de un edificio mediante el cálculo de 4 marcadores medioambientales (recursos, emisiones, energía y residuos) que se agregan para obtener un indicador medioambiental global del edificio.
LEGEP	LEGEP Software GmbH (Alemania)	<www.legep.de>	Cálculo de la demanda y costes energéticos asociados en la operación del edificio así como a la construcción, mantenimiento, rehabilitación y demolición del edificio.
BECOST	VTT (Finlandia)		Cálculo del perfil ambiental (en forma de emisiones, consumo de energía y de materias primas) de los materiales y soluciones constructivas del edificio, así como del coste de las soluciones constructivas seleccionadas y del edificio completo en el ciclo de vida.
ENVEST 2.0	BRE.Building Research Establishment (Reino Unido)	<envest2.bre.co.uk>	Evaluación de 12 categorías de impacto medioambiental y cálculo de la puntuación única del edificio considerando sus materiales constructivos, sistemas energéticos, etc. y cálculo de los costes del ciclo de vida.
ATHENA	Athena Sustainable Materials Institute (Canadá)	<www.athenasmi.ca>	Evaluación medioambiental comparativa de diversos diseños de edificios y los materiales y soluciones constructivas seleccionadas durante las fases de diseño preliminar del edificio.
BEES	NIST-National Institute of Standards and Technology (EE.UU.)	<www.bfrl.nist.gov/oae/software/bees.html>	Comparaciones entre materiales constructivos basadas en ACV y ACCV que se combinan en una sola puntuación final.
LTE-OGIP	t.h.e. Software GmbH (Alemania)	<http://www-the-software.de/ogip/einfuehrung.html>	Evaluación de los impactos medioambientales en la construcción y operación de un edificio, y cálculo de los costes y el consumo de energía en su funcionamiento a partir de la definición de sus elementos constructivos.

2.7 SISTEMAS DE CERTIFICACIONES DE SUSTENTABILIDAD DE EDIFICIOS

No es objetivo de esta tesis profundizar en el análisis de los diferentes sistemas de certificación existentes que evalúan la sostenibilidad de los edificios, pero dada la importancia que implica el uso de las diferentes metodologías en el impacto del resultado, esto es, llegar a calificar de más o menos sustentable una edificación, es que se hace necesario reflexionar, al menos, en los criterios utilizados por aquellos Sistemas de Certificación más relevantes a nivel mundial.

Desde el año 2000, el número de métodos para la evaluación ambiental de edificios se ha multiplicado considerablemente. BREEAM (Primer sistema en 1990) sistema etiquetado edificios, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) mayor implantación en el mercado de grandes edificios. Hoy existen muchos modelos con metodología desarrollada por el GBC (Green Building Challenge), actualmente llamada iSBE (International Initiative for a Sustainable Built Environment) (Macías and García, 2010). En términos generales, sobre las metodologías podría señalarse:

Existen algunas herramientas basadas en la ponderación de criterios-indicadores para el análisis completo del ciclo de vida (ACV), tales como: SBTool, la cual ha tenido notable influencia sobre la herramienta de certificación Verde (de origen Español).

Otras herramientas, basadas en la valoración de actuaciones, que se le establecen créditos a los que se le asocia un número de puntos, en función de la importancia en los impactos asociados al crédito, tales como: LEED 2009 (USA), BREEAM (GB).

También están aquellas herramientas basadas en la valoración de impactos, utilizando “eco puntos” (el número de eco puntos conseguidos, sirve como elemento de comparación y mejora ambiental de diseño) como ENVEST (BRE-UK) o utilizando el concepto de eco eficiencia CASBEE (Japón).

Desde el punto de vista del enfoque ACV, destaca la herramienta Verde, basada en el cálculo de la reducción de impactos a partir de la evaluación de criterios en el análisis completo del ciclo de vida (ACV). Lo particular de esta herramienta, es que permite evaluar sostenibilidad de un edificio de una forma bastante objetiva, en función de cuantificación de impactos, con alto grado de flexibilización a diferentes realidades locales. Es extrapolable y sitio-específica, recoge las últimas normativas con enfoque ACV e incorpora estos desarrollos normativos para definir valores de referencia en cada uno de los criterios analizados, también incorpora las categorías de impacto a analizar y los métodos de cálculo de los indicadores para la valoración de los impactos.

Según el Grupo de Investigación ABIO de la Universidad Técnica de Madrid, de los principales Sistemas Internacionales de Certificación señalados se tiene:

Leed 2009 (USA):

Evalúa 13 categorías de impacto

Analiza 69 créditos con asignación de hasta 100 puntos

Organismo responsable USGBC

BREEAM (UK):

Evalúa 20 categorías de impacto

Analiza 102 Créditos con asignación de hasta 100 puntos

Organismo responsable: BRE

HQE (Francia):

Evalúa 7 categorías de impacto

Analiza 14 criterios y más de 20 subcriterios

Organismo responsable: CSTB - Qualitel

Verde (España):

Evalúa 12 categorías de impacto

Analiza 42 criterios (834 en Residencial - 36 oficinas)

Organismo responsable: GBC - España

La mayoría de los sistemas de evaluación, mezclan dos tipos diferentes de información: las medidas incorporadas al proyecto y los impactos (normalmente indirectos) asociados a las medidas. Ello conduce a estos sistemas, a un intento de resolver dos funciones en una: guiar a los proyectistas y diseñar edificios de alto rendimiento, pero no necesariamente evaluar la sostenibilidad de éste.

En esta línea, lo que faltaría es una evaluación, más bien cuantitativa, con enfoque ACV, que se oriente no solo a la identificación y caracterización de impactos ambientales del edificio, sino que evalúe la reducción de estos. Del mismo modo, considerar un pertinente gradualismo de implementación, dada por las condiciones y realidad nacional.

2.7.1 Relación entre las DAP y Sistemas de Certificación de sustentabilidad de edificios

Teniendo en cuenta que las Declaraciones Ambientales de Producto de la construcción aportan información ambiental para facilitar la decisión de los proyectistas en cuanto

al uso de los materiales en el edificio, tiene sentido que se vinculen a la certificación ambiental o sustentabilidad de edificios.

Actualmente ya se encuentran relaciones entre la generación de DAP y los programas de certificación de edificios. El primer caso lo encontramos en España, donde el Sistema DAPc® construcción y el Green Building Council de España, reconocen la necesaria coexistencia de la certificación VERDE con la información ambiental de productos que facilitan las declaraciones. Así, en el sistema Verde se utilizan las DAP según el tipo de herramienta. Para edificios residenciales y de oficinas, se pide un estudio de los impactos de los materiales, en el cual puede hacerse uso de una DAP, tanto para aportar información sobre la energía utilizada en el proceso de producción (del material), como para contabilizar el CO₂ emitido en el mismo proceso. Por otro lado, para edificación - equipamientos nuevos, se dan puntos en un criterio específico, que valora el uso de materiales con DAP.

También, en el sistema BREEAM, cuando se dispone de una DAP verificada por un tercero, que cubre parte o todo el ciclo de vida de un material/producto del edificio estudiado, ésta puede ser usada para incrementar la contribución de ese elemento a la matriz de rendimiento del edificio (*Mat 01 Life cycle impacts*).

Por otro lado, el sistema LEED en su versión v4 (actualización año 2012), queriendo dar una visión mucho más completa de los materiales y productos utilizados en el edificio, permite incluir información que facilite tomar decisiones que representen un mayor beneficio ambiental. Es por esto, que en su sistema de clasificación se consideran los productos de la construcción que tengan esta información ambiental, otorgando créditos independientes (1-2) dentro de la categoría de materiales y recursos (Materials and Resources-MR). Su principal objetivo, otorgando esté máximo de 2 créditos adicionales, es incentivar el uso de productos y materiales cuya información, durante todo su ciclo de vida, esté disponible y suponga menores impactos ambientales, económicos y sociales. De esta manera, el sistema LEED empieza a integrar el concepto de ACV en su certificación, comparativamente a la versión anterior (año 2009).

Otro ejemplo de integración de DAP y ACV en programas de certificación de edificios, es el programa DGNB. Este sistema de certificación, refleja el uso de productos/materiales de la construcción, descritos en las guías de Declaraciones Ambientales del IBU (*Institut Bauen und Umwelt e.V.*), por medio de un navegador on line (de acceso gratuito) que permite a los proyectistas buscar productos que quieran usar para su edificio, obteniendo datos relevantes desde el punto de vista técnico, económico hasta aspectos relacionados con la salud.

Este enfoque, que ahora se encuentra basado en la norma EN15804, consiste en puntuar el análisis riguroso del ciclo de vida del edificio y de los materiales y productos incorporados en el mismo, para entender la importancia en la contribución de los impactos de cada producto usado.

Finalmente, la marca francesa HQE francesa (Association Reconue d'utilité Publique) desde hace años ofrece un listado de productos de la construcción con sus principales características, pero desde el año 2012 y gracias a la base de datos de INIES, ahora estos productos contienen información relevante sobre su comportamiento ambiental, especialmente aquellos que cuentan con DAP del sistema FDE&S, permitiendo de esta manera, la selección de productos que tengan un menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida.

Estos ejemplos muestran la tendencia de integrar el ACV y las DAP en los programas de certificación de edificios. Se reconoce que en Europa, su incorporación es todavía incipiente y el alcance de la integración difiere de un programa a otro, pero se evidencia la articulación entre todas las acciones orientadas al mejoramiento del desempeño ambiental de la edificaciones y el efecto de la incorporación del enfoque ACV transversalmente en estas acciones.

La realidad nacional, tal como se ha venido señalando, se encuentra lejana a este tipo de avances en materia de sustentabilidad ambiental (Ej. Certificaciones ambientales de edificaciones con enfoque ACV, declaraciones ambientales de producto, etc). En el entendido que esto será un proceso gradual, en el cual se deberán ir incorporando exigencias y normativas reglamentarias de carácter global a un sector tan relevante en la economía y sustentabilidad nacional, como lo es el sector construcción. Hay que establecer que estas acciones, en el caso de Chile, se están originando a partir del impacto ambiental que generan las edificaciones desde el punto de vista del consumo energético y su impacto en las emisiones de GEI, que son las principales variables estudiadas en esta tesis.

2.8 INICIATIVAS INTERNACIONALES DE ACV EN EDIFICACION

A pesar de las evidenciadas ventajas que tiene la incorporación de la herramienta ACV en la mejora del desempeño ambiental en edificios, las iniciativas en el uso del ACV, que hoy existen en el sector de la edificación a nivel internacional (principalmente en la UE) son más bien incipientes. Mayoritariamente los estudios ACV a nivel de edificios, son llevados adelante por centros de I+D y universidades, así también por algunas consultoras especializadas. Del mismo modo sucede a nivel producto, el ACV es utilizado muy

ocasionalmente (aunque de manera creciente), por las empresas fabricantes de materiales de construcción en la elaboración de sus declaraciones ambientales de producto y otras informaciones (CONAMA, 2012).

A partir del análisis realizado en el Congreso Nacional de Medio Ambiente Continuación en Zaragoza España el año 2012, se entrega una recopilación de las principales conclusiones de las iniciativas sobre ACV en edificios, basadas en la descripción de las herramientas disponibles en los países para los distintos tipos de usuarios.

2.8.1 Experiencia Europea y Norteamericana

2.8.1.1 Proyecto REGENER

El objetivo del proyecto europeo “REGENER-European Method for the Environmental Assessment of Buildings” (1995-1997), desarrollado dentro del programa APAS de la DGXII de la Comisión Europea, fue establecer una metodología a nivel europeo para la evaluación del impacto medioambiental de los edificios, basada en el ACV (Peuportier B., 2001).

2.8.1.2 International Energy Agency-Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme-Annex 31, (1996-1999)

El objetivo del proyecto “Energy related environmental impact of buildings” de la Agencia Internacional de la Energía fue describir el impacto medioambiental de los edificios en términos energéticos. Se recopilaron y presentaron las diversas herramientas e instrumentos de ACV para ayudar a la toma de decisiones por parte de los agentes involucrados en todos los procesos relacionados con la construcción.

Así mismo, se hizo una recopilación de las bases de datos disponibles a nivel internacional, mediante una encuesta a diversos profesionales y expertos en ACV.

Se identificaron todos los aspectos prácticos relevantes en la construcción que podrían abordarse desde una perspectiva de ACV, como por ejemplo: el diseño geométrico y estructural de los edificios, la elección del nivel de aislamiento, la selección de los materiales de construcción, las fuentes y los sistemas energéticos, la durabilidad de los edificios, la gestión del mantenimiento y rehabilitación, el comportamiento de los usuarios, la planificación del fin de vida de los edificios, las posibilidades de reciclaje y/o reutilización, etc.

2.8.1.3 NAHB Workshop

En Abril de 2001, un grupo de expertos invitados por la “National Association of Home Builders” (NAHB) se reunieron para debatir sobre la aplicabilidad y utilidad de las herramientas de ACV en el sector de la construcción de viviendas de Estados Unidos. El informe final (Dooley R., et al., 2001) hace una revisión crítica del ACV y presenta sugerencias para mejorar su utilidad y hacerlo más atractivo entre los agentes del sector, entre las que se incluyen, una mejor explicación de las hipótesis consideradas en las herramientas de ACV y una simplificación en los interfaces de salida de datos con objeto de lograr una mejor interpretación de los resultados obtenidos por parte de los usuarios.

2.8.1.4 Estudio sobre herramientas de ACV y Declaraciones Ambientales de Producto

En 2002 la consultora *Price Waterhouse Coopers* realizó un estudio (Van Halen C., et al., 2002) para la Dirección General de Empresa de la Comisión Europea donde se analizaron las herramientas existentes basadas en ACV para la evaluación medioambiental del sector de la construcción de los estados miembros y Noruega, a nivel de producto y a nivel de edificio, centrándose especialmente, en los esquemas de Declaración Ambiental de Producto (DAP). En el proyecto se intentó involucrar a las diversas partes interesadas: empresas de materiales de construcción, arquitectos, empresas constructoras, organismos de normalización, institutos y centros de investigación de la construcción, legisladores, etc., organizándose dos talleres de expertos en Bruselas y diversas entrevistas a expertos. Se constató la dificultad de involucrar en el proyecto a los usuarios finales del ACV (arquitectos e ingenieros principalmente) y su escasa participación en el Comité Europeo de Normalización y los procedimientos nacionales de desarrollo de las DAP.

2.8.1.5 Life Cycle Initiative - Grupo de trabajo de ACV en construcción y edificación

El *UNEP (United Nations Environment Program)* y la *SETAC* promovieron la puesta en marcha en 2002 de un consorcio internacional de ciclo de vida, conocido como “*Life Cycle Initiative*” con objeto de fomentar la puesta en práctica a nivel mundial del concepto de ciclo de vida.

Tras la publicación de un informe sobre el estado del arte del ACV en la construcción (Kotaji S., et al., 2003), se estableció un grupo de trabajo en esta temática. En dicho informe se describen los principales requisitos de los estudios de ACV en la construcción y edificación, como por ejemplo, la selección de una unidad funcional adecuada, que refleje los requisitos de funcionamiento del edificio o la construcción analizada.

Asimismo se presentan las directrices para la consideración de escenarios futuros en las distintas etapas del ciclo de vida y se remarcan las dificultades asociadas a la asignación de cargas y establecimiento de los límites del sistema, debido a la complejidad y a la longevidad de los edificios y construcciones, proponiendo algunas soluciones al respecto.

2.8.1.6 Red Temática Europea PRESCO

PRESCO es la Red Temática Europea de recomendaciones prácticas para la construcción sostenible en la que participan 16 países europeos. Por parte de España participa la consultora Randa Group. La visión de PRESCO es que en el futuro las herramientas para el ecodiseño, basadas en la metodología de ACV, se utilizarán en el proceso de diseño de los edificios y construcciones, a fin de hacerlos más sostenibles. Por lo tanto, desde esta Red se pretende ayudar al desarrollo de herramientas de ecodiseño basadas en ACV.

En 2005 se publicó un informe (Peuportier B., Putzeys K., 2005) que describe diversas herramientas nacionales existentes y presenta los resultados comparativos al aplicar dichas herramientas en 5 edificios diferentes. El análisis de los edificios se realizó a tres niveles: geometría simple, edificio completo, y edificio completo con diseño mejorado según las recomendaciones de PRESCO.

El informe concluye que existe un enorme potencial de mejora en los edificios europeos. En este sentido, la aplicación de las diversas medidas propuestas, basadas en la mejora de los aislamientos en cubiertas y fachadas así como la reducción de las tasas de ventilación, produciría una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en los edificios analizados del 30-50% en los próximos 40 años, que supondría una reducción anual de 360 MtCO₂-Eq/año.

2.8.1.7 Proyecto ENSLIC

El objetivo del proyecto *“ENSLIC - Energy Saving through promotion of Life Cycle analysis in building”* (2007-2010) es desarrollar estudios de ACV en edificios de distintos países europeos, a la vez que se promueve y difunde la metodología del ACV proporcionando unas directrices simplificadas (Scarpellini S., et al., 2009; Malmqvist T. et al, 2010) a los agentes del sector de la construcción, principalmente diseñadores, arquitectos e ingenieros. El proyecto está cofinanciado por la Comisión Europea a través del *“Intelligent Energy Programme”* y está coordinado por Fundación CIRCE, en el proyecto participan ocho socios de distintos países europeos: Enerland, Noruega, Francia, Alemania, Suecia, Austria, Hungría, y Bélgica.

2.8.1.8 Proyecto LoRe-LCA

El objetivo del proyecto *“LoRe LCA - Low Resource consumption buildings and constructions by use of LCA in design and decision making”* (2009-2012) es promover y facilitar el uso de nuevas y mejores tecnologías en edificios e infraestructuras, que permitan reducir el impacto ambiental del ciclo de vida asociado al uso de los recursos naturales no renovables (agua, materias primas, energía y suelo) y a la generación de residuos. Como resultado del proyecto se pretende establecer recomendaciones para la mejora del marco normativo europeo aplicable al sector de la construcción.

En el proyecto se desarrollan actuaciones coordinadas dirigidas al asesoramiento tecnológico en la construcción y mantenimiento de edificios mediante el uso del ACV y otros indicadores de ecoeficiencia en el sector europeo de la construcción.

2.8.1.9 COST Action C25

COST (European Cooperation in Science and Technology) constituye uno de los instrumentos europeos de apoyo a la cooperación entre científicos e investigadores de toda Europa. COST, fundado en 1971, está constituido en la actualidad por más de 200 Acciones, que reúnen a científicos de los Estados miembros de Europa, instituciones participantes pertenecientes a Estados no miembros de COST y organizaciones no gubernamentales.

El principal objetivo de la Acción *COST C25 “Sustainability of Constructions: Integrated Approach to Life-time Structural Engineering”* (2006-2010) es promover el desarrollo de una construcción sostenible en Europa a través de la recopilación y el análisis conjunto de los resultados científicos, haciendo especial énfasis en la integración de los métodos de evaluación de impacto medioambiental, la aplicación de nuevos materiales y tecnologías, la monitorización del comportamiento en el ciclo de vida y la recopilación de bases de datos de ACV y ACCV (Análisis Costo Ciclo de Vida).

2.8.1.10 Proyecto CÍCLOPE (2009-2010)

Cíclope constituye un Proyecto Singular Estratégico, Programa Nacional de Cooperación Público-Privada, dentro de la Línea Instrumental de Articulación e Internacionalización del Sistema, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. Financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y cofinanciado con Fondos FEDER. Agrupó importantes centros de investigación de España; CIDEMCO, ESCi, iMAT, IAT y a socios estratégicos correspondientes a empresas del sector construcción (principalmente industriales).

Los objetivos que planteó este proyecto se basaron principalmente en el Análisis del Impacto Ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida en términos cuantificables de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, a partir del uso de la metodología ACV.

Los resultados obtenidos en este proyecto no cumplieron con todas expectativas planteadas inicialmente, en términos que no fue posible hacer público los datos obtenidos a través de una metabase que permitiera el uso de una herramienta de libre disposición.

2.8.1.11 Proyecto SOFIA's (España)

El proyecto SOFIAS, actualmente en desarrollo es financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad por un período de 3 años (2011-2014), tiene como objetivo principal el desarrollo de un software para asistir a los profesionales del sector de la construcción en el diseño ecológico de nuevos edificios y la rehabilitación de los ya existentes, de manera que se reduzca su consumo total de energía y sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero, consiguiendo con ello que tengan un menor impacto medioambiental a lo largo de todo su ciclo de vida.

Como resultado proyecto se espera generar una plataforma software, disponible online y fácil de utilizar y que dará al usuario información rigurosa y confiable sobre los impactos ambientales de sus proyectos arquitectónicos a lo largo de su ciclo de vida. Se busca que el usuario pueda utilizar esta información para optimizar sus proyectos constructivos, así como para comunicar los resultados a sus clientes, la Administración o el público general.

2.8.2 Iniciativas Latinoamericanas

A nivel latinoamericano el desarrollo e iniciativas de aplicación del Análisis del Ciclo de Vida en la edificación, han sido principalmente en el ámbito científico, específicamente en centros de investigación y universidades. Sin embargo en el ámbito profesional no hay un impacto concreto al respecto.

Tal como se ha señalado en punto 2.8.1.5 la iniciativa "Life Cycle Initiative" de la UNEP y SETAC, busca a través del Programa Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) desarrollar y fortalecer capacidades en la región, para la gestión de recursos naturales y avanzar hacia un crecimiento sostenido, incluyendo a la comunidad científica y administraciones gubernamentales.

Como resultado de estas importantes acciones, algunos países latinoamericanos se han ido organizando a través de redes de trabajo con el uso de la herramienta Análisis de ciclo de vida, congregando a diversos actores sociales y organizaciones;

A saber, a la fecha existen organizadamente a través de la Red Iberoamericana de Ciclo de vida, entre ellos; universidades, centros tecnológicos, entes de normalización, empresas, asociaciones profesionales, entes gubernamentales, profesionales individuales y estudiantes de los países de Iberoamérica que comparten una visión y objetivos centrados en el pensamiento de ciclo de vida (life cycle thinking).

Para Latinoamérica las redes de ACV asociadas son: Asociación Brasileña de Ciclo de Vida, Red Colombiana de Ciclo de Vida, Red Mexicana de Ciclo de Vida, Red Peruana de Ciclo de Vida, Red Argentina de Huella Hídrica y la recientemente fundada Red Chilena de Análisis de Ciclo de Vida.

A continuación se entrega un resumen de los trabajos, avances e iniciativas más relevantes realizadas a nivel Latinoamericano en el uso del ACV en el sector edificación y/o construcción, donde destacan principalmente México, Argentina e incipientemente Chile.

2.8.2.1 México

En México el sector de la construcción ha realizado avances en la aplicación y desarrollo del ACV. Los primeros esfuerzos se han centrado en evaluar los materiales utilizados en la construcción y recopilación de datos representativos para dicho país. El tema se ha incorporado al trabajo de investigación y de postgrado de diversas universidades y la Comisión Nacional de vivienda junto con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ha impulsado proyectos para seguir avanzando en el tema.

Dentro de los principales estudios, se tiene: Impacto medioambiental de los materiales de construcción (Escalante, 2013), Análisis de ciclo de vida y aspectos medioambientales en el diseño estructural (Valdez, 2013), Análisis de ciclo de vida de los materiales de construcción en la edificación progresiva de la vivienda popular en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Argüello et al, 2013), Modelo del metabolismo energético, a partir del consumo eléctrico de la vivienda económica de Mexicali (Calderón, 2013), Análisis de ciclo de vida de la vivienda social en ciudades costeras (Domínguez, 2013), Análisis del ciclo de vida de viviendas de interés social en México (Chargoy, 2013), Análisis de Ciclo de Vida como herramienta para la evaluación de estrategias de sustentabilidad urbana. El caso de la sustentabilidad urbana en la ciudad de Mérida. (Cerón et al, 2013).

2.8.2.2 Argentina

En Argentina distintos grupo de investigación, están trabajando sobre temas relacionados con la sustentabilidad ambiental de los edificios desde hace algunos años, obteniendo importantes resultados tanto para materiales de construcción, componentes y estrategias de diseño edilicios (muros aislados térmicamente, cubiertas livianas o pesadas, uso de vidrios simple o triples, iluminación natural o artificial, entre otros). Sin embargo la mayoría de los estudios restringen el alcance de la investigación a la fase de uso, y no incorporan el concepto ni el método de Análisis de Ciclo de Vida.

La mayoría de los estudios de este tipo han sido en Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (INCIHUSA -CONICET). Dentro de los principales trabajos se tienen: Estudio de aislantes térmicos en muros de escuelas rurales en regiones andinas (Arena and Rosa, 1999), Uso del Análisis del Ciclo de Vida en edificios. Uso del Análisis del Ciclo de Vida. Aplicación para el caso de tecnologías de uso solar pasivo en Mendoza - Argentina (Arena, 1999), Evaluación ambiental comparativa de materiales mampuestos aplicados en muros de viviendas en regiones áridas andinas (Arena and Mitchell, 2001), Impacto energético ambiental de la iluminación artificial de aulas en escuelas de uso diurno. Potenciales beneficios de iluminar con luz natural (Pattini and Arena, 2004), Evaluación energética ambiental de la fabricación y uso de ventanas de doble vidrio con capa intermedia de distintos gases inertes de baja conductividad en Mendoza- Argentina (Arena, 2005).

2.8.2.3 Chile

Tal como se ha venido señalando en el desarrollo de la presente tesis, la realidad nacional con respecto al uso del enfoque ACV para mejorar el desempeño ambiental del sector construcción, ha tenido un desarrollo más lento con una alta inercia, comparado con otros sectores productivos (minería, energético, alimentos, etc.).

No obstante existen algunas iniciativas que vienen a fortalecer el trabajo desarrollado en el área de eficiencia energética, las cuales a través de proyecto I + D + i, han permitido ir incorporando paulatinamente el uso de la herramienta ACV en pro de la mejora técnico ambiental de las edificaciones.

En esa línea una de las importantes iniciativas corresponde al recientemente concluido, Proyecto FONDEF D09I1162: "*Diseño y aplicación de un sistema de aseguramiento de calidad para obras de construcción habitacional en Chile basado en criterios y estándares de desempeño (performance)*". Desarrollado entre los años 2011 y 2013.

Este proyecto se llevó a cabo mediante convenio suscrito entre la Comisión Nacional de investigación Científica y Tecnológica CONICYT y las Universidades Católica de Chile y del Biobío.

El principal objetivo es desarrollar un sistema de aseguramiento y certificación de calidad de viviendas, basado en el control de sus desempeños u objetivos de habitabilidad, seguridad, durabilidad y sustentabilidad ambiental. A través de la creación de un Sistema destinado a fomentar la innovación, la eficiencia de los procesos constructivos, la competitividad y, como consecuencia, la calidad e incorporar conceptos básicos de sustentabilidad para la vivienda construida en Chile.

Dentro de los principales resultados, para el módulo de Sustentabilidad ambiental, se llegaron a obtener valores de criterio de desempeño tanto de energía contenida (MJ/m²), como así mismo de la huella de carbono por unidad de superficie (Kg CO₂/m²), para la envolvente térmica de viviendas pilotos. Los cuales fueron comparados con valores actuales y óptimos de centros de investigación de sostenibilidad europeos. Dando cuenta por una parte del orden de magnitud de los resultados logrados y por otra, la importancia de incorporar el uso de la herramienta ACV en la edificación en la medición de desempeños de sustentabilidad ambiental.

Los resultados obtenidos forman parte de la presente tesis doctoral y que serán discutidos en detalle en el capítulo seis.

2.9 CONCLUSIONES

A partir de los antecedentes revisados en el estado del arte, se advierte que hoy día el sector de la edificación a nivel global y local cuenta con una excelente oportunidad para mejorar el desempeño ambiental de edificios. La aplicación de la herramienta ACV en edificios conlleva innumerable oportunidades para el sector de la construcción: facilita la toma de decisiones por parte de las empresas vinculadas al sector, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales con vistas a la planificación de estrategias de ecoeficiencia en la edificación, la identificación de oportunidades para disminuir los impactos medioambientales en el sector de la construcción, considerando todo el ciclo de vida de los edificios, el establecimiento de prioridades para el eco-diseño o la eco-rehabilitación de edificios, la selección adecuada de proveedores de materiales de construcción y equipos energéticos, el establecimiento de estrategias y políticas de Estado para gestionar los residuos de la construcción y el transporte de los materiales, la definición de nuevos programas I+D+i, la definición de normativas de ecoeficiencia y la

implementación de políticas de mejoramiento en el desempeño ambiental de la construcción en general.

La herramienta ACV, permite evaluar la influencia que tienen las principales decisiones adoptadas en la fase de diseño del edificio sobre el mantenimiento, así como los impactos medioambientales reales del edificio, considerando todo su ciclo de vida. De este modo, por ejemplo, se podría evaluar el potencial de ahorro energético y la disminución de emisiones asociadas a las diferentes estrategias de diseño y construcción utilizadas, que para esta tesis, corresponden a las principales variables de estudio.

Al considerar la metodología ACV, *se distingue la poca objetividad de algunos Sistemas de Certificación Medioambiental de edificios, en términos* que pueden entregar un sello óptimo de sustentabilidad, evaluando no solo en forma cualitativa el edificio, sino que además, realizando una evaluación a sólo una fase del ciclo de vida de éste. En el mismo sentido, mencionar que la metodología que sustenta el sistema de certificación debería integrar las condiciones locales y, que sobre todo, las consecuencias de los diferentes criterios deban ser evaluadas cuantitativamente. Para ello, los diferentes sistemas deberían demandar la cuantificación de los impactos que generan los edificios a lo largo de su ciclo de vida (directos e indirectos).

A nivel mundial y local, podría señalarse que una de las principales barreras para el uso extendido del ACV en la edificación, es la falta de exigencias legislativas y de incentivos, que conlleva una baja demanda para la realización de este tipo de estudios. Por ejemplo, según indica (Zabalza, 2010), en la actualidad no existe un vínculo entre el ACV y los procedimientos de certificación energética que se han venido desarrollando durante los últimos años, (para el caso chileno sucede exactamente lo mismo). De este modo, puede darse la contradicción de obtener mejor calificación energética, a pesar de inducir un mayor consumo de energía primaria en términos globales, ya que la energía incorporada en los materiales de construcción no se considera en la certificación energética. La incorporación del ACV, en los actuales procedimientos de certificación energética de edificios, permitiría mejorar dichos procedimientos valorando la energía incorporada en los materiales de construcción, el impacto de los transportes asociados y la disposición final de los materiales, obteniendo una mejor aproximación al impacto medioambiental real del edificio. De esta manera, se puede promover la construcción sostenible de edificios y la innovación en el sector construcción, así como promoviendo la

rehabilitación de edificios aumentado su durabilidad y, a la vez, reduciendo los impactos ambientales debido a la edificación no construida debido a lo anteriormente indicado.

Otra importante barrera en el uso de la herramienta ACV en nuestro país, está relacionada con la poca disponibilidad de herramientas de evaluación y bases de datos confiables y apropiados para el sector (desarrollo de DAP de materiales de construcción validadas y acreditadas por organismos competentes); del mismo modo, la falta de un cuerpo técnico suficientemente capacitado y experto. También se debe mencionar la barrera económica, desde el punto de vista del alto costo que supone la implementación del ACV en la edificación.

Chile cuenta hoy con dos normativas para la evaluación de sustentabilidad de edificios, con un enfoque ACV: (NCh 3048/1.Of.2007 - NCh 30491.Of.2007. Sustentabilidad en la Construcción de Edificios), por lo que urge avanzar en relacionar información, instrumentos y estrategias energéticas y medioambientales, con un mismo objetivo y en torno a una metodología de evaluación basada en el Análisis de Ciclo de Vida, que a través de información sectorial y de empresas, se constituya un indicador eficaz sobre el costo medioambiental y energético de edificios a lo largo de su vida útil. Así, la suma de la información del parque de edificios contribuirá al cumplimiento de los objetivos ambientales y energéticos nacionales y, a elevar la calidad y competitividad del sector.

Los aportes de esta tesis apuntan, en ese sentido, específicamente en aplicar la metodología ACV en valoración y caracterización de los aspectos ambientales referidos, tanto a materiales de construcción, como a fases de construcción y al uso de edificios con características sitioespecíficas para Chile.

3 CAPÍTULO 3. INVENTARIO AMBIENTAL (ICV) : DETERMINACIÓN DE ENERGÍA CONTENIDA Y HUELLA DE CARBONO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

3.1 ACV EN LA DETERMINACIÓN DE ENERGÍA CONTENIDA Y GEI EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

A nivel global y nacional, la industria de la construcción contribuye significativamente al consumo de energía y de recursos naturales, así como a la generación de impactos ambientales, como emisiones a la atmósfera y generación de residuos. Esta situación ha motivado el interés por evaluar los impactos de las construcciones con un enfoque de ciclo de vida, considerando las etapas de obtención de materias primas, manufactura, transporte, uso y demolición (Suppen and Argüello, 2013).

Evaluar la dimensión medioambiental de los materiales de construcción, es intentar calificar y cuantificar el peso (la implicancia) durante todo su ciclo de vida de la cuna a la tumba. Por ello es necesario acotar las principales etapas del ciclo de vida de los materiales tales como: extracción de materias primas o transformación en productos, transporte, construcción, uso y valoración o depósito de residuos, pudiendo incluso incorporarse la etapa de reciclado de este (Mercader et al., 2010).

Un análisis del desempeño ambiental de materiales de construcción (Wadel. et al., 2010), establece que los materiales de construcción de un metro cuadrado habitable de edificación estándar, supone la utilización de 2500 Kg de materiales que ingresan a la obra, con una gran cantidad de impactos ambientales asociados (sin considerar el mantenimiento y la rehabilitación del edificio). El mismo análisis señala con respecto al consumo energético, que la fabricación de materiales necesarios para construir un metro cuadrado de edificación estándar, puede suponer el consumo de energía equivalente a 5.754 MJ (equivalentes a 150 litros de gasolina) y las emisiones de GEI, de 0,5 TCO₂/m².

Al respecto, la Ilustración 3-1, muestra una visión de la contribución de la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de fabricación de materiales, para construir 1 m² de construcción estándar (Zabalza, 2009).

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

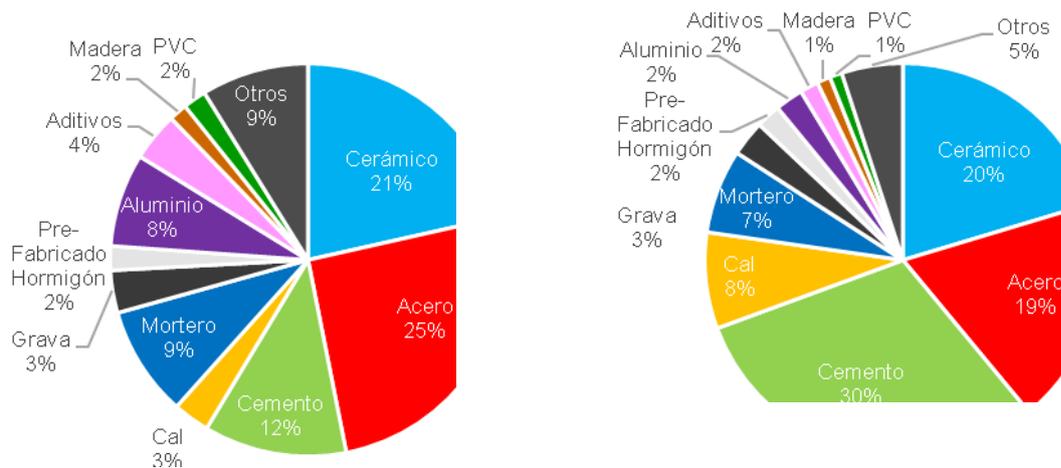


Ilustración 3-1: contribución de la energía incorporada (izquierda) y emisiones de gases de efecto invernadero (derecha), en el proceso de fabricación de materiales, para construir 1 m² de construcción estándar (Zabalza, 2009)

Aunque no existe un método estándar para el cálculo de la energía incorporada en los materiales de construcción, sí existe una definición generalmente aceptada: “La energía incorporada de un material de construcción incluye toda la energía que se necesitó en los distintos procesos para llevar el material a su lugar en el edificio: desde la extracción de las materias primas, hasta su manufactura y construcción; debe incluir la energía asociada al transporte, así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarios para todos esos procesos” (Woolley et al, 1997). Entendido como una ACV “de la cuna a la puerta”. Además debe señalarse, que un estudio de Análisis de Ciclo de vida, puede contemplar distintos enfoques y simplificaciones (Kellenger and Althaus, 2009).

De acuerdo a la Norma Británica PAS 2050, la huella de carbono considera las emisiones de GEI de un producto a través de su ciclo de vida, desde las materias primas pasando por la producción, distribución, uso y disposición final/reciclaje. Incluye las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) y hexafluoruro de sulfuro (SF₆). Y se expresa como masa de GEI (como CO₂ equivalente) por cada unidad de producto o respecto a una función (Zaror, 2002).

En el contexto específico del sector construcción, puede señalarse que las emisiones de GEI procedentes del proceso de construcción, usualmente se generan durante la fabricación de materiales utilizados en la construcción, durante el transporte de materiales para dicha construcción y durante la construcción del edificio.

El presente capítulo busca establecer a través del uso de la metodología ACV, la implicancia de los aspectos e impactos ambientales para diferentes materiales de construcción de fabricación local. Para la evaluación ambiental de los materiales de construcción estudiados, se trabajó con un ACV simplificado, ya que fue considerada una sola categoría de impacto ambiental, asociada al consumo de energía primaria y potencial calentamiento global (GEI).

A partir de los resultados de los inventarios realizados (ICV), se busca aportar en las especificaciones energéticas y medioambientales de los materiales de construcción con características locales para Chile, facilitando de este modo, pautas para la selección de materiales que permitan evaluar, en próximos capítulos, el efecto de la energía contenida en soluciones constructivas de viviendas en Chile, durante todo su ciclo de vida.

3.1.1 Metodología

A continuación se describirá la metodología y consideraciones generales utilizadas, de acuerdo a las recomendaciones del principio normativo ISO 14040-2006 Evaluación de Ciclo de Vida: Principio y Marco.

- **Definición objetivo y alcance:** Determinar la energía contenida y emisiones de gases de efecto invernadero, de los materiales de construcción: madera, cemento, hormigones premezclados y albañilería de ladrillo.

Los estudios fueron realizados en industrias locales de la Región del Biobío, debido a la alta influencia nacional en la fabricación o producción de los materiales anteriormente señalados, lo cual será justificado en detalle, en el análisis de cada uno de ellos durante el desarrollo del presente capítulo.

- **Límites del sistema estudiado:** para este caso comprenden desde la extracción de las materias primas hasta la salida de la fábrica de los materiales (ACV de la “cuna a la puerta”), y considera los flujos primarios de los sistemas (materiales y energéticos), incluyendo el transporte.

Siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 14041, para la realización del análisis del inventario, se creó un diagrama de flujos de procesos del sistema para cada producto analizado (árbol de procesos), como guía en la identificación de entradas y salidas de cada sistema, y se procedió a la recolección de datos, directamente en los sitios de producción, a partir de los cuales se hicieron las mediciones y cálculos según la correspondiente unidad funcional en cada caso.

- **Unidad funcional:** En cada caso se define una unidad funcional, que permite la cuantificación de los sistemas analizados y constituye la unidad de referencia

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

en el estudio, de acuerdo al objetivo planteado para este estudio, asociado a la diversidad de productos y diferencias tecnológicas en la producción.

A saber, en tabla 3-1, se muestra para cada material estudiado las unidades funcionales consideradas:

Tabla 3-1: Unidades funcionales para materiales de construcción estudiados (elaboración propia, 2012)

Material	Unidad Funcional
Cemento	ton
Madera	m ³
Ladrillo	kg
Hormigón	m ³

- **Categoría de impacto:** De acuerdo al planteamiento realizado en el capítulo 1, y que justifican el origen de esta tesis, la selección de la categoría de impacto a analizar se realiza considerando la actual problemática energética y medioambiental tanto en el ámbito mundial y principalmente nacional. En este sentido conviene recordar que los compromisos que tiene el Estado de Chile en términos de reducción de consumo de energía, es de un 12% al año 2020 (PAEE, 20). Con respecto a las emisiones de GEI, Chile no es considerado un emisor relevante a nivel mundial ya que según el World Resources al año 2007, estas emisiones representan sólo el 0,26% de las emisiones de GEI mundiales y pese a que Chile no cuenta con una obligación establecida en la reducción de ellas, voluntariamente se ha comprometido a tomar acciones de mitigación que le permitan desviarse hacia el año 2020 en un 20% por debajo de sus emisiones proyectadas a partir de 2007, mediante Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (MMA, 2013).

De este modo se selecciona como categoría de impacto la energía incorporada (expresada en MJ/kg, MJ/ Ton, MJ/m³; según corresponda), y el potencial de calentamiento global (expresado en Kg CO₂/kg, Kg CO₂/ Ton, Kg CO₂/m³; según corresponda), calculado a partir de la Metodología del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

- **Bases de Datos y Requisitos de calidad de los datos:** Los datos considerados para el desarrollo del inventario (ICV), son de origen primario y secundario, obtenidos en primera instancia a través de un trabajo de campo

directo en cada industria estudiada y además con el aporte de información de parte de los Departamento de Estudio y Desarrollo de dichas organizaciones.

Adicionalmente se ha complementado el trabajo de inventario ambientales, con información en los inventarios existentes de *Ecoinvent v2.0*, descrito en capítulo número dos, el cual contiene un amplio número de materiales de construcción clasificados.

Confidencialidad de datos de entrada: *por compromisos de confidencialidad adquiridos por la autora, para la elaboración de los inventarios ambientales de los materiales estudiados, existe un acceso limitado a la totalidad de los datos de entrada. Los cuales en algunos casos, han sido procesados y expresados en resultados finales, de acuerdo a los requisitos normativos ISO 14.040, para la elaboración de un Inventario de Ciclo de Vida (ICV).*

3.2 INVENTARIO AMBIENTAL MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

3.2.1 Madera Aserrada *Pinus radiata*.

La madera es producida a partir del dióxido de carbono (CO₂), agua, más diversos nutrientes y radiación solar. En forma resumida, el proceso de fotosíntesis, puede describirse a partir de la siguiente reacción, donde la molécula de glucosa (C₆H₁₂O₆), representa la biomasa de los árboles, (Zabalza, 2010):



La energía acumulada teóricamente, en forma de glucosa es de 2.872 kJ/mol, que supone aproximadamente 16 MJ/kg de madera, completamente seca (Werner et al., 2007).

Dentro de la propiedades de este material, puede señalarse que la madera es un material biológico, esto por su composición de moléculas de celulosa y lignina, siendo propensa al ataque de agentes biodegradantes, como son hongos e insectos. Anisotrópico, debido a la diferencia del comportamiento físico y mecánico del material, esto producto de la disposición de las fibras y el anillo de crecimiento respecto de la sollicitación del esfuerzo. Y además Higroscópico, por su capacidad de captar y ceder humedad en su medio provocando cambios dimensionales y deformaciones en el elemento o pieza, (CORMA, 2003).

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Chile es uno de los mayores productores mundiales, del recurso madera. Cuenta con una superficie de recurso forestal de 16,48 millones de hectáreas, de las que 13,59 millones de hectáreas corresponden a bosques autóctonos o naturales esto es el 82% del total del recurso forestal, y 2,3 millones de hectáreas de bosque plantado aclimatado, correspondiente a un 13,9% de superficie del total del recurso forestal, los que se encuentran distribuidos en un 99,9% entre las regiones de Coquimbo y Magallanes (INFOR, 2008).

La Industria Forestal debido a las restricciones de tala y el alto periodo de madurez de las especies autóctonas, utiliza especies aclimatadas como son el *Pinus radiata*, *Pino Oregón* y el *Eucalipto*.

El consumo de madera en trozas en la industria de la construcción alcanzó para el 2008 a 39.869,1 miles de metros cúbicos ssc (sólido sin corteza), siendo los dos más grandes consumidores la industria de la Pulpa Química con un consumo anual de 15.665,71 miles de metros cúbicos, correspondiente a 39,3%, y en segundo lugar la Industria de la madera aserrada con un consumo anual de 13.968,31 miles de metros cúbicos, correspondiente a 35,1% (INFOR, 2008).

Mientras que el consumo total por especie de madera en troza, en madera aserrada a nivel nacional, lo concentra el *Pinus radiata* con 13.369,6 m³ ssc, correspondiente al 95,7% seguido por una gran distancia por la madera nativa con 326,9 m³ ssc, correspondiente a un 2,3% del total nacional (INFOR, 2008).

Si se considera el consumo de madera en troza, según la localización de la industria procesadora destinada a elaboración madera aserrada, la Región del Biobío concentra el 57,2% del consumo nacional (CORMA, 2010). Esto se debe principalmente a la geografía predominante de la región, que genera las condiciones propicias para la silvicultura de la especie aclimatada *Pinus radiata* que concentra el mayor consumo, y a la contribución de los grandes aserraderos los que poseen actualmente modernas tecnologías, además de incorporar líneas de astillado y remanufactura, como son la instalación de unidades de secado industrial realizando un mayor aprovechamiento de la materia prima y entregándole un valor agregado al producto terminado.

De este modo, y de acuerdo al porcentaje de representatividad que tiene la producción de madera aserrada en la Región del Biobío, a nivel nacional. Se justifica plenamente el desarrollo del trabajo de campo en la industria de la madera de la Región del Biobío.

3.2.1.1 Inventario Ciclo de Vida (ICV), madera *Pinus radiata*:

-Objetivo del estudio: determinación de la energía contenida del material *Pinus radiata*, en proceso de aserrío, para la obtención del producto madera aserrada seca.

-Alcance del estudio: Aserradero Región del Biobío. Aserradero permanente tradicional. Uno de los mayores productores de madera aserrada de pino radiata del país, con una capacidad instalada de aserrío de 350.00m³ por año de trozos y 70.000m³ de madera aserrada de infraestructura (CORMA, 2010).

-Unidad funcional: m³ *madera Pinus radiata cepillada*.

-Flujo de referencia: Se consideraron valores de consumo para la madera aserrada seca en (MJ/m³) asociados al consumo de *energía potencial y energía térmica*.

-Límites del sistema: Se consideró como entrada de materia prima el ingreso de rollizos o trozas, y entradas de energía, los combustibles fósiles, la energía eléctrica y la energía térmica. Como salidas de productos se consideró la madera aserrada verde, madera aserrada seca, madera cepillada; como productos en elaboración la madera cepillada a remanufactura, además de todos los subproductos como son el aserrín, la corteza, astillas y viruta.

-Criterio para la inclusión inicial de entradas y salidas: se tomaron todas las entradas de materia prima y energía y las salidas de productos y subproductos, realizando un balance de volúmenes.

La validación de confiabilidad los datos recopilados, fue realizada mediante una triangulación de datos, comparando los procesos de producción (los valores obtenidos en la recopilación de datos), con estudios realizados por el Instituto forestal (INFOR) y los valores de energía con estudios de ciclos de vidas realizados en el norte de Estados Unidos y en España.

La sensibilización de los datos se hizo en dos formas, la primera consistente en acotar la producción mediante rangos de distancia de transporte y la segunda, modificando la asignación de flujo energético, el cual en una primera instancia era volumétrico, y se le agregó la variable costo comercial.

Con la finalidad de dimensionar el proceso productivo de obtención de madera aserrada seca Pino insigne en Ilustración 3-2 se muestra el diagrama de flujo de planta estudiada.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

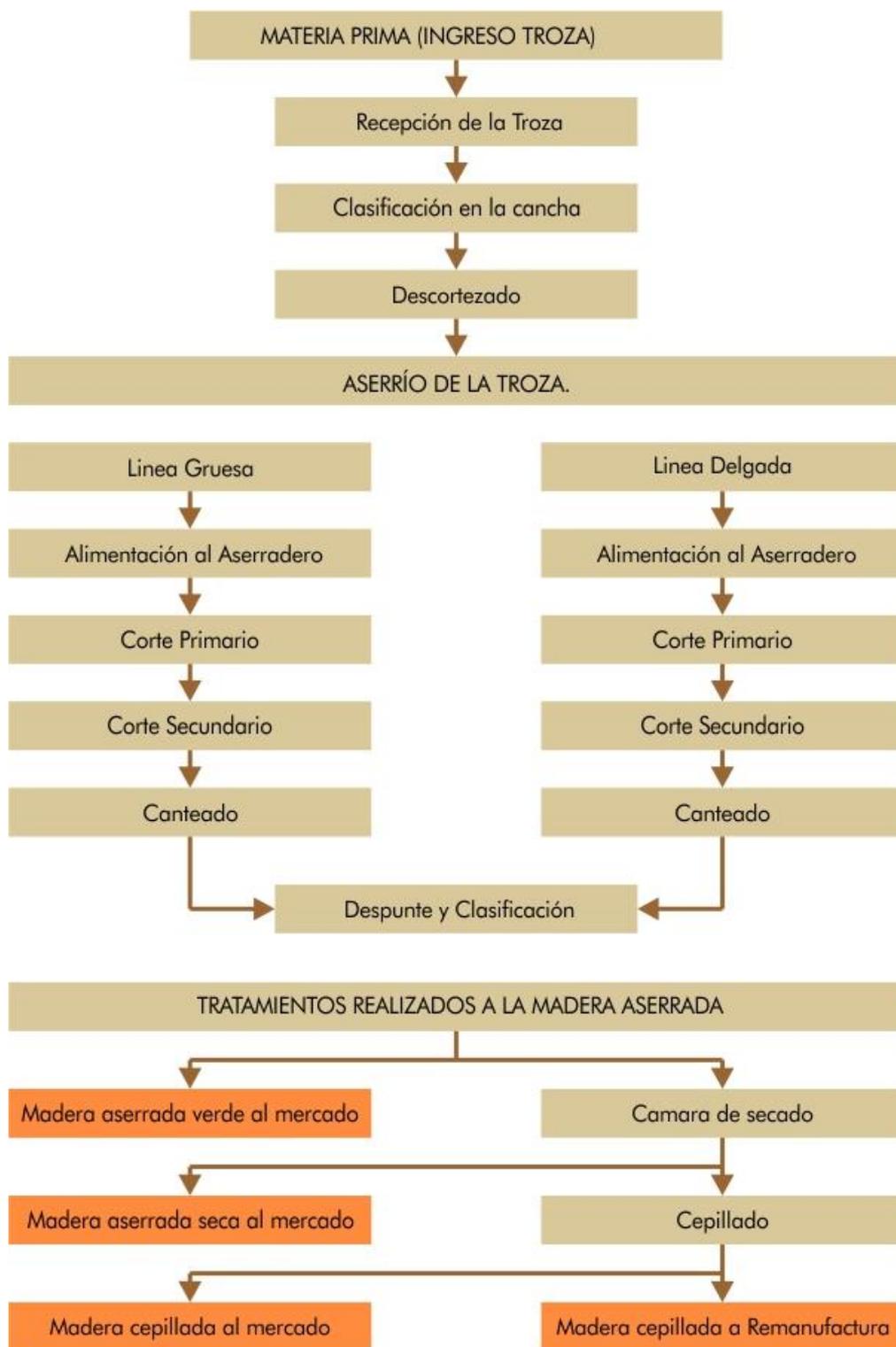


Ilustración 3-2: Flujo de procesos madera aserrada planta estudiada (elaboración propia, 2010)

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Para la consignación de los datos de entrada, en primer lugar se determinó la asignación por distribución volumétrica y porcentual de producción, luego la asignación de los consumos energéticos por producto y subproducto. Lo que en forma gráfica queda representado en Ilustración 3-3.

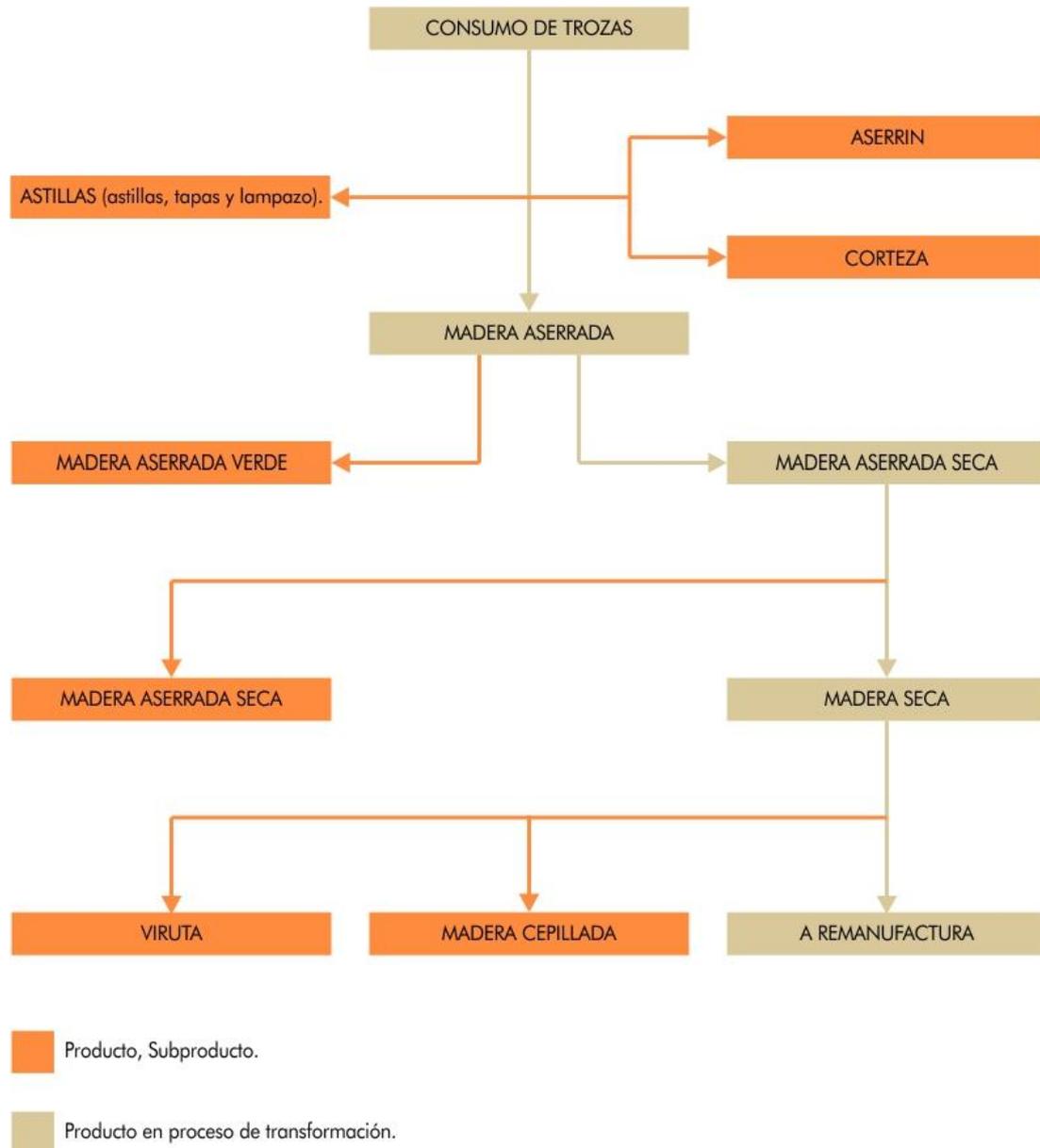


Ilustración 3-3: Flujo de producción utilizada en el ICV, (elaboración propia, 2010)

3.2.1.2 Productos

a. entradas:

Materia Prima: Consumo de troza (m³Jas/mes), empleada para calcular el volumen de madera aprovechable de un rollizo de madera aserrable.

b. salidas

Subproductos: astillas, aserrín, corteza, viruta (m³). Expresado en (m³).

Productos: madera aserrada verde (mercado), madera aserrada seca (mercado), madera cepillada (mercado), madera cepillada (a remanufactura). Expresado en (m³).

3.2.1.3 Energía

a. entradas:

Energía eléctrica: *Sistema interconectado central (SIC)*. Expresado en (kWh).

Dado que existen subproductos y productos que salen del proceso antes de cerrar el ciclo, no se puede asignar el consumo total de electricidad por volumen de producción o costo comercial directamente, ya que se estaría asociando un consumo energético lineal y no parcializado de acuerdo al nivel de significancia.

De este modo, para determinar el real consumo energético por equipo habría que determinar la Potencia Activa, la representación matemática de la potencia activa en un sistema trifásico **equilibrado** (las tres tensiones de fase tienen idéntico valor y las tres intensidades de fase también coinciden) está dada por la ecuación ((Purcell, 1988):

$$P_3 \phi = \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos \phi \quad (W)$$

Donde:

I : Amperes (A).

V : Potencia nominal (W)

Cos ϕ : Factor de placa.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Consumo de energía (kWh) por equipo (Purcel, 1988):

$$E = P * h$$

Donde:

P : Potencia activa (W)

H : horas de producción.

De este modo a partir de las relaciones señaladas, se trabajó con porcentaje de potencial nominal y horas trabajadas por equipos.

Establecer el amperaje medio para cada equipo, no fue parte de los objetivos de esta investigación, ya que para ello se debería realizar un estudio estadístico determinando mediante muestreo anual parcializado en intervalos de tiempo no superiores a 2 horas el amperaje de cada equipo. Es un proceso largo y engorroso del cual se desconoce el real grado de influencia en la distribución final de energía, por lo que se realizó una asignación tomando en consideración el potencial nominal, las horas trabajadas y el consumo eléctrico de la planta, la que se determina a partir de la siguientes relaciones, (Purcell, 1988):

$$\text{Energía consumida genérica} = \text{potencial nominal del equipo (kW)} * \text{horas trabajadas en el equipo (h)}$$

$$\% \text{ energía consumida genérica} = \frac{\text{potencial nominal del equipo (kW)} * \text{horas trabajadas del equipo (h)}}{\Sigma \text{ Energía consumida genérica}}$$

$$\text{Energía eléctrica por equipo} = \% \text{energía consumida genérica} * \text{consumo energía eléctrica aserradero}$$

La energía consumida genérica, considera el consumo eléctrico, como si toda la maquinaria estuviera trabajando a su máxima capacidad, lo que no es completamente real pero entrega un valor referencia que sirve para este estudio.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

En ilustración 3-4, se muestran la distribución del consumo de energía eléctrica mensual para un mes tipo (julio 2010).

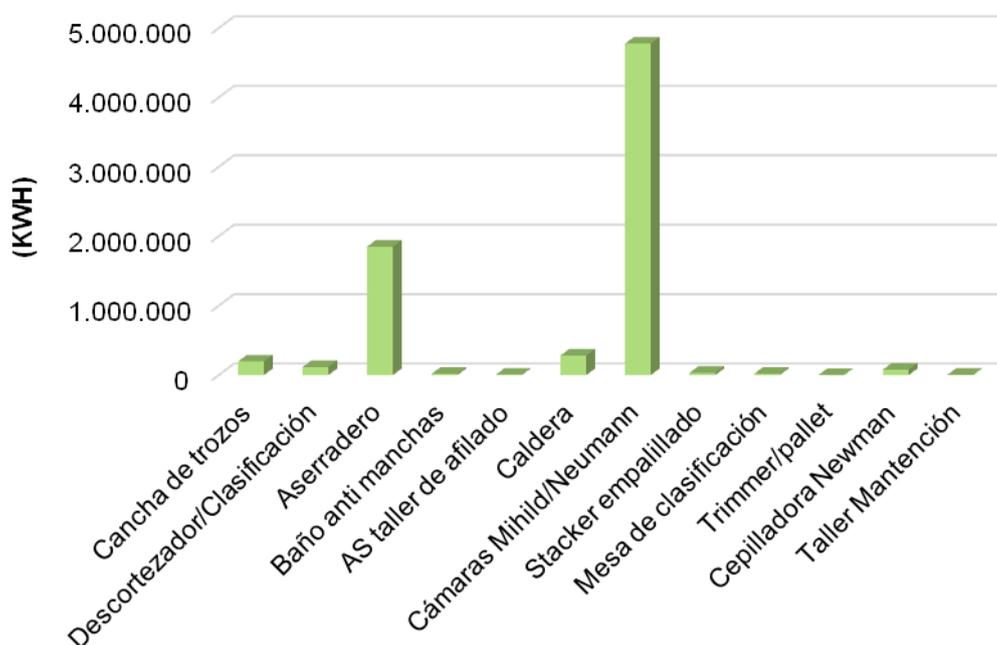


Ilustración 3-4: Distribución mensual consumo de energía eléctrica (elaboración propia, 2010)

- **Derivados del petróleo:**

- Diésel (transporte externo): Para determinar el transporte de ingreso de troza se trabajó con datos de volúmenes de transporte, además de las características de la carpeta de rodado por donde transitan.

Cálculo de Diésel:

A partir de datos históricos obtenidos en la misma planta de producción, el rendimiento promedio para un camión maderero (con carro), fue considerado como: 2,0 km / lt. Diésel, en carretera, 1,7 km / lt. Diésel en ripio y la carga promedio de trozos para un camión con carro 28 m³, del bosque a la planta.

- Diésel (Transporte interno). La Planta estudiada cuenta con un completo sistema de control de facturación de petróleo por cada maquinaria que trabaja en esta, donde se cuenta una serie de cargadores, camiones grúas, y grúas horquillas. Ya que el consumo de combustible no está asociado directamente al volumen de movimiento, ni las distancias, la asignación de flujos energéticos, Se realizó

directamente y lineal de acuerdo a los volúmenes de producto o sub producto terminado.

- **Biomasa**

Mezcla Biomasa (Astillas, Aserrín, Viruta). El contenido de humedad es un factor de extrema relevancia en el proceso de combustión. La literatura indica que, como regla general, un contenido de humedad mayor o igual a 60% en la biomasa combustible imposibilita la combustión continua dentro de la cámara de combustión, provocando que disminuya gradualmente la temperatura dentro de la misma. Durante el proceso de combustión, la energía requerida para evaporar el agua contenida en el combustible se resta de la energía disponible en el combustible. Lo mismo sucede con el agua que se forma posteriormente, cuando el hidrógeno contenido en el combustible reacciona con el oxígeno del aire. Para representar lo anterior, es necesario disponer de alguna forma de cálculo de la energía que se pierde por el factor humedad, y a partir de esto, estimar la energía de la cual se puede efectivamente disponer, expresado como Poder Calorífico Inferior (PCI):

Para determinar el PCI de la biomasa de origen forestal, se considera la siguiente expresión, (Van Loo, Sjaak et al 2008., Sterling, 2008):

$$PCI = PCS \left(1 - \frac{w'}{100}\right) - 2,444 \cdot \frac{w}{100} - 2,44 \cdot \frac{h}{100} \cdot 8,936 \left(1 - \frac{w'}{100}\right)$$

Donde:

PCI: Poder Calorífico Inferior en MJ/Kg de combustible (base húmeda)

PCC: Poder Calorífico Superior en MJ/Kg de combustible (base seca)

2,444: diferencia entalpia entre el vapor y agua en estado líquido a 25°C, en MJ/Kg

W': contenido de agua del combustible en porcentaje del peso (base húmeda)

8,936: M_{H_2O} / M_{H_2} es la relación de masa molecular entre el H₂O y el H₂, sin unidad

h: concentración de hidrógeno en porcentaje del peso (base seca). Generalmente 6% para madera.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

$PCS (1 - \frac{w'}{100})$: transformación del poder calorífico superior a base húmeda

$2,444 \cdot \frac{w'}{100}$: término que permite deducir la energía correspondiente al calor latente de vaporización del agua contenida en la madera.

$\frac{2,444 \cdot w}{100} - \frac{2,444 \cdot h}{100} \cdot 8,936 (1 - \frac{w'}{100})$: término que considera la energía requerida para la vaporización del agua producida con la combustión del Hidrógeno.

A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo de PCI, para la producción de un mes (julio, 2010). :

$$PCI = 20,04(\text{MJ/kg}) * [1 - (43,57/100)] - 2,444(\text{MJ/kg}) * (43,57/100) - 2,444(\text{MJ/kg}) * (6/100) * 8,936 * [1 - (43,57/100)]$$

$$PCI = 9,50 \text{ (MJ/Kg)}$$

3.2.1.4 Procedimiento de cálculos para determinación energía contenida y emisiones de CO₂

Dado que la cantidad y tratamiento que se da a los datos de entrada es bastante amplia y los resultados agrupan una cantidad importante de información, dificultando la visualización simplificada para el proceso de producción estudiado. Se ha decidido consolidar dicha información diagramas de flujos con criterios que permiten subdividir el sistema en cuatro partes relacionadas con las etapas productivas. Todos los cálculos que justifican los resultados incorporados en los diagramas de flujos consolidados, incluyendo la evaluación estadística de ellos (medidas de tendencia central), los cuales como se ha mencionado, por razones de confidencialidad no son posibles de publicar en detalle.

De este modo se tiene:

- Productos (entradas)- parte 1: Flujo de producción - Balance Volumétrico, el cual considera para los productos en proceso de transformación (trozas, madera aserrada) y para los productos y subproductos: aserrín aserradero, pérdidas (materia prima), corteza y astillas (tapas y lampazo), los valores para el balance volumétrico y distribución porcentual para esta fase del proceso. Información la cual queda resumida y representada el Ilustración 3-5.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

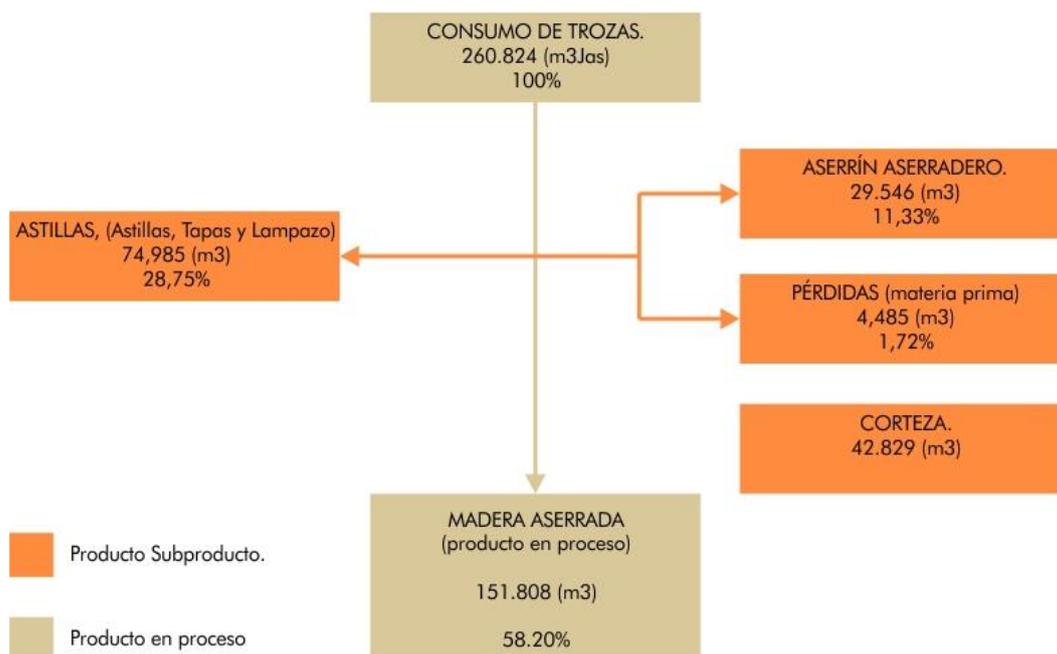


Ilustración 3-5: Flujo de producción proceso estudio (parte 1): Balance volumétrico. (Elaboración propia, 2010)

- Productos (entradas) - parte 2: Flujo de producción - Balance Volumétrico, el cual considera para los productos en proceso de transformación (madera aserrada, madera aserrada seca, madera cepillada) y para los productos y subproductos: madera aserrada verde (mercado), madera aserrada seca(mercado), madera cepillada (mercado), viruta seca(mercado), los valores para el balance volumétrico y distribución porcentual para esta fase del proceso. Información la cual queda resumida y representada en Ilustración 3-6.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

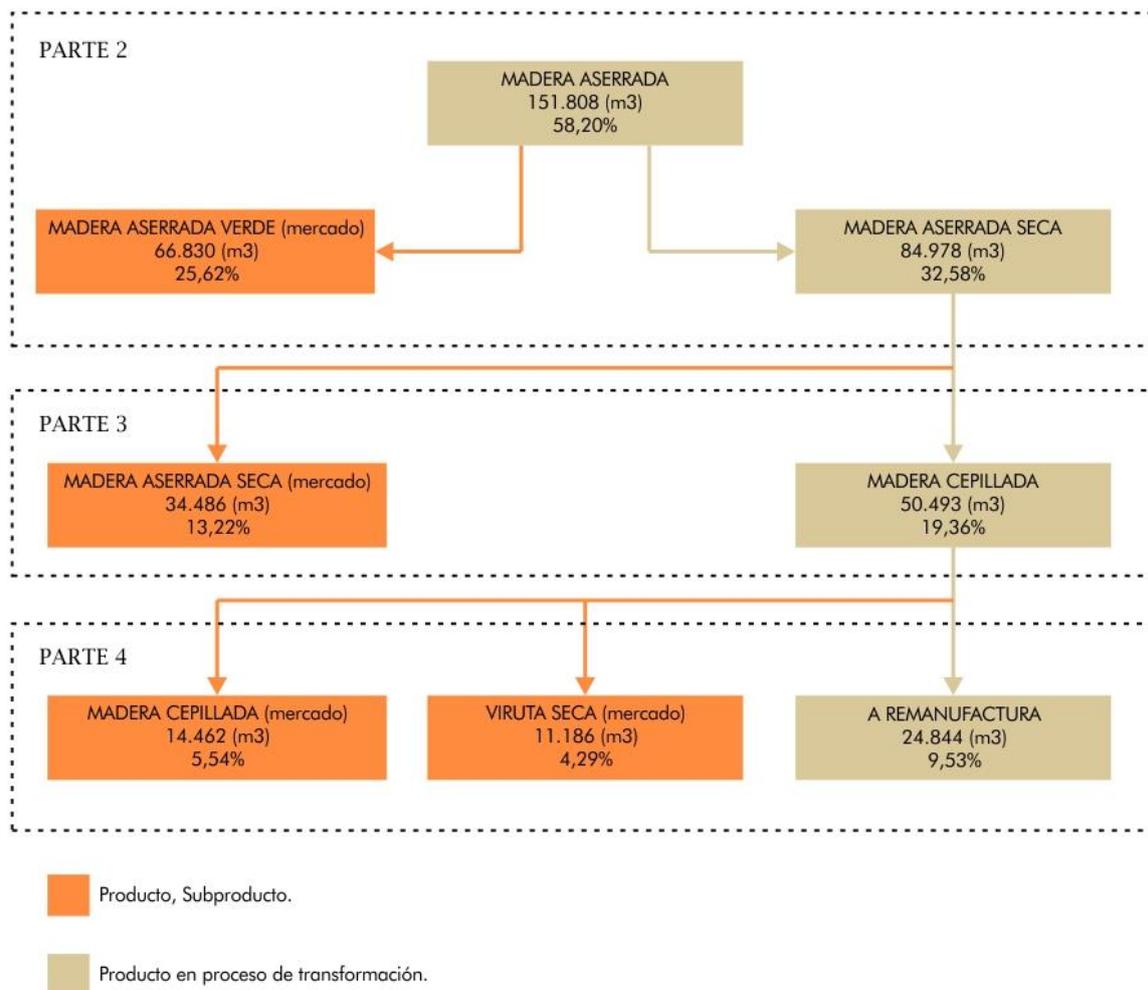


Ilustración 3-6: Flujo de producción Parte 2-3 y 4 Balance de volumétrico (elaboración propia, 2010)

Energía

- Energía eléctrica.

Sistema interconectado central (*SIC*). Para calcular el consumo anual por equipo se realiza de la misma forma antes mencionada en punto 3.2.1.3 donde se señala claramente las relaciones matemáticas utilizadas en esta investigación, los resultados gráficos al respecto se encuentran detallados en el Anexo de la presente tesis.

- Derivados del petróleo.

Diésel (*Transporte externo*). Para el cálculo del consumo diésel del transporte externos, se contó con la información completa de volumen de ingreso de troza, en relación a los volúmenes transportados y sus distancias pero el promedio de (lt/m³Jas), sólo fueron considerados los proveedores que aportaban más de un 0,5% al ingreso total, esto es 48 de un total de 192 proveedores, los que aportan un total del 83,4% del ingreso anual.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Dada la importancia de la implicancia que esta información tendrá en el posterior cálculo de huella de carbono, se muestra en forma gráfica la distribución porcentual de consumo de rollizos por rangos de kilometraje lo cual queda representado en ilustración 3-7.

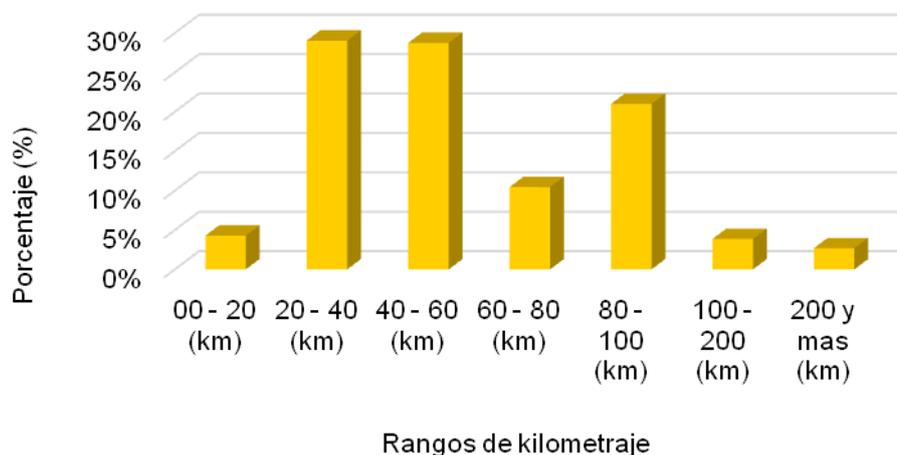


Ilustración 3-7: Distribución porcentual de consumo de rollizos por rangos de Kilometraje (elaboración propia, 2010)

Al realizar una separación por rangos de kilometraje (ya que este es totalmente influyente en la relación consumo/producción), se puede asignar un consumo de combustible por metro cúbico de material, multiplicando el porcentaje de volumen de aporte en cada rango de kilometraje por la relación consumo producción para dicho rango, con lo que se obtiene un consumo de 2,8152 (lt/m³Jas).

De este modo es posible obtener una relación entre la distribución de combustible y el volumen de trozos movilizados. Lo cual queda representado en Ilustración 3-8.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

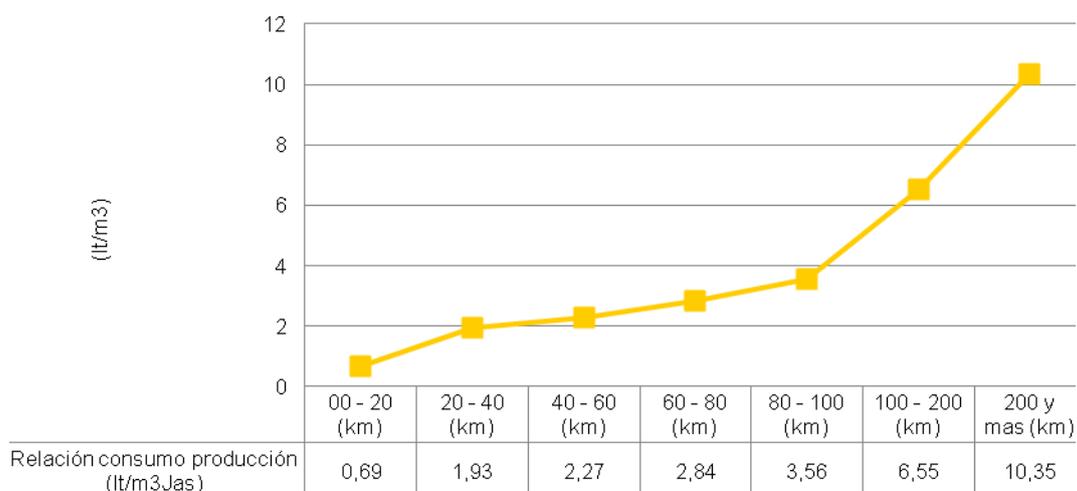


Ilustración 3-8: Distribución del consumo de combustible versus producción o metros cúbicos movilizados, en función de la distancia (elaboración propia, 2010)

- *Diésel (Transporte interno y consumo caldera).* La asignación se realizó directamente y lineal de acuerdo a los volúmenes de producto o sub producto terminado, para la temporalidad de un año.
- En el caso de la caldera, esta asignación se le incluyó a la madera aserrada seca a la salida de la caldera, la que se fue distribuyendo de acuerdo a los volúmenes de producción de cada producto.
- Cuyos resultados se muestran en Ilustración 3-9. Desde donde se desprende que los meses mas desfavorables se encuentran directamente asociados a los volúmenes de consumo de rollizos o trozas. En lo respectivo a la desviación estándar, esta tiene una variación porcentual que alcanza el 8,3% con respecto a la media aritmética.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

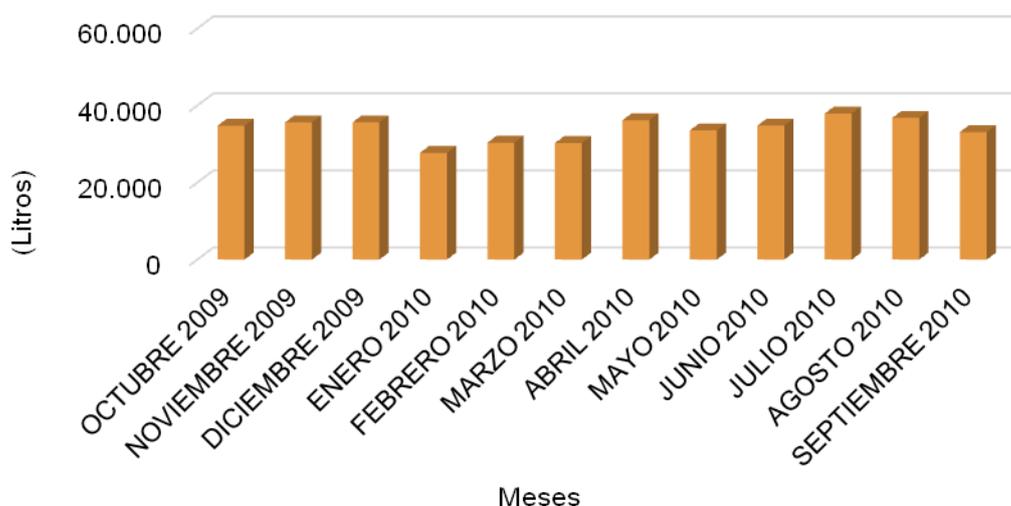


Ilustración 3-9: Distribución consumo diésel (elaboración propia, 2010)

- Biomasa. Mezcla Biomasa (Astillas, Aserrín, Viruta). El cálculo del poder calorífico de la biomasa se realiza de acuerdo a lo descrito en punto 3.2.1.3, pero considerando los datos anuales de producción para el año 2010.

3.2.1.5 Validación de datos (producto)

De acuerdo a lo expresado en punto 3.2.1.1, la veracidad de los datos se efectuó mediante el balance de volúmenes y energía, además de un análisis comparativo con datos alternativos que cumplan con los requisitos de calidad necesarios.

Se realizó una triangulación de volúmenes con estudios realizados por el INFOR los años 2006 y 2008. Este se realizó en porcentaje, ya que los volúmenes de producción de cada estudio son diferentes pero la distribución porcentual de flujos no difiere en significativamente. Aunque una de las consideraciones para realizar esta triangulación, es que los estudios realizados por el INFOR consideran la corteza en el consumo de troza, por lo que para realizar el cálculo, este debe ser restado al consumo de troza. Además no se puede seguir desarrollando la comparación más allá de la madera aserrada debido a que cada aserradero destina de diferente forma la asignación de producción dependiendo de las necesidades del mercado, por lo que sería irreal continuar comparando asignaciones de flujo.

En Ilustración 3-10, se muestra en forma gráfica y resumida la validación del flujo de producción (elaboración propia).

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

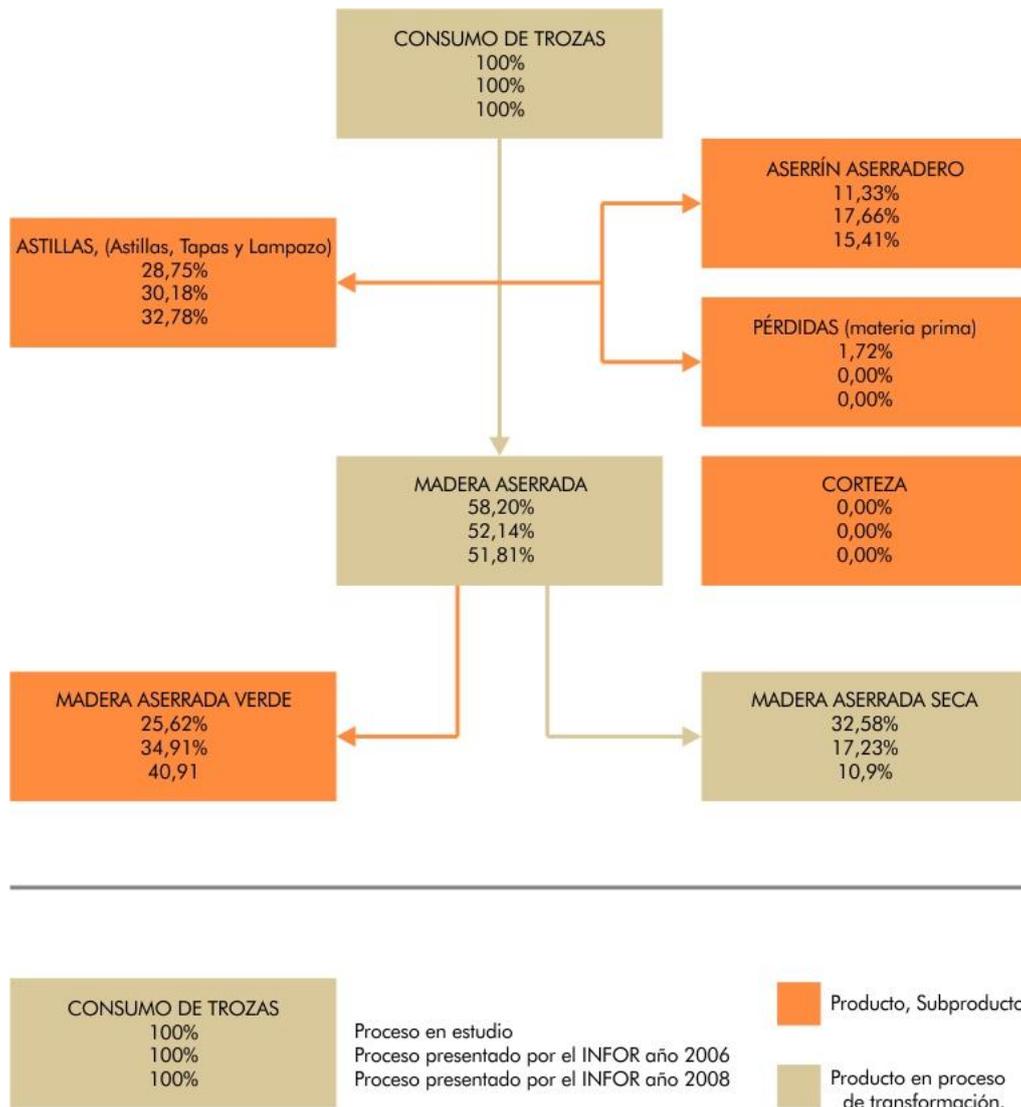


Ilustración 3-10: Validación flujo de producción mediante triangulación de datos, en porcentaje del consumo total anual (elaboración propia, 2010)

3.2.1.6 Asignación de flujos

Con el fin de establecer el balance de energía se realizó una asignación de flujos, para ello fueron considerados los productos, coproductos y residuos además de las pérdidas de energía, pero primero se deben conocer las entradas y salidas del sistema en estudio, las que se presentan a continuación.

A partir de la cual puede comprarse la cuadratura del balance de volúmenes realizado, ya que todo lo que entra al sistema sale convertido en productos, subproductos o pérdidas de proceso.

Además de este flujo de materiales y la transformación del producto, también se encuentra vinculado el flujo energético (energía contenida en ello). En tabla 3-2, se detalla

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

información al respecto, destacando a priori el alto aporte de la Biomasa que entra al sistema en el proceso de secado de la madera aserrada, seguido lejanamente por la influencia del transporte externo.

Tabla 3-2: Resumen Consumos energéticos anuales (elaboración propia, 2010)

Materiales	Cantidad	Unidad	Entradas de Energía			Cantidad	Unidad
			Densidad	Factor de conversión			
Energía eléctrica.							
Sistema							
Interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		6×10^{-6} (TJ)		27	(TJ)
Derivados del petróleo							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	$4,3 \times 10^{-5}$ (TJ/Kg)		31	(TJ)
Diesel (transporte interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	$4,3 \times 10^{-5}$ (TJ/Kg)		15	(TJ)
Diesel (consumo caldera)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	$4,3 \times 10^{-5}$ (TJ/Kg)		2	(TJ)
Biomasa							
Mezcla Biomasa	*	(MJ)				251	(TJ)

(*) Información confidencial.

❖ **Principios de asignación.**

Dado que el flujo del proceso productivo está completamente establecido y separado por los distintos productos y subproductos obtenidos en la transformación de la madera. Se debe asignar el consumo energético a cada uno de estos, tomando en consideración su distribución, de este modo la asignación se realiza con las siguientes consideraciones:

• **Energía eléctrica, Sistema Interconectado Central:**

La distribución se realizó de acuerdo a la producción esto es asignación por volumen, considerando el consumo energético en tres etapas:

Etapa 1: desde el ingreso de la troza a la “cancha de trozos”, hasta la salida del aserradero, después del “baño antimanchas” y el “taller de afilado” que corresponde a aserradero (obtención de madera aserrada).

Etapa 2: desde las “cámaras de secado” contando la “caldera” por supuesto, hasta la “mesa de clasificado” y en “Trimmer/pallet”, (obtención madera aserrada seca).

Etapa 3: desde la entrada a la “cepilladora Newman” hasta terminar en el “taller de mantención”, (obtención de madera cepillada y viruta).

Evidentemente la energía contenida de los materiales en proceso se suma a la energía que se va incorporando.

- **Diésel (transporte externo)**

Esta distribución se realizó de acuerdo a los volúmenes totales de producto terminado, y la energía contenida de las pérdidas en la producción fueron cargadas a la madera aserrada ya que es la única parte del flujo donde se producen.

- **Diésel (transporte interno)**

Esta distribución se realizó de acuerdo a los volúmenes totales de movimientos de los distintos productos.

- **Diésel (Consumo caldera)**

Esta asignación se le incluyó a la madera aserrada seca a la salida de la caldera la que se fue distribuyendo de acuerdo los volúmenes de producción de cada producto.

- **Mezcla Biomasa.**

Al igual que el diésel que consume la caldera, este fue considerado en el flujo de producción justo después de la salida del producto en proceso madera aserrada seca, la que se fue distribuyendo de acuerdo a los volúmenes de producto terminado.

En Ilustración 3-11, se muestra en forma desagregada la energía contenida por producto, considerando todos los supuestos de asignación antes presentados. Primero se muestra el flujo general indicando en ingreso de troza como se separa por producción anual en (m³), el consumo energético total anual (TJ), y el consumo energético por metro cuadrado

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

(MJ/m3), al entrar la energía térmica producida por la biomasa al sistema se mantiene separada de la energía potencial.

El detalle de valores de energía contenida de cada producto, por m3, se encuentran en tabla 3-3.

Tabla 3-3: Energía contenida por producto o subproducto por (m3) (elaboración propia, 2010)

ASTILLAS (m3)							
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	57,3%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	27,7%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	26	MJ/m3	15%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					175	MJ/m3	
ASERRÍN (m3)							
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	57,3%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	27,7%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	26	MJ/m3	15,1%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					TOTAL 175		
CORTEZA (m3)							
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	57,3%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	27,7%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	26	MJ/m3	15%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					175	MJ/m3	
MADERA ASERRADA VERDE (m3)							
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	33,8%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	16,3%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	148	MJ/m3	49,9%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					297	MJ/m3	

MADERA ASERRADA SECA AL MERCADO							
(m3)							
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	3,1%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	1,5%
Diesel (consumo caldera)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	24	MJ/m3	0,7%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	148	MJ/m3	4,5%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					321	MJ/m3	9,8%
Combustibles renovables							
Combustible de madera (Biomasa)	*	(TJ)			2.954	MJ/m3	
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA					2.954	MJ/m3	90,2%
TOTAL GENERAL ENERGÍA					3.275	MJ/m3	

MADERA CEPILLADA							
(m3)							
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	3,1%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	1,5%
Diesel (consumo caldera)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	24	MJ/m3	0,7%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	152	MJ/m3	4,6%

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

TOTAL ENERGÍA POTENCIAL								325	MJ/m3	9,9%	
Combustibles renovables											
Combustible de madera (Biomasa)		*	(TJ)			2.954	MJ/m3				
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA								2.954	MJ/m3	90,1%	
TOTAL GENERAL ENERGÍA								3.279	MJ/m3		
VIRUTA (m3)											
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%				
Combustibles fósiles											
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	3,1%				
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	1,5%				
Diesel (consumo caldera)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	24	MJ/m3	0,7%				
Electricidad											
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)	3,6 (MJ)		152	MJ/m3	4,6%				
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL								325	MJ/m3	9,9%	
Combustibles renovables											
Combustible de madera (Biomasa)		*	(TJ)			2.954	MJ/m3				
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA								2.954	MJ/m3	90,1%	
TOTAL GENERAL ENERGÍA								3.279	MJ/m3		

A REMANUFACTURA (m3)										
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%			
Combustibles fósiles										
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	3,1%			
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	1,5%			
Diesel (consumo caldera)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	24	MJ/m3	0,7%			

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)	3,6 (MJ)	152	MJ/m3	4,6%	
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL				325	MJ/m3	9,9%	
Combustibles renovables							
Combustible de madera (Biomasa)	*	(TJ)		2.954	MJ/m3		
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA				2.954	MJ/m3	90,1%	
TOTAL GENERAL ENERGÍA				3.279	MJ/m3		

(*) Datos confidenciales.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

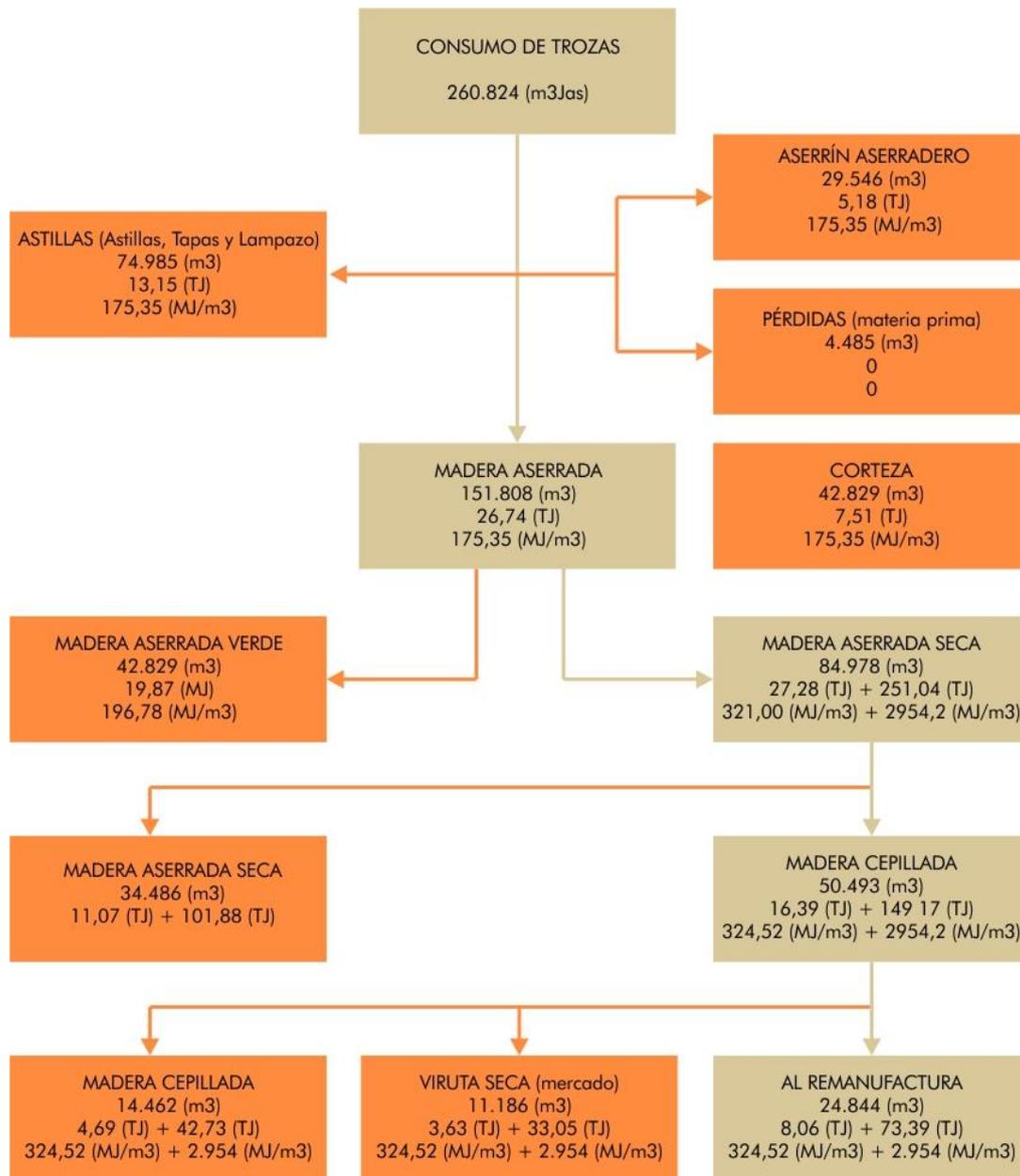


Ilustración 3-11: Flujo producción y energía por producto (elaboración propia, 2010)

3.2.1.7 Validación de datos (energía).

Para dar validez a los resultados obtenidos en cuanto a los consumos energéticos, se realiza una triangulación de datos, realizando una evaluación comparativa, con estudios realizados en España y EEUU.

▪ **Triangulación de datos (energía), experiencia España y EEUU.**

Estudios realizados en España (Peraza, 2001) sobre el consumo energético en la Industria del aserrado entregan valores de consumo energético establecidos en sus líneas de flujo,

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

esto valores son referentes a un aserradero primario con producciones anuales cercanas a los 30.000m³, y el estudio se realizó sobre una producción de 107 m³ de madera aserrada, considerando una jornada de trabajo de ocho horas. En tabla 3-4, se muestra el consumo energético correspondiente a un aserradero primario para la producción de madera seca en España y el consumo energético correspondiente al caso estudiado, para la producción de madera seca).

Tabla 3-4: Consumo energético correspondiente a un aserradero primario para la producción “madera aserrada seca” (Peraza, 1981)

Concepto	Energía Potencial	Energía Térmica
Operaciones de corte	13 (MJ/m ³)	-
Movimiento y espera	27 (MJ/m ³)	-
Energía Consumida en vacío	17 (MJ/m ³)	-
Secado	-	779 (MJ/m ³)
Total	57 (MJ/m ³)	779 (MJ/m ³)

Esto indica que el total de energía consumida en el proceso de transformación de la madera se utiliza 835,85 (MJ/m³), además que la energía térmica utilizada en los procesos de secado equivale al 93,18% del consumo total de energía en el proceso completo.

Al comparar los datos se obtiene que en el aserradero en estudio se utiliza 3,9 veces más energía en la producción de madera aserrada seca, pero al comparar los datos de la energía térmica de secado el proceso en estudio arroja un 90% del consumo total de energía, lo que no varía en demasía con la proporción utilizada en el estudio español.

El otro caso para la triangulación, corresponde al estudio caso llevado a cabo por el Consortium for Research on Renewable Industrial Materials (CORRIM, 2011), el cual determina la energía acumulada en el proceso de producción de la madera cepillada, seca blanda. Cuyos resultados se muestran en tabla 3-5.

Al comparar estos estudios, primero destacar la diferencia existente entre estos, referido principalmente al uso de combustibles, esto por la utilización de gas natural en similares proporciones que biomasa, por ejemplo en el primer y tercer estudio la participación de la biomasa dentro del total es cercano al 50% mientras que el segundo es de 76,6%.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-5: Comparación energía acumulada para la producción de 1 (m3) de madera cepillada, seca blanda, realizados por el CORRIM (Puettman et al.,2009)

Tipo de energía	CORRIM Fase I		CORRIM Fase II
	Pacífico		
	Noreste	Sureste	Interior del Noroeste
	(MJ/m3)		
Gas Natural	1.344	232	1.389
Biomasa (residuos madereros)	1.592	3.023	1.152
Hidroelectricidad	200	4	159
Petróleo crudo	91	97	112
Carbón	95	411	84
Uranio	39	170	10
Otros tipos de energía	3	8	6
TOTAL	3.364	3.945	2.912

Si se comparan los datos se obtiene que en el aserradero en estudio (ver tabla 3-6), muestra que los valores de consumo energético con el primer y tercer estudio son similares, diferenciándose con el segundo, el cual usa mayor cantidad de Biomasa, un diferencial de 650 (MJ/m3), lo cual indica de acuerdo a estos resultados, que las tecnologías energéticas utilizadas en Chile no difieren mucho con las utilizadas en EE.UU (para los casos estudio, señalados).

3.2.1.8 Sensibilidad de los datos

La sensibilización de los datos fue realizada, modificando la variable combustible Diésel (caso 1) y variable electricidad agregando variable costo comercial del producto (caso 2).

Para el caso 1, se sensibilizaron los datos de transporte externo, más del 68% del consumo de trozas del aserradero se producen entre los 20 y 80 kilómetros. Si se compara la diferencia por el cambio de la variable se obtienen los resultados señalados en tablas 3 -7 y 3-8.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-6: Consumo energético correspondiente a un aserradero en estudio “madera cepillada”(elaboración propia, 2010)

MADERA CEPILLADA		(m3)					
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	3,1%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	1,5%
Diesel (consumo caldera)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	24	MJ/m3	0,7%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	152	MJ/m3	4,6%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					325	MJ/m3	9,9%
Combustibles renovables							
Combustible de madera (Biomasa)	*	(TJ)			2.954	MJ/m3	
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA					2.954	MJ/m3	90,1%
TOTAL GENERAL ENERGÍA					3.279	MJ/m3	

(*) Datos confidenciales.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-7: Consumo energético, sensibilizando datos de transporte interno, del aserradero en estudio “madera aserrada verde” Caso 1 (elaboración propia, 2010)

MADERA ASERRADA VERDE (ficticio)		(m3)					
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	54	MJ/m3	21,5%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	19,4%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	148	MJ/m3	59,1%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					251	MJ/m3	

Tabla 3-8: Consumo energético, sensibilizando datos de transporte interno, del aserradero en estudio “madera aserrada verde” Caso 2 (elaboración propia, 2010)

MADERA ASERRADA VERDE (real)		(m3)					
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diésel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	MJ/m3	33,8%
Diésel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	MJ/m3	16,3%
Electricidad							
Sistema interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	148	MJ/m3	49,9%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					297	MJ/m3	

(*) Datos confidenciales.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

De los resultados se desprende que la diferencia no es tan evidente como se esperaría, ya que la razón consumo/producción del transporte bajó de 2,82 a 1,5 (lt/m³), lo que demuestra que el transporte externo no es una variable determinante de variaciones en consumo energético, además la tendencia es lineal a la baja.

Para el caso 2, se modificó la distribución de la electricidad, que en una primera instancia se había realizado según el volumen de producción. Para probar la sensibilidad de este método de asignación, ahora se realiza siguiendo los mismos parámetros pero se asoció el costo comercial al volumen producción. Cuyos cálculos y resultados quedan expresados en tablas 3-8 y 3-9.

Tabla 3-9: Consumo energético, sensibilizando datos de flujo eléctrico, del aserradero en estudio “madera aserrada verde” (elaboración propia, 2010)

MADERA ASERRADA VERDE		(m ³)					
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Densidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles							
Diesel (transporte externo)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	101	(MJ/m ³)	26,37%
Diesel (transporte Interno)	*	(lt)	0,840 (Kg/lt)	42,5 (MJ/Kg)	49	(MJ/m ³)	12,92%
Electricidad							
Sistema							
interconectado Central (SIC)	*	(kWh)		3,6 (MJ)	231	(MJ/m ³)	60,71%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL					381	(MJ/m ³)	

(*) Datos confidenciales.

A partir de los resultados, se observa una diferencia debido a los bajos valores comerciales de los subproductos, y el alto valor de los productos. Aunque si bien la metodología del ciclo de vida permite realizar asignaciones por costo recomienda que estas sean realizadas extremando las precauciones.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Para clarificar mejor el efecto de la sensibilización para el caso 2, en ilustración 3-12 se muestra el consumo energético frente a la sensibilización de los datos del flujo eléctrico, agregando la variable costo comercial del producto. De la gráfica puede desprenderse que la variación de energía potencial es mayoritaria a los productos de mayor venta, sin que necesariamente sean los productos que utilicen mayor consumo de energía eléctrica, por ejemplo se menosprecia la etapa de descortezado donde se obtiene la corteza que es uno de los productos con menor valor, pero de gran incidencia sobre el consumo de energía. Aunque si bien en otros subproductos la variación se condice, como por ejemplo en la viruta que asocia su consumo energético a la elaboración de madera cepillada.

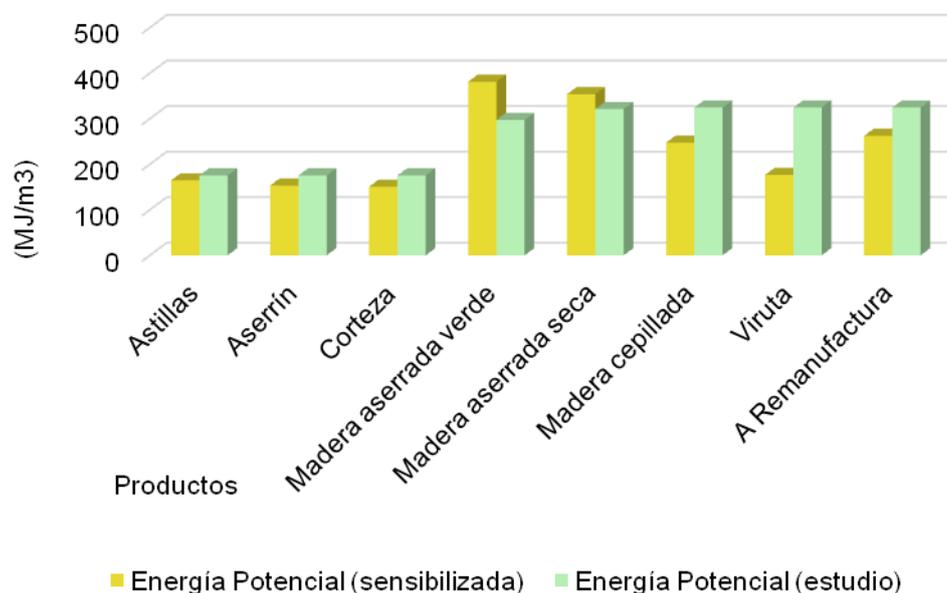


Ilustración 3-12: Sensibilización consumo energético - flujo eléctrico (elaboración propia, 2010)

3.2.1.9 Procesamiento de los datos

Para el análisis de los datos, todos los productos fueron separados por el tipo de energía utilizada ya sea energía potencial y/o energía térmica, además se expresan las cantidades de energía en sus unidades originales y luego se aplican los factores de conversión para obtener finalmente el consumo de energía por metro cúbico.

Los cálculos factores de conversión y cantidades de entradas, para el procesamiento de los datos por producto y subproducto y los resultados referidos a la energía contenida de la madera aserrada, de acuerdo a la unidad funcional del ICV.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Si bien la recopilación de datos se realizó en una sola planta, los valores de producción fueron triangulados con informes nacionales de producción forestal, en los que las variaciones porcentuales no son considerables alcanzando un máximo no superiores a 6,4% en los flujos de asignación de producto, además se debe mencionar que la asignación de producción realizada por la empresa es acorde a las necesidades de mercado, al comparar los consumos energéticos con España éstos difieren considerablemente en valor por metro cúbico, aunque la relación de distribución de flujo es constante, mientras que con estudios realizados en EE.UU. por el CORRIM, se reducen el valor de consumo por metro cúbico y se mantienen las variaciones de distribución de flujos.

Con respecto a la medida de variabilidad de los valores, esto es precisión de datos para las diferentes categorías, se calculó la media aritmética y la variación estándar de la primera parte, hasta la obtención de madera aserrada verde, ya que como se mencionó anteriormente la asignación de flujo de producción referente a los productos obtenidos posteriormente se realizó de acuerdo a los valores de mercado.

El Análisis de incertidumbre se realizó mediante simulación en la asignación de flujo, modificando una variable, en la prueba 1, Diesel (transporte interno), que presenta más del 68% del ingreso entre los rangos de 20 a 80 kilómetros, lo que redujo la relación consumo / producción de 2,8 (lt/m³) a 1,5 (lt/m³), lo que no produjo una gran variación en el consumo de energía potencia, si bien disminuyó, esta variable no es determinante dentro del estudio ya que el delta obtenido alcanza cerca del 15% en el total de energía potencial. La prueba 2 consistió en cambiar la asignación del flujo de consumo de energía eléctrica, la que estaba directamente asociada a la producción volumétrica, a una asignación en que se considera también los valores comerciales de los productos, lo que generó una dispersión mayor entre productos y subproductos debido al valor mercado que estos tienen.

Finalmente para la madera cepillada seca Pino insignie, para las condiciones del ICV realizado, se llega a establecer una energía contenida de $3,2 \times 10^3$ MJ/m³.

Para complementar la información obtenida a partir de los resultados logrados, se entrega un análisis gráfico de la distribución energética, la que fue realizada en asignación costo producción y la asignación por producción, que se muestra en la Ilustración 3-13.

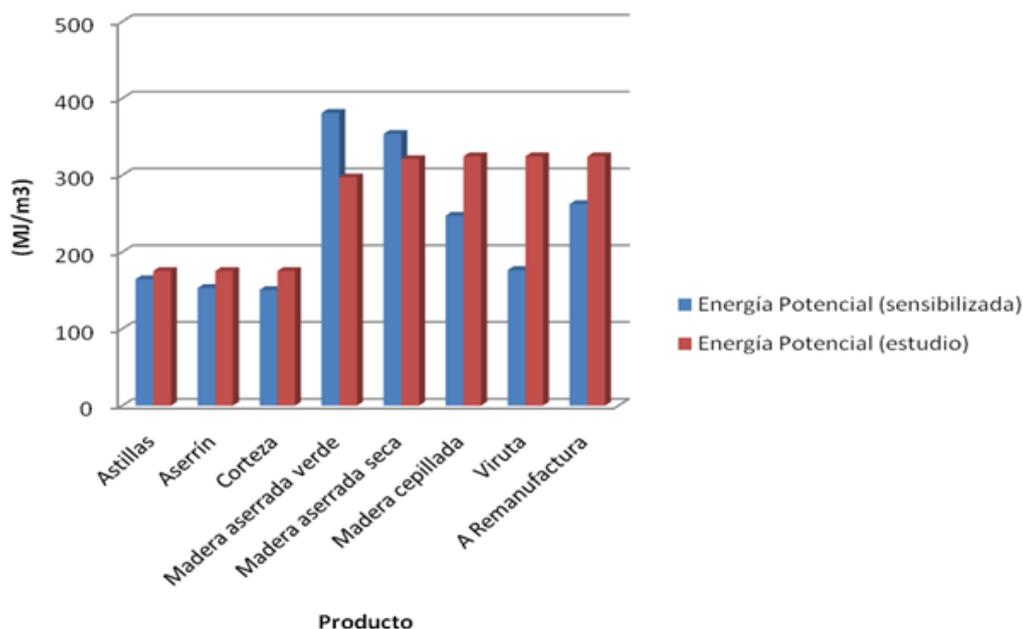


Ilustración 3-13: Comparación de distribución flujos energéticos potencial, por asignación de flujo por volumen de producción y distribución de flujo por volumen y costo (elaboración propia, 2010)

Se puede observar que cuando la distribución es solo en volumen, la distribución es lineal, la energía contenida por metro cuadrado es la misma para el aserrín, la corteza y la madera aserrada. Mientras que si la distribución es por volumen costo, se produce una sobre asignación a los productos dejando en un segundo plano los subproductos.

Por lo que si bien el contraste entre los valores obtenidos en la forma de distribuir el consumo energético es diferente, son dos formas diferentes de asignación por lo que se debe estipular claramente la elección escogida.

3.2.1.10 Cálculo Huella de Carbono

Obtenido el cálculo de la energía contenida en el proceso de producción estudiado, es posible determinar las emisiones de GEI. Al respecto (Zaror, 2002), señala una vez realizado el inventario de equipos y procesos responsables del mayor consumo de combustibles y electricidad, se debe cuantificar las emisiones asociadas.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Las emisiones de CO₂, se obtuvieron a partir del principio de la norma PAS 2050. Los valores correspondientes a los factores de emisión combustibles fósiles fueron extraídos del IPCC, 2006.

Las emisiones de CO₂ generadas por la combustión de biomasa no se consideran como parte de la Huella de Carbono, ya que los productos forestales contienen carbono presente en las moléculas de celulosa, lignina, hemicelulosas u otros compuestos orgánicos. Este carbono está secuestrado en el producto y se mantendrá en esa condición hasta que sea liberado a la atmósfera debido a combustión o descomposición biológica, este CO₂ se denomina biogénico (Zaror, 2002).

En tabla 3-10, muestran las emisiones de CO₂, para cada uno de los productos y subproductos del proceso productivo.

Tabla 3-10: Gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto de la actividad, Emisiones de CO₂ (elaboración propia, 2010)

ASTILLAS		74.985	(m3)			
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte externo)	101	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	7,45	(Kg CO ₂ /m3)	51,6%
Diesel (transporte Interno)	49	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m3)	24,9%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	26	(MJ/m3)	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	3,39	(Kg CO ₂ /m3)	23,5%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL	175	(MJ/m3)		14,44		100%
ASERRÍN		29.546	(m3)			
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte externo)	101	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	7,45	(Kg CO ₂ /m3)	51,6%
Diesel (transporte Interno)	49	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m3)	24,9%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	26	(MJ/m3)	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	3,39	(Kg CO ₂ /m3)	23,5%

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

TOTAL ENERGÍA POTENCIAL						
	175			14,44		100%
CORTEZA	42.829	(m3)				
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte externo)	101	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	7,45	(Kg CO ₂ /m3)	51,6%
Diesel (transporte Interno)	49	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m3)	24,9%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	26	(MJ/m3)	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	3,39	(Kg CO ₂ /m3)	23,5%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL						
	175	(MJ/m3)		14,44		100%

MADERA ASERRADA VERDE						
	66.830	(m3)				
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte externo)	101	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	7,45	(Kg CO ₂ /m3)	24,7%
Diesel (transporte Interno)	49	(MJ/m3)	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m3)	11,9%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	148	(MJ/m3)	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	19,12	(Kg CO ₂ /m3)	63,4%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL						
	297	(MJ/m3)		30,17		100%

MADERA ASERRADA SECA AL MERCADO						
	34.486	(m3)				
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte	101	MJ/m3	0,0741 (Kg	7,45	(Kg CO ₂ /m3)	23,3%

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

externo)			CO ₂ /MJ			
Diesel (transporte Interno)	49	MJ/m ³	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m ³)	11,3%
Diesel (consumo caldera)	24	MJ/m ³	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	1,76	(Kg CO ₂ /m ³)	5,5%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	148	MJ/m ³	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	19,12	(Kg CO ₂ /m ³)	59,9%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL	321	(MJ/m³)		31,93		100%
Combustibles renovables						
Combustible de madera (Biomasa)	2.954	(MJ/m ³)	-	0,00	(Kg CO ₂ /m ³)	
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA	2.954	(MJ/m³)		0,00		0,00%
TOTAL GENERAL ENERGÍA	3.275	(MJ/m³)		31,93		100%
MADERA CEPILLADA	14.462	(m³)				
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte externo)	101	MJ/m ³	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	7,45	(Kg CO ₂ /m ³)	23%
Diesel (transporte Interno)	49	MJ/m ³	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m ³)	11,1%
Diesel (consumo caldera)	24	MJ/m ³	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	1,76	(Kg CO ₂ /m ³)	5,4%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	152	MJ/m ³	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	19,58	(Kg CO ₂ /m ³)	60,5%
TOTAL ENERGÍA	325	(MJ/m³)		32,38		100%

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

POTENCIAL						
Combustibles renovables						
Combustible de madera (Biomasa)	2.954	(MJ/m3)	-	0,00	(Kg CO ₂ /m3)	
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA	2.954	(MJ/m3)		0,00		0,00%
TOTAL GENERAL ENERGÍA	3.279	(MJ/m3)		32,38		100%

VIRUTA	11.186	(m3)				
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Cantidad	Unidad	%
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte externo)	101	MJ/m3	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	7,45	(Kg CO ₂ /m3)	23%
Diesel (transporte Interno)	49	MJ/m3	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m3)	11,1%
Diesel (consumo caldera)	24	MJ/m3	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	1,76	(Kg CO ₂ /m3)	5,4%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	152	MJ/m3	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	19,58	(Kg CO ₂ /m3)	60,5%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL	325	(MJ/m3)		32,38		100%

Combustibles renovables						
Combustible de madera (Biomasa)	2.954	(MJ/m3)	-	0,00	(Kg CO ₂ /m3)	
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA	2.954	(MJ/m3)		0,00		0,00%
TOTAL GENERAL ENERGÍA	3.279	(MJ/m3)		32,38		100%

A REMANUFACTURA	24.844	m3				
Tipo de combustible	Cantidad	Unidad	Factor de	Cantidad	Unidad	%

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

conversión						
Combustibles fósiles						
Diesel (transporte externo)	101	MJ/m3	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	7,45	(Kg CO ₂ /m3)	23 %
Diesel (transporte Interno)	49	MJ/m3	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	3,60	(Kg CO ₂ /m3)	11,1%
Diesel (consumo caldera)	24	MJ/m3	0,0741 (Kg CO ₂ /MJ)	1,76	(Kg CO ₂ /m3)	5,4%
Electricidad						
Sistema interconectado Central (SIC)	152	MJ/m3	0,129 (Kg CO ₂ /MJ)	19,58	(Kg CO ₂ /m3)	60,5%
TOTAL ENERGÍA POTENCIAL	325	(MJ/m3)		32,38		100%
Combustibles renovables						
Combustible de madera (Biomasa)	2.954	(MJ/m3)	-	0,00	(Kg CO ₂ /m3)	
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA	2.954	(MJ/m3)		0,00		0,00%
TOTAL GENERAL ENERGÍA	3.279	(MJ/m3)		32,38		100%

En la Ilustración 3-14, se representa la relación entre la huella de carbono y las actividades productivas analizadas.

A partir de la gráfica puede observarse que las emisiones de CO₂ a la atmosfera se mantienen constantes hasta la entrada (madera aserrada verde) al aserradero, producto del consumo masivo de energía eléctrica.

La energía eléctrica es de gran incidencia dentro del proceso ya que representa un alto valor de emisiones por (kWh), aunque si bien la diferencia entre la SIC (sistema interconectado central) que tiene un factor de emisión 2,3 veces menor que el SING (sistema interconectado del norte grande). Por lo que cualquier aserradero conectado al SING duplicaría sus emisiones de CO₂.

Al respecto, para este proceso productivo una de las principales formas de disminuir las emisiones de CO₂ es la generación propia de energía mediante el uso de RAE (residuos aprovechables energéticamente) BIOMASA, ya que con esta se potencia el procesos de secado y se puede generar energía eléctrica.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

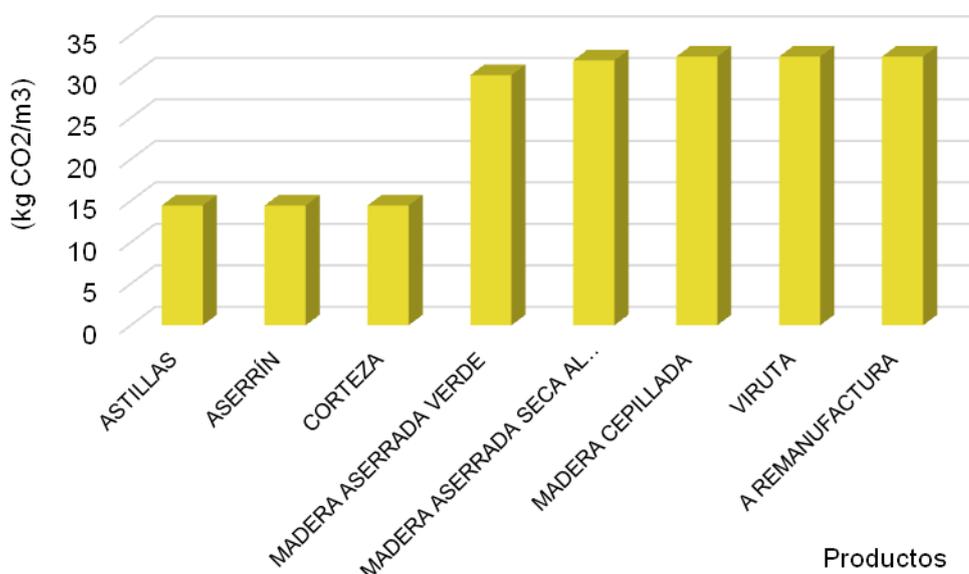


Ilustración 3-14: Gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto de la actividad, Emisiones de CO₂

A partir de la lustración gráfica se puede observar que las emisiones de CO₂ a la atmosfera se mantienen constantes, hasta la entrada al aserradero producto del consumo masivo de energía eléctrica, esta es de gran incidencia dentro del proceso ya que representa un alto valor de emisiones por (kWh). Aunque si bien la diferencia entre la SIC (sistema interconectado central) que tiene un factor de emisión 2,3 veces menor que el SING (sistema interconectado del norte grande), Por lo que cualquier aserradero conectado al SING duplicaría sus emisiones de CO₂.

Además de mencionar que una de las principales formas de disminuir las emisiones de CO₂ es la generación propia de energía mediante el uso de RAE (residuos aprovechables energéticamente) BIOMASA, ya que con esta se potencia el procesos de secado y se puede generar energía eléctrica.

3.2.1.11 Validación de datos

Del mismo modo que se triangularon valores para el cálculo de le energía contenida, se utilizan los mismos casos estudio e España y EEUU, para la validación de los valores obtenidos de emisiones de CO₂. Considerando la misma metodología y límites de sistema por lo que se compara sobre una base común (ver tablas 3-11 y 3-12).

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-11: Energía acumulada para la producción de 1 (m3) de madera cepillada, seca blanda, realizados por el CORRIM (Puetmann et al., 2009)

Tipo de energía	CORRIM Fase I
	Pacífico Noreste
	(MJ/m3)
Gas Natural	1.344
Biomasa (residuos madereros)	1.592
Hidroelectricidad	200
Petróleo crudo	91
Carbón	95
Uranio	39
Otros tipos de energía	3
TOTAL	3.364

Tabla 3-12: Emisiones de CO₂ para el proceso de producción de madera cepillada seca, realizados por el CORRIM, en el Pacífico noroeste (Puetmann et al., 2009)

	Dióxido de Carbono
	(Kg CO ₂)
Cancha de trozos	2,52
Aserradero	4,08
Secado	58,52
Cepillado	6,58
Total	71,7

A modo de comparación primero se presenta la distribución del consumo energético del estudio realizado por el CORRIM.

Las emisiones de CO₂ están directamente asociadas al consumo energético, por lo que como se puede observar el proceso de secado genera más del 80% del total de emisiones esto producto de la utilización de gas natural ya que la biomasa se informa aparte como CO₂ biogénico.

Como se puede observar existe una gran diferencia, mayor al doble, esto se debe mayoritariamente a la utilización de Gas Natural en los procesos de secado de la madera del estudio realizado por el CORRIM. Ya que este debe ser considerado a la hora de realizar la sumatoria, no así en el aserradero en estudio en que utiliza solo Biomasa en el proceso de secado.

3.2.1.12 Síntesis ICV madera seca aserrada seca

En definitiva se obtuvieron valores de consumo energéticos del orden de 3.279 (MJ/m³) y de 31,93 Kg CO₂/m³ para las emisiones de GEI, en comparación a valores de 3.945 (MJ/m³) y 24,94 CO₂/m³ respectivamente, con estudios realizados por el CORRIM en el sureste de EE.UU. Utilizando la misma metodología (ACV), lo que demuestra que los procesos productivos de la industria de la madera en estudio, están dentro de rangos internacionales de países desarrollados.

Hay ciertas consideraciones metodológicas que se tomaron en cuenta para realizar esta investigación, en una primera etapa, la forma en que se realizó la recolección de datos, los supuestos realizados y el tratamiento de los datos, mientras que en una segunda etapa se designaron las formas y supuestos en la asignación de flujos, para realizando triangulaciones con otros estudios.

Un punto relevante a destacar, es el porcentaje de energía térmica utilizada en los procesos de secado los que alcanzan valores sobre el 90% del consumo total de energía, lo que muestra los altos poderes caloríficos de los residuos de la madera, por lo que su utilización como subproducto biomásico es una acción determinante en el ahorro energético y la disminución de GEI.

3.2.2 Cemento

El consumo y producción de cemento están directamente relacionados con la dinámica del sector de la construcción y, por tanto, con la coyuntura económica local y mundial.

El informe del *The European Cement Association* para el año 2011, señaló que el crecimiento de la producción del cemento a nivel mundial, alcanzó cifras de alrededor de 3.600 millones de toneladas, monto que significó un crecimiento del 7.6% respecto al 2010. Estimándose para el año 2012, un consumo mundial de cemento de 3.859 Mt.

Si se hace un análisis del consumo per cápita de cemento en nuestro país comparado con el resto del mundo, Chile está bastante por debajo de lo que teóricamente corresponde a nuestro nivel de ingreso. Hoy estamos alrededor de los 270 a 280 kilos por habitante, y si uno hace una proyección para un país que tiene un ingreso per cápita de US\$ 15.000, debiera estar entre los 350 a 450 kilos.

El mercado cementero chileno el año 2012, alcanzó un tamaño de seis millones de toneladas de consumo y según cifras del Instituto Chileno del Cemento del Hormigón, los despachos mensuales son del orden de 4.400.000 toneladas de cemento (ICH, 2012). Si se

proyecta en forma sostenida el crecimiento económico en Chile, podría estimarse que el consumo de cemento nacional podría llegar a 7,5 millones de toneladas, a fines del año 2014.

Con respecto a la definición del material cemento, puede señalarse que el cemento es un material inorgánico, no metálico, finamente molido que cuando se mezcla con agua y áridos forma una pasta que fragua y endurece morteros y hormigones (Romay, 1994). Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados como resultado de una reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Esta propiedad de conglomerante hidráulico le ha convertido en un material básico de construcción, imprescindible para la edificación y la realización de infraestructuras.

Este material es obtenido mediante un proceso de fabricación que utiliza principalmente dos materias primas: caliza, con alto contenido de cal en forma de óxidos de calcio, y un componente rico sílice, constituido normalmente por arcilla o eventualmente por una escoria de alto horno.

Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio, del cual se obtiene un material granular denominado clínker, constituido por cuatro elementos básicos: Silicato bicálcico (C3S), Silicato bicálcico (C2S), Aluminato tricálcico (C3A) y Ferroaluminato tetracálcico (C4AF) (Zabaleta, 1988).

El clínker, una vez enfriado, se mezcla con una pequeña cantidad de yeso, para regular el fraguado, y la mezcla se muele para obtener el cemento, finalizando así el proceso de fabricación. Las distintas calidades de cemento se obtienen con la adición de materiales como caliza, cenizas volantes, puzolanas, escorias de alto horno, etc., lo que permite alcanzar determinadas características para su uso.

En el proceso de fabricación de cemento, pueden diferenciarse tres etapas básicas

Obtención y preparación de materias primas (caliza, marga, arcilla), que aportan los siguientes compuestos minerales: carbonato cálcico (CaCO_3), óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). que son finamente molidas para obtener crudo.

Cocción del crudo en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1.450 °C (2.000°C de temperatura de llama) para la obtención de un producto semielaborado (intermedio), denominado Clinker de cemento.

Molienda conjunta del Clinker con otros componentes yeso (regulador de fraguado) y adiciones (escorias de alto horno, cenizas volantes, caliza, puzolanas), para dar lugar a los distintos tipos de cemento.

En función de cómo se procesa el material antes de su entrada en el horno de clinker, se distingue cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semi-seca, vía semihúmeda y vía húmeda.

En el proceso vía seca, mayoritario en Chile, la materia prima es introducida en el horno en forma seca, pulverulenta. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno rotatorio. El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completo antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).

3.2.2.1 Principales impactos ambientales asociados al proceso de fabricación del cemento

-Consumo energético

La fabricación de cemento es un proceso intensivo en energía. En función de las materias primas y el proceso de fabricación, el consumo de combustibles en el horno de clinker se sitúa entre 3.000 y 5.500 MJ/t de clinker.

Los costos energéticos de combustible y energía eléctrica suman más del 30 % de los costos de fabricación, por lo que la reducción del consumo de energía y la diversificación de las fuentes energéticas son factores clave para la competitividad de las empresas cementeras.

-Emisiones del Horno de Clinker

Las emisiones a la atmósfera provenientes del horno de cemento tienen su origen en las reacciones químicas y físicas provocadas por la cocción de las materias primas, y en los procesos de combustión.

El proceso de fabricación de clinker en el horno rotatorio no genera residuos ni vertidos de agua. Antes de ser emitidos a la atmósfera, los gases de combustión provenientes de los hornos de clinker atraviesan los ciclones donde transmiten parte del calor a la harina de crudo entrante, que en las etapas más cercanas al horno ha sido descarbonatada y se compone principalmente de cal.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Los constituyentes principales de los gases emitidos por el horno de cemento son nitrógeno (N₂) proveniente del aire de combustión (45-66% en volumen), Dióxido de Carbono (CO₂) proveniente de la descarbonatación de la caliza y de la combustión (11-29% en volumen), vapor agua proveniente de las materias primas y del proceso de combustión, y oxígeno (4-12% en volumen).

Los gases emitidos a la atmósfera contienen también en pequeña proporción partículas, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, y en muy pequeña cantidad cloruros, fluoruros, compuestos orgánicos y metales pesados.

3.2.2.2 Inventario ambiental proceso fabricación cemento (ICV- Cemento).

Objetivo: determinación energía contenida en el proceso de fabricación de cemento siderúrgico.

Alcance del estudio: Planta cementera Región del Biobío, ubicada en la comuna de Talcahuano. La única planta de cemento siderúrgico en Chile, capacidad instalada 1.000.000 ton/año. Cuya producción representa el 40% de la producción total nacional de cemento (ICH, 2010).

Unidad funcional: 1 ton cemento siderúrgico.

Flujo de referencia: MJ/ ton cemento.

Límites del sistema: (De la cuna a la puerta), considera extracción y transporte de materias primas, por tener influencia mayor en el consumo energético y emisiones de CO₂, no así el transporte interno por tener poca influencia para el caso singular de la planta en estudio. Para el proceso productivo, fueron considerados los dos procesos con mayor consumo energético y emisiones de CO₂ (según lo señalado en punto 3.2.2.1).

-Criterios inclusión de datos: Se consideraron en su gran mayoría, datos primarios obtenidos a partir de información entregada por el Dpto. de Ingeniería y desarrollo de la industria cementera evaluada. La información tiene una cobertura de tiempo de tres años, específicamente se entregaron los datos correspondientes a la producción de cemento para los años 2007, 2008 y 2009.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

*Nota: Recordar que para el año 2010, los cálculos no hubieran sido representativos, dado que ocurrió el terremoto 27F y las instalaciones sufrieron daños que afectaron sus procesos productivos.

Con respecto a la inclusión de los datos utilizados en el ICV, es necesario indicar que para no contabilizar dos veces los inputs energéticos, estos fueron considerados de acuerdo a una secuencia lógica referida a un desarrollo del proceso productivo, según queda expresado en diagrama de flujo (Ilustración 3-15).

Dada la importante cantidad de datos que son necesarios ingresar para la realización del inventario (ICV), así como el procesamiento e interpretación de ellos, se utilizaron hojas de cálculo, desarrolladas por la Iniciativa para la sustentabilidad del cemento (CSI) sector del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD), desarrollada específicamente para este tipo de procesos productivos.

Con respecto a la recolección de datos, la norma Británica PAS 2050- 2011: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services, indica que para calcular la huella de carbón; “Los datos pueden ser primarios, originados por medición directa de forma interna o por terceros en cualquier punto de la cadena de producción; o secundarios, que provienen de mediciones externas que no son realizadas en forma específica al producto”.

Validación de los resultados: Dado que para el caso de Chile no se cuenta con información disponible referida a consumos energéticos para este tipo de procesos ni tampoco a las emisiones de CO₂. A partir de los resultados obtenidos se realizan análisis comparativos entre los datos de entradas y salidas de distintos inventarios del ciclo de vida de la producción de cemento, internacionalmente disponibles, y los puntos de vista determinantes a la hora de valorar sus aspectos medioambientales. En Anexo (tablas A1, A2 y A3), se muestran tablas de los cementos utilizados para los inventarios internacionales, dichas tablas son tomadas como referencia del estudio doctoral de (Cavalho, 2000), realizada a partir de la información disponible en SimaPro y CEMBEREAU (The European Cement Association). La información ha sido resumida para poder analizar los dos subsistemas principales: producción de clínker y producción de cemento.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

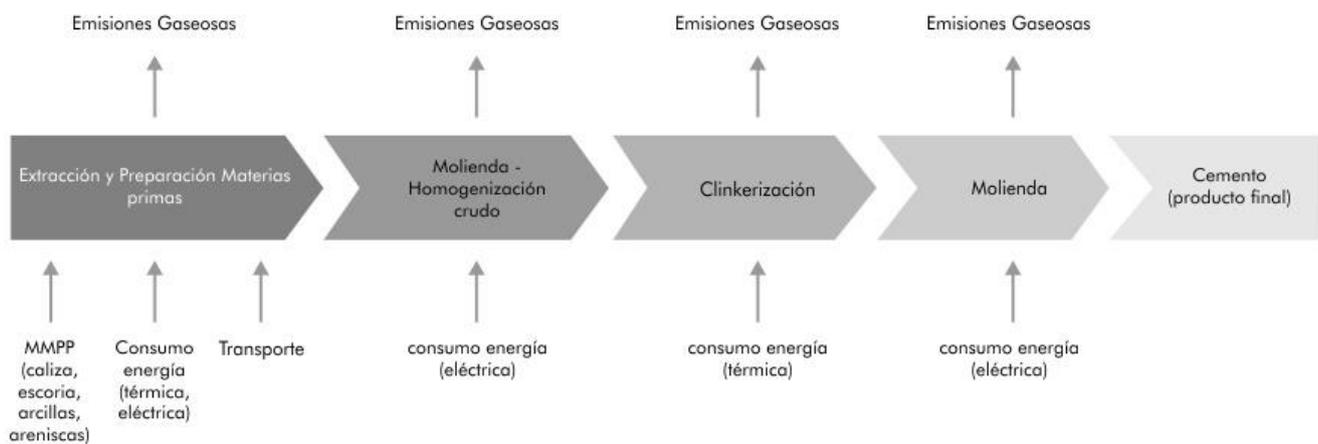


Ilustración 3-15: Diagrama de Flujo proceso fabricación estudiado (elaboración propia, 2010)

Las entradas y salidas consideradas para el ICV, del Sistema estudiado son:

Entradas: Para el Sistema estudiado, las entradas estarán compuestas por materias primas, combustibles, energía térmica y energía eléctrica. Detalladamente se tiene:

A1) Combustibles para traslado de materias primas y combustibles utilizados en el Sistema estudiado.

A2) Materias primas: piedra caliza, escoria alto horno, arenisca, laminilla, yeso.

A3) Combustibles (energía térmica y energía eléctrica): fósiles y energía eléctrica (SIC).

salidas : Con la finalidad de simplificar los resultados y la interpretación de ellos, también son consideradas salidas intermedias, las cuales corresponden a resultados de procesos o subsistemas intermedios con mayor relevancia desde el punto de vista del consumo energético y emisiones de CO₂ (Carvalho, 2001):

- B1) Clinker (salida intermedia).
- B2) Cemento siderúrgico (producto - salida final).
- B3) Emisiones de CO₂ (para proceso de clinkerización).
- B4) Emisiones de CO₂ (para proceso completo).

Dada la dificultad de obtener información primaria referida a la primera fase del ciclo de vida estudiado. Los datos de la determinación de los consumos de producción y emisiones de CO₂ asociadas tanto a la extracción de materias primas (específicamente caliza) como de energía térmica (combustible fuel oil y diésel). Se consideran los valores indicados por el (Sustainability Report, 2009), señalados en tabla 3-13.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-13: Factores de producción de materias primas y combustible (elaboración propia, 2010)

Materia Prima o combustible.	Referencia de producción
Caliza	3,33 kgCO ₂ /ton (Extracción material)
	12,86 kWh/ton (Consumo eléctrico por extracción)
Fuel Oil	240 KgCO ₂ /ton crudo procesado, Sustainabilty Report 2009, BP.
	0,25 ton Fuel Oil/ton crudo procesado.
Diesel	240 KgCO ₂ /ton crudo procesado, Sustainabilty Report 2009, BP.
	0,25 ton Fuel Oil/ton crudo procesado.

Dado que la materia prima; escoria de alto horno y laminilla, son consideradas un residuos de otro procesos productivo (fabricación de acero de la Compañía de Acero del Pacífico), como así mismo el combustible petcoke obtenido del proceso de refinación de petróleo (Refinerías ENAP). No se les ha asignado valor a la carga ambiental que ello conlleva para el Sistema estudiado (fabricación cemento).

3.2.2.3 Resultados Recolección Datos:

A. Entradas:

-A1: Consumo de combustible asociadas al transporte de materias primas y combustibles utilizados asociado al proceso productivo estudiado.

Por razones de confidencialidad de información, no es posible entregar el detalle de los consumos diésel por concepto de transporte de materias primas y combustibles, pero como una manera de mostrar la injerencia de cada uno de ellos, en tabla 3-14 se muestra un análisis porcentual de la participación de estos para proceso de producción de una tonelada de cemento siderúrgico al año.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-14: Detalle consumo diésel por transporte MMPP y combustible, (elaboración propia, 2010)

Detalle del consumo diesel por transporte de materias primas y combustible			Promedio % participación 3 años
	Transporte de:	[Ton/año]	
1	Caliza, diesel barco carguero	[Ton/año]	14,7
2	Caliza, petróleo diesel camión	[Ton/año]	3,3
3	Escoria, petróleo diesel camión	[Ton/año]	3,8
4	Arenisca, petróleo diesel camión	[Ton/año]	1,0
5	Laminilla, petróleo diesel camión	[Ton/año]	0,1
6	Yeso, petróleo diesel camión	[Ton/año]	35,8
7	Petcoke, petróleo diesel camión	[Ton/año]	39,5
8	Fuel oil, petróleo diesel camión	[Ton/año]	1,9
9	Diesel, petróleo diesel camión	[Ton/año]	0,0

A partir de la información de tabla 3-17 se desprende que los mayores consumos de diésel para transporte de materias primas y combustibles, están dados para el yeso y el petcoke, con un % de participación de 35,8% y 39,5% respectivamente.

Llama la atención que el insumo que aporta la mayor incidencia en el consumo de combustible asociado a su traslado sea el yeso y no la caliza, la cual es extraída y trasladada desde Isla Guarelo - Región de Magallanes Chile. Considerando para dicho cálculo una distancia del orden de 1700 Km, hasta el Puerto de Talcahuano. Antagónicamente al caso del yeso, el cual es extraído y trasladado desde el Cajón del Maipo (aprox. 600 Km hasta Talcahuano).

Al respecto hay que señalar, que la materia prima correspondiente a la caliza, es trasladada en barco y ello considera una capacidad de carga mayor, considerando la capacidad de un barco carguero tipo de M35 ton. Valor lejano a la capacidad de carga de un camión (considerado para este caso) de 30 ton. De este modo claro está que habrán más viajes al año para el traslado de este material, por lo tanto mayor consumo de combustible asociados a ese proceso. Factor que también será incidente para los cálculos de la huella de carbono asociado a ello.

Con respecto al porcentaje de participación del consumo de combustible por traslado de petcoke (casi un 40% del total), señalar que para los años que se realizó el estudio (2007, 2008 y 2009), el Petcoke era trasladado desde la planta ENAP de Concón, Región de Valparaíso distancia aproximadamente de 600 Km (solo de ida).

Aumentando considerablemente los traslados de combustible si se compara con lo que sucede actualmente, ya que desde el año 2010 el petcoke se traslada desde refinería de Talcahuano (aprox. 5 Km desde la planta cementera).

-A2: Materias Primas.

Al igual que en punto A1, no es posible dar detalles exactos de las cantidades de materias primas que entran al sistema productivo, específicamente para la fase de preparación de crudo y precalentamiento en seco.

Sin embargo en Ilustración 3-16, se muestra la representación gráfica del consumo total de materias primas, para producir una tonelada de cemento siderúrgico al año.

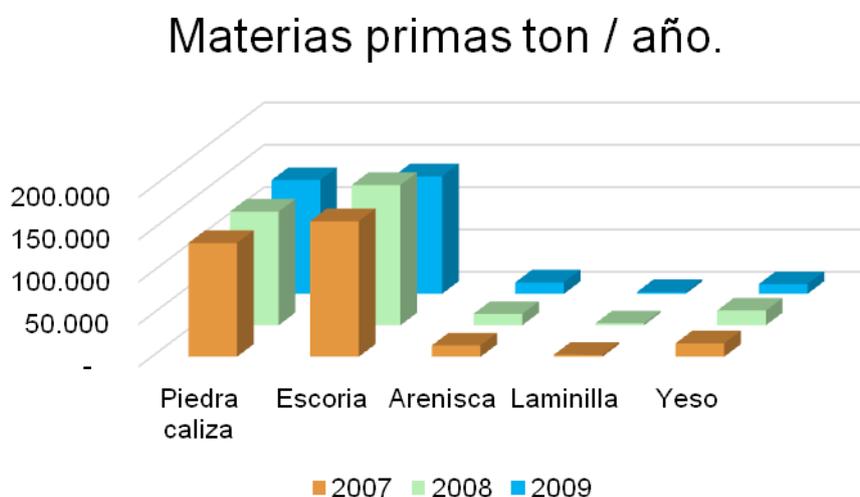


Ilustración 3-16: Consumo total de materias primas (elaboración propia, 2010)

De la gráfica se desprende que los mayores consumos de materias primas están dados por la piedra caliza y escoria siderúrgica, con diferencias notables, con respecto al total de las materias primas. Esto debido principalmente, a que son los componentes primordiales para el proceso de fabricación del Clinker y cemento propiamente tal.

Al respecto y como una manera de entregar valores cuantitativos, se analiza el consumo de materias primas señaladas en tabla A-1 del Anexo de la presente tesis, se tiene que para los cementos siderúrgicos señalados allí (Blastfurnace slag cement NL1 Y NL2) las materias primas con mayor porcentaje de participación son la Marga (caliza) y escoria, en porcentajes del orden de un 28 y 70% respectivamente para NL1 y de un 42% y 67,5% para un NL 2 (similar al del caso

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

estudiado). Distribuciones que muestran la tendencia del porcentaje de participación de estas materias primas en la fabricación de cemento siderúrgico.

-A3: Combustibles (energía térmica y energía eléctrica).

El análisis para la información vinculada al consumo de combustibles del proceso productivo, se aborda mostrando los inputs totales (tanto de combustibles fósiles y energía eléctrica) y posteriormente la información se desagrega por subsistemas, como una forma de evidenciar en qué subprocesos se generan los mayores consumos de combustibles.

En Ilustración 3-17, se muestra la distribución de participación de combustibles fósiles por tonelada al año, para la producción de cemento siderúrgico.

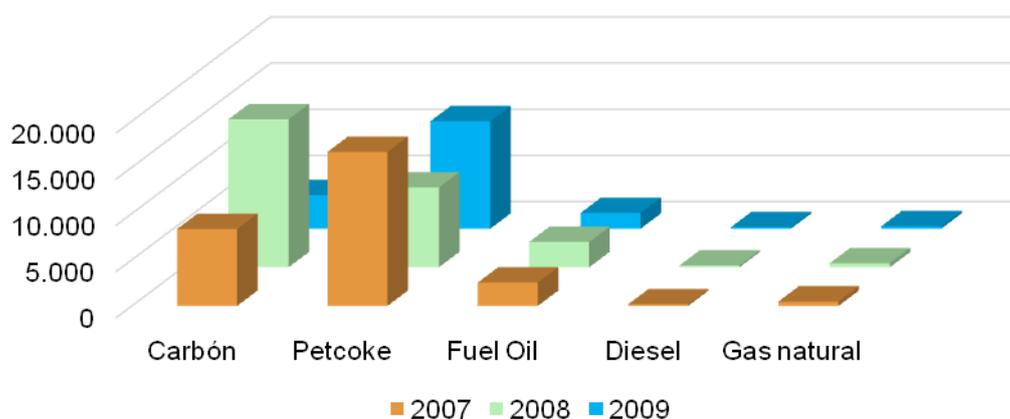


Ilustración 3-17: Consumo total de combustibles ton/año (elaboración propia, 2010)

En Ilustración 3-18, se muestra el consumo de electricidad asociado al proceso productivo para los años 2007, 2008 y 2009. Esta información solo considera los consumos asociados a los procesos productivos.

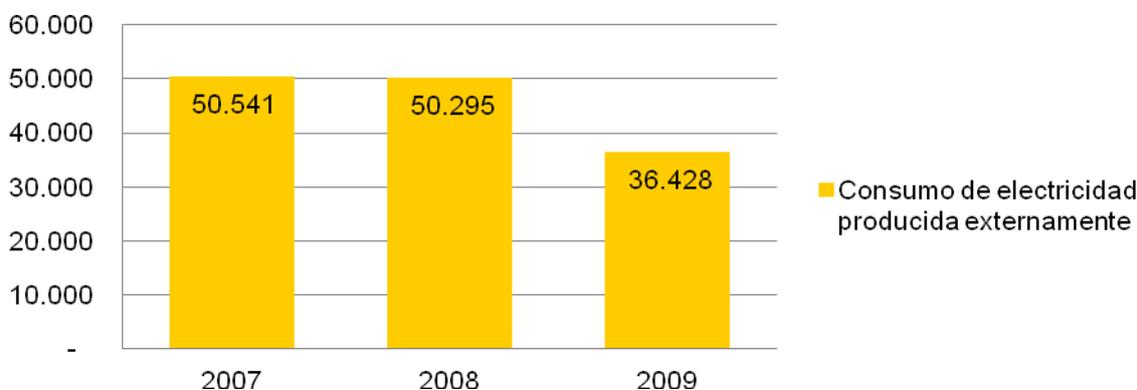


Ilustración 3-18: Consumo electricidad SIC proceso productivo (elaboración propia, 2010)

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

A partir de la información expresada en las gráficas, se desprende que para el caso de los combustibles fósiles, el carbón y petcoke, son los que tienen mayor participación en el proceso productivo. No explicitando a cuál proceso o subsistema se hace referencia ya que se ha representado el consumo para el total del proceso. Sucediendo lo mismo con la información referente al consumo eléctrico, además, no se establece cuál es la injerencia de un tipo de energía con respecto a la otra (energía térmica vs energía eléctrica).

De este modo para detallar y comprender mejor esta distribución, y tal como señala la ISO 14042, en punto 5.3, para el estudio de la energía consumida se recomienda elegir uno de los parámetros más relevantes para el chequeo de fiabilidad de los inventarios empleados en el ACV de un producto o un proceso (Carvalho, 2001).

De esta forma los datos de consumos de combustibles señalados, fueron desagregados para los siguientes subsistemas, que representan los mayores consumos energéticos (Carvalho, 2001), del proceso productivo estudiado:

- ✓ Consumos de combustibles del proceso de calcinación del crudo - dentro horno (formación de Clinker).

Consumos de combustibles de procesos fuera del horno (secado de materias primas y componentes minerales).

Dicho de otro modo la energía total utilizada se desagrega en eléctrica, aportada por el SIC y utilizada principalmente en los procesos de pre homogenización de materias primas y molienda, y la energía térmica principalmente utilizada en el horno de fabricación del Clinker y suele utilizar recurso fósiles fuel, carbón, petcoke y otros.

El total de inputs para el consumo de combustible para los dos subsistemas señalados, por razones de confidencialidad se muestran como promedio para los años 2007, 2008 y 2009, los cuales alcanzan valores de 25.427, 25.663 y 15.479 ton/año, respectivamente.

A partir de los datos entrada se deduce que comparativamente entre los dos subsistemas, el mayor consumo en ton/año, está asociado al proceso de consumo de combustible dentro del horno (proceso de clinquerización), representado un 95% del total, un porcentaje bastante alto que da cuenta de la relevancia de este subsistema desde el punto de vista del consumo de combustibles, punto que será analizado en la conclusiones del presente capítulo.

Con respecto a los combustibles con mayor participación en el proceso de clinquerización, estos corresponden principalmente a carbón y coque de petróleo, con un porcentaje de participación aprox. de 42% y 55%.

Es importante señalar que estas distribuciones no pueden ser generalizadas, en términos que los tipo de combustibles van a estar definidas por condiciones económicas (precio) y de disponibilidad del recurso (restricciones de distribución, por ej. GNL). Al respecto al comparar los años 2007 y 2008, se tiene que para órdenes de magnitud similares en el total de consumos combustibles para la producción anual de cemento, las cifras para los combustibles carbón y petcoke, sufren una variación importante, es decir para los años señalados la cantidad de combustibles se reducen y duplican respectivamente; carbón año 2007, 8.324 ton/año y año 2008 16.018 ton/año. Lo mismo para el coke de petróleo; año 2007, 16.661 ton/año y año 2008, 8.650 ton/año. Este análisis puede ser realizado para cada uno de los combustibles señalados, ya que existe una variación en el consumo de ellos, de acuerdo a las externalidades señaladas.

- B. Salidas

Tal como fue señalado anteriormente las salidas son desagregadas de acuerdo a los subsistemas que tienen mayor relevancia desde el punto de vista del consumo energético y emisiones de CO₂.

Así y dado que por razones de confidencialidad de información solicitada, sólo se entregan valores promedios para los años 2007, 2008 y 2009 de estas producciones, de tal modo se tiene que para Clinker (*salida intermedia B1*) una producción promedio de 225.990 ton/año y para cemento (*salida final producto B2*) una producción promedio de 360.570 ton/año.

Como una forma de complementar esta información y evidenciar la participación de los subsistemas y productos señalados. En Ilustración 3-19, se muestra el detalle de las salidas señaladas (*Clinker y cemento como producto final*).

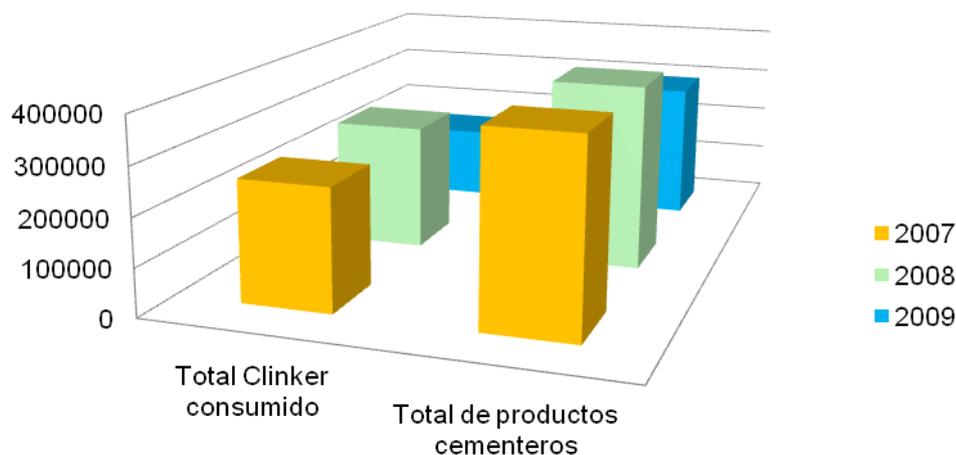


Ilustración 3-19: Salidas productos - proceso producción cemento (elaboración propia, 2010)

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

A partir de la representación gráfica, se observa claramente que las cantidades anuales de Clinker son menores a las cantidades respectivas producidas de cemento. Esto dado principalmente porque el cemento siderúrgico, resulta de la molienda conjunta de Clinker, yeso y una adición de escoria seca, para lo cual según NCh148, puede estar comprendida en una rango entre un 30% y 75%. Lo que hace que la participación de clínquer sea menor, con respecto a las diferentes composiciones de cementos (según lo establecido por norma ENV-197-1). De este modo, al analizar la composición del cemento siderúrgico, claramente se está haciendo referencia a un cemento que comparativamente con un Portland tipo I, (cuya composición puede considerar un rango de participación de Clinker, entre un 95% y 100%). Se está frente a un cemento con importantes potenciales de reducción de consumo energético y emisiones de CO₂, y tal como se observa a partir de los resultados obtenidos, presenta un mejor desempeño ambiental.

3.2.2.4 Cálculo Energía Contenida y Emisiones de CO₂

A partir de la información obtenida en el inventario ICV, principalmente las entradas de tipo y cantidad de combustibles para todo el Sistema estudiados, se determinó la energía contenida y las emisiones de CO₂ para el proceso productivo fabricación de cemento.

Para estos cálculos fueron considerados los valores caloríficos de los combustibles utilizados y los factores de emisión de dichos combustibles, a partir de las directrices del IPCC 2006. Resumidos en tablas A-6 y A-7 del Anexo de la presente tesis.

Para el caso de las emisiones asociadas al consumo energético se utilizaron los factores de emisión obtenidos por el proyecto Fondef D06I1060 (Vega y Zaror, 2010), los cuales se muestran en tabla A- 9 del Anexo del presente documento.

En tabla 3-15; se muestra un resumen de los resultados obtenidos a partir del ICV, en la determinación de la energía contenida obtenida en (MJ/ton) por año de producción.

Tabla 3-15: Total energía consumida en la planta (elaboración propia, 2010)

TOTAL DE CONSUMO ENERGÉTICO DE LA PLANTA				
	Unidad	2007	2008	2009
Combustibles y energía eléctrica	TJ/Año	1.107,9	1.042,6	713,9

Para el cálculo del consumo total de la planta fueron considerados todos los consumos energéticos de los subsistemas y los tipos de energía presente, térmica y eléctrica.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Finalmente, a partir de la información referida al total del consumo energético, se puede obtener la energía contenida en MJ/ton, dividiendo los resultados por la producción anual de cemento, obteniendo los valores indicados en tabla 3-16.

Tabla 3-16: energía contenida por año de producción (elaboración propia, 2010)

Año	Energía Contenida	Unidad
2007	2.801,5	MJ/Ton
2008	2.665,5	MJ/Ton
2009	2.432,2	MJ/Ton

Obteniendo una energía incorporada promedio para los tres años en estudio de 2.632,7 MJ/Ton.

Con respecto al cálculo de las emisiones de CO₂, y siguiendo los aspectos metodológicos establecidos en la normativa PAS 2050, se ha hecho una diferenciación entre lo que son las emisiones directas e indirectas.

De este modo para este *Sistema* estudiado se establecen como *emisiones directas* (alcance 1, controladas por la empresa), para este caso aquellas emisiones de CO₂ generadas en los procesos de: calcinación de materias primas, uso de combustibles en el horno, uso de combustibles fuera del horno. Detalle de resultados en tablas 3-17 y 3-18.

Tabla 3-17: Emisiones CO₂ por uso de combustible en el horno (elaboración propia, 2010)

CO2 del los combustibles del horno			Promedio 3 años
	Carbón + antracita + carbón de desecho	[t CO2/año]	23.239
	coke de petróleo	[t CO2/año]	38.558
	Combustible pesado (ultra)	[t CO2/año]	1.426
	Petróleo diesel	[t CO2/año]	539
	gas natural	[t CO2/año]	203
	esquisto (Pizarra)	[t CO2/año]	
	lignito	[t CO2/año]	
	Total Emisiones - Combustibles fósiles convencionales	[t CO2/año]	63.491
	aceite usado	[t CO2/año]	37
	Total Emisiones - Combustibles fósiles alternativos	[t CO2/año]	37

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-18: Emisiones CO2 por uso de combustible fuera del horno (elaboración propia, 2010)

CO2 de los combustibles fuera del horno			Promedio 3 años
	CO2 de equipos y vehículos dentro de la planta	[t CO2/año]	
	CO2 de calefacción / enfriamiento de cuartos	[t CO2/año]	
CO2 de secado de materias primas y componentes minerales			
	Combustible pesado (ultra)	[t CO2/año]	6.273
	Gas natural	[t CO2/año]	930
	CO2 de la energía producida en la planta	[t CO2/año]	
	Total CO2 de los combustibles fuera del horno	[t CO2/año]	7.203

Y como emisiones indirectas (alcance 2 y 3, debido a otros procesos no controlados por la empresa), para este caso aquellas emisiones de CO₂, relacionadas transporte de materias primas y combustibles, transporte de combustible y las emisiones generadas por el externamente por el uso de energía eléctrica (SIC) y las asociadas a la importación de Clinker.

El total de emisiones de CO₂ contabilizadas para los años 2007, 2008 y 2009 se expresan en detalle en tabla 3-19.

Tabla 3-19: Total emisiones de CO2 producción cemento siderúrgico (elaboración propia, 2010)

TOTAL DE EMISIONES DE CO2		2007	2008	2009
Emisión de CO2 directa	Kg CO2 / t cem prod	451,2	421,5	353,7
Emisión de CO2 indirecta	Kg CO2 / t cem prod	83,4	147,4	57,9
TOTAL EMISIONES DE CO2	Kg CO2 / t cem prod	534	560	411

Obteniendo una emisión de CO₂ promedio, para los tres años en estudio de 502 kg CO₂/ton. Cemento.

3.2.2.5 Análisis y discusión de resultados

Considerando la múltiple y valiosa información obtenida, se hace necesario analizar los resultados para poder concluir sobre los aspectos ambientales evaluados (energía contenida y emisiones de CO₂), la discusión se hará a partir de un análisis gráfico, como una forma de representar mejor los aspectos ambientales señalados.

En Ilustración 3-20 se muestran los consumos energéticos por proceso unitario, evidenciando que el mayor consumo de energía se encuentra en el horno de Clinker,

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

producto de la calcinación de materias primas y uso directo de combustibles para la calcinación, le siguen el consumo de energía eléctrica de la planta, el secado de materias primas y componentes minerales y por último el transporte de materias primas y combustibles.

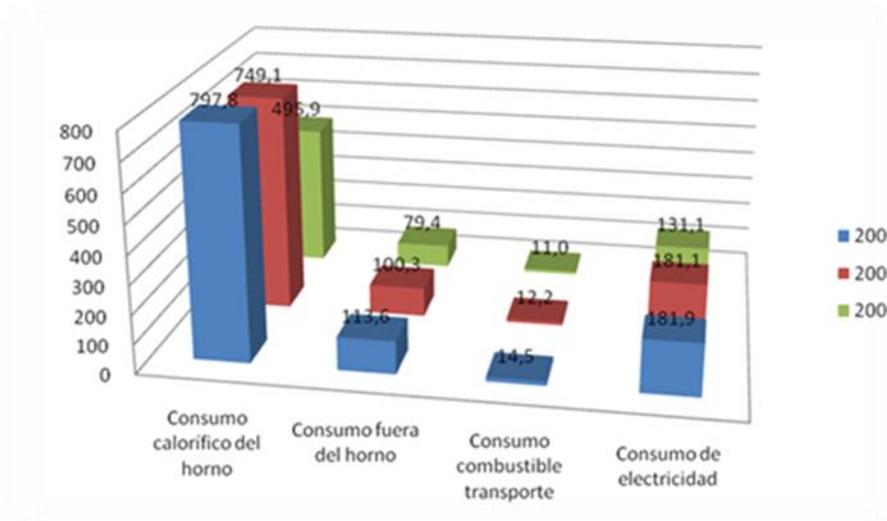


Ilustración 3-20: Consumos energéticos por proceso unitario (elaboración propia, 2010)

En Ilustración 3-21 se muestra el detalle de consumo energético por tipo de combustible, lo que da cuenta de la influencia de los poderes caloríficos de cada uno de ellos en los resultados finales.

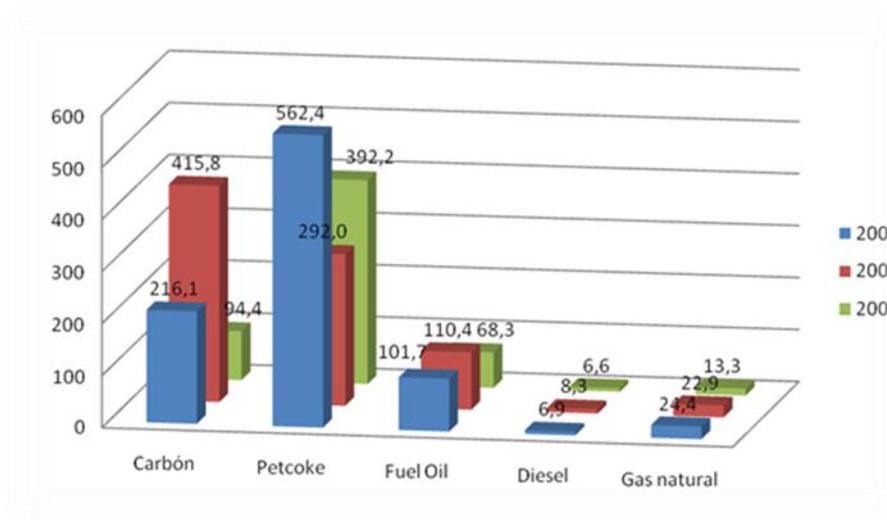


Ilustración 3-21: Detalle consumo por tipo de combustible dentro planta (elaboración propia, 2010)

De los combustibles usados dentro de la planta se observa que los de mayor uso son el carbón y el petcoke, con variaciones en las toneladas usadas donde se disminuye casi a la

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

mitad el uso de petcoke el año 2008 y se reemplaza con carbón y coincidiendo con los resultados obtenidos, los combustibles que tienen mayor impacto en consumo energético son aquellos que participan de los subsistemas de clinkerización.

Las emisiones de CO₂, asociadas a los procesos unitarios quedan representadas en ilustración 3-22, donde nuevamente se evidencia que los mayores impactos asociados son las emisiones generadas en el proceso de clinkerización (calcinación crudo) y el uso de los combustibles utilizados al interior del horno.

Siguiendo el mismo análisis las actividades que generan menores impactos sobre las emisiones de CO₂, están vinculadas a la producción y transporte de combustible y producción y transporté de materias primas.

Para el mismo punto, en Ilustración 3-23 se muestra el detalle de las emisiones de CO₂ para cada combustible presente en el proceso productivo, de este modo se advierte que las mayores emisiones se generan a partir de la combustión del petcoke y carbón.

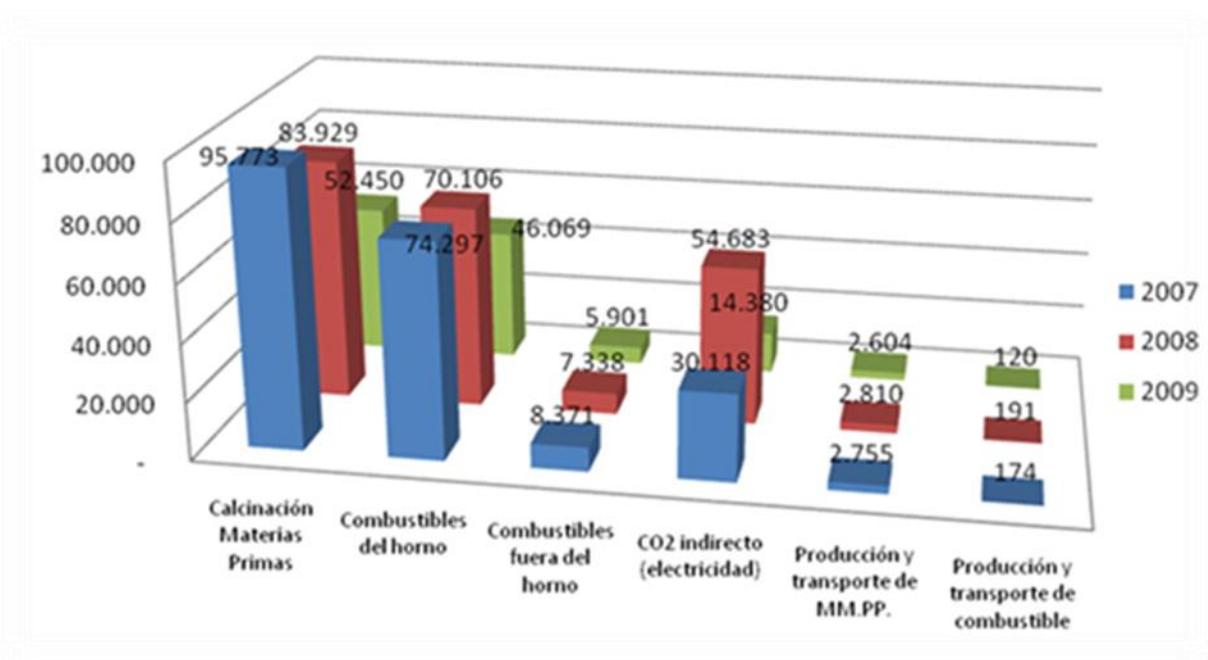


Ilustración 3-22: Emisiones totales de CO₂ procesos unitarios - año (elaboración propia, 2010)

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

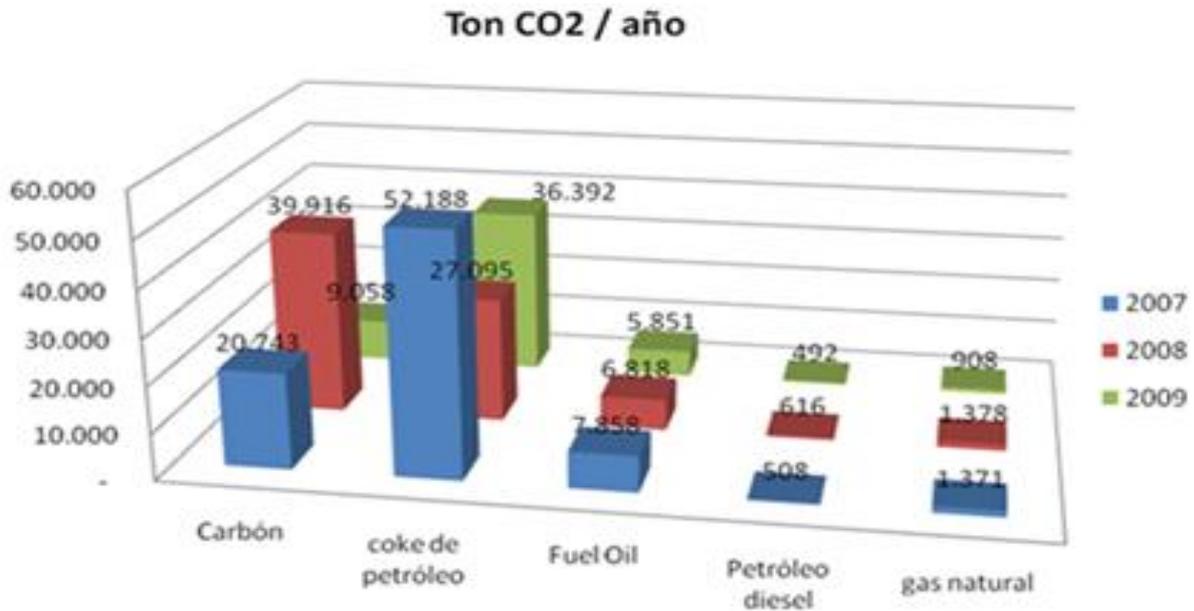


Ilustración 3-23: Detalle emisiones por tipo de combustible (elaboración propia, 2010)

Finalmente para resumir toda la cuantificación de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en Ilustración 3-24, se entrega un diagrama de flujo, considerando los procesos unitarios estudiados y el detalle de las asignaciones de estos consumos y emisiones asociados a ellos (porcentaje de consumo y emisiones para tres años promedio).

Como se puede apreciar en el diagrama, el mayor consumo energético está en el *horno de clinker* (71,2%), además, es aquí donde se emite la mayor cantidad de CO₂ (76,6%), producto del CO₂ liberado por la calcinación de las materias primas y el uso de combustibles.

Al estudiar los consumos y emisiones de la planta, en los dos procesos más importantes, se pudo observar en el diagrama de flujo que el *petcoke* es el combustible que emite mayor cantidad de emisiones CO₂, con un 54,8% y su consumo un 53,4%, dándose una obvia correlación entre uso de combustible y emisión de CO₂, pero si se analiza el detalle de las emisiones por año, se encontró que el combustible más contaminante no es el *petcoke*, sino el carbón, esto porque al analizar los resultados se observó que el año 2008 hay un aumento de emisiones de CO₂ de 4,86% el año 2008. Mientras que ese año la producción baja un 1,09%, de este modo el aumento en las emisiones de CO₂ puede ser por el aumento en el uso de carbón el año 2008, y la baja de *petcoke*. Por otro lado el carbón posee un factor de emisión mayor (ver Anexo tabla A-7), pero un calor específico menor (ver Anexo tabla A-6), por lo que se necesitan más toneladas para igualar el calor de combustión del *petcoke*.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

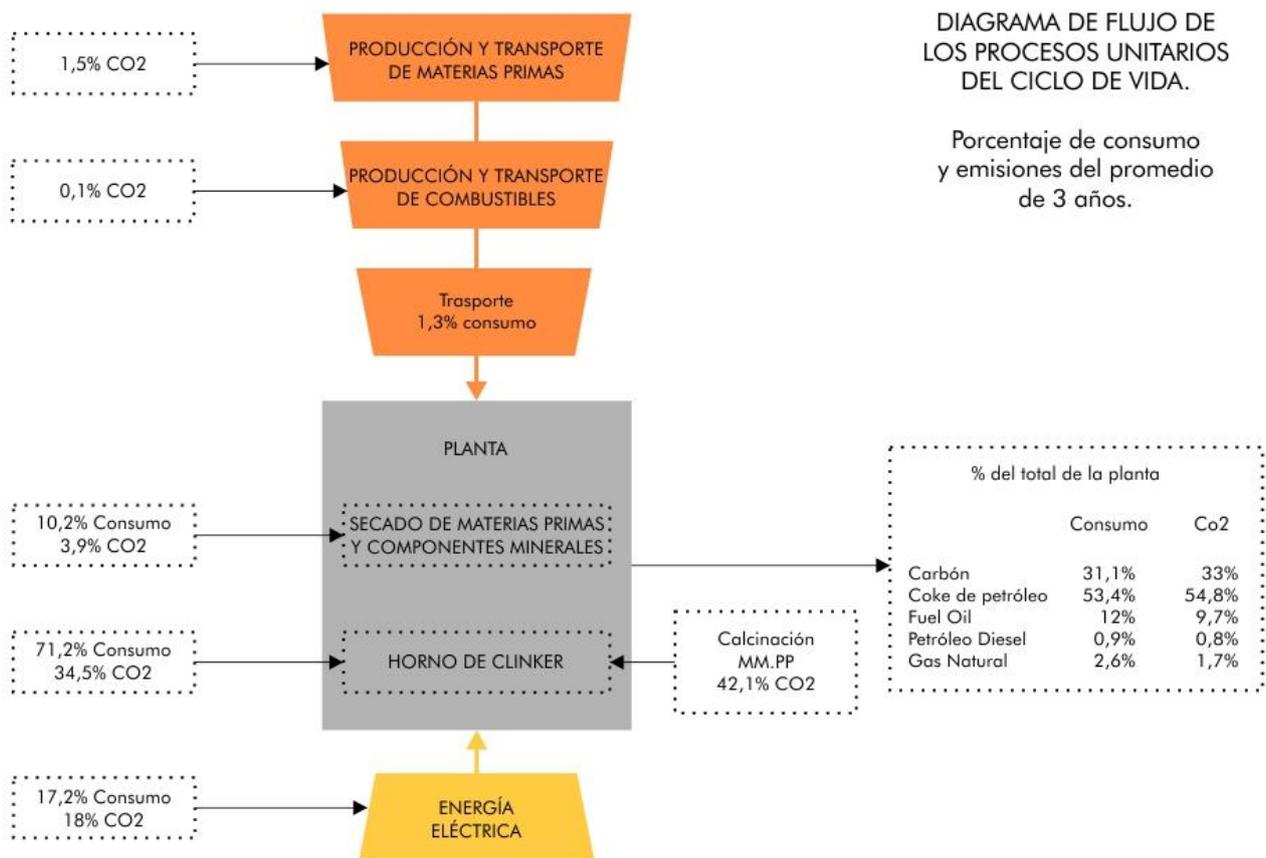


Ilustración 3-24: Diagrama de flujo procesos unitarios ECV cemento siderúrgico (elaboración propia, 2010)

En el promedio que se muestra en el diagrama de flujo, el petcoke supera ampliamente las emisiones del carbón, solo por un tema de toneladas consumidas de ambos combustibles: 9.326 ton/año de carbón versus 12.310 ton/año de petcoke (promedio de los tres años).

3.2.2.6 Validación y comparación de resultados

Tal como fue señalado en punto 3.2.2.2, una vez finalizado el ICV se hará una comparación con inventario y estudios existentes, como una manera de validar los resultados obtenidos.

De este modo, se comparan los resultados de energía contenida 2.632 MJ/ton y emisiones de CO_2 con un valor de $502 \text{ kg CO}_2/\text{ton cemento}$.

Realizar una comparación de resultados de un ICV, no es sencillo, dado que hay muchos factores que pueden afectar el resultado, por ejemplo los objetivos del estudio, los alcances y límites del sistema que son considerados para dicho inventario no

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

necesariamente pueden ser coincidentes. Sumado a ello la representatividad geográfica y cobertura temporal de los datos, etc.

Sin embargo, es factible, a partir de información disponible. Analizar los resultados de un inventario existente y reconocido (como ocurre con las bases de datos referenciadas disponibles en SIMAPRO Y CEMBUREAU), y comparar los resultados obtenidos en términos de establecer si estos, en términos de orden de magnitud o significancia de los grados de participación de los aspectos ambientales evaluados, presentan un resultado lógico con respecto al total del *Sistema* evaluado.

Al respecto, al revisar los datos referidos al consumo de energía (MJ) en la producción de 1kg. de cemento (ver Anexo tabla A-2), se observa que para el cemento con adición de escoria de alto horno (Blastfurnace slag, Cembureau), desde el punto de vista del consumo energético (energía eléctrica + energía térmica) el mayor consumo corresponde a la producción de Clinker, alcanzando casi el 60% del total de la energía consumida en el *Sistema*, comparándolo con el 71,2% del proceso estudiado para el caso nacional, las diferencias tienen sentido ya que dentro de los combustibles considerados por el estudio nacional el % de carbón para el proceso de calcinación es mucho mayor, y con un poder calorífico menor, obliga a aumentar su consumo y por ende aumentar el porcentaje de energía térmica

(Carvalho, 2001) sostiene que para el conjunto de cementos tipo I, el cual según la normativa europea EN-197-1 es clasificado como un cemento portland con un porcentaje entre 95% y 100% de Clinker, el valor medio de la energía contenida es de 4,31MJ/kg cemento. Valor obtenido de bases de datos Cembureau, la cual señala que para el año 1995 el consumo medio de energía por tonelada de Clinker, era del orden de 3,7 MJ/kg de cemento (Portland) valor al cual habría que agregarle la energía correspondiente a la producción de cemento (energía eléctrica), que tal como se indica en tabla A2 del Anexo, para un cemento tipo I estaría en un rango entre 10% y 15%, alcanzando el valor señalado de 4,31 MJ/kg cemento.

De este modo y considerando que para el cemento en estudio (blastfurnace slag), el Clinker se encuentra presente en el total de la dosificación, en el orden de un 55%, lo que significaría que al aplicar el factor 0,55 al valor de 3,7 MJ/kg se obtendría un consumo de energía de producción de Clinker de 2,035 MJ/kg y si a ese valor le agregamos la energía correspondiente a la molienda y obtención de cemento, que tal como se ha señalado para este caso corresponde a energía eléctrica con una porcentaje de participación del orden de un 17,2%, el valor de la energía contenida alcanza un orden de magnitud de 2,38 MJ /kg, valor muy cercano al obtenido para el ICV, el cual alcanza 2,63 MJ/kg (o en su

defecto 2632,7 MJ/ton). De todas formas se volverá sobre la validación de este resultado, cuando se realice el análisis de sensibilidad.

Con respecto a las emisiones de CO₂, los inventarios considerados en SimaPro y Cembereau (ver Anexo tabla A-3) muestran las principales emisiones emitidas (en gramos) a la atmósfera por 1kg de cemento. Si se revisa la información, con respecto a las emisiones de CO₂ se señala que para el caso del cemento con escoria de alto horno (Blastfurnace Slag) las emisiones son del orden de 222,7 gr/kg cemento, pero como promedio de diversos países considerando sus propias matrices energéticas y sus propias emisiones asociadas a ellas, (ver Anexo tabla A-8). Sin olvidar y tal como se señaló en el punto 3.2.2.3, para el caso nacional las emisiones de CO₂ para la matriz eléctrica están calculadas (ver Anexo tabla A-9) lo que ha permitido obtener resultados con representatividad local.

De este modo las comparaciones con el valor obtenido de emisiones de CO₂ no serán directamente comparables con los inventarios señalados, pero haciendo un análisis a partir de la información existente en ellos se tiene que el contenido de CO₂ depende del tipo de cemento, o mejor dicho de la cantidad de Clinker que tiene el cemento, ya que la aportación principal de este tipo de emisiones se produce en la fabricación de Clinker, tal como se muestra en diagrama de flujo (Ilustración 3-22) alcanzando el 76,6% de las emisiones. Para los cementos tipo I la emisión de CO₂ se sitúa en un orden de magnitud de 800 gramos de CO₂ por kg de cemento, disminuyendo para los otros tipos de cemento en los que disminuye el contenido de Clinker (Carvalho, 2001).

Tomando ese valor de referencia y considerando el mismo porcentaje de participación del Clinker con respecto al total de los materiales que componen la tonelada de cemento, es decir un 55%, se tiene que las emisiones de CO₂ debieran estar del orden de 440 gramos CO₂ por kg de cemento o bien, 440 KgCO₂ / ton cemento. Valor cercano al calculado para el proceso productivo estudiado ya que se alcanzan emisiones promedio del orden de 502kg CO₂/ ton cemento.

3.2.2.7 Análisis de sensibilidad

Como una forma de sensibilizar los resultados obtenidos, se analizan dos escenarios:

Cambio de tipo de cemento siderúrgico a portland.

Supondremos que el cemento producido es portland para comparar las magnitudes de energía contenida con las referencias de los inventarios de referencia (SimaPro y Cembereau).

Para ello, del consumo energético anual considerado para la fabricación de cemento siderúrgico, se resta el consumo asociado al consumo de escoria de escoria a la producción total de cemento. Alcanzando valores promedio de energía contenida de 4.642 MJ/ ton cem. o (4,64 MJ/ kg. cemento), valor muy cercano al señalado por (Carvalho, 2001) para la energía contenida en un cemento Portland tipo I, cuyo valor está en el orden de 4,31 MJ/ kg. Cemento.

Con este supuesto, queda claro que la adición de escoria de alto horno en el proceso de fabricación de cemento siderúrgico, es significativamente importante desde el punto de vista de la reducción del consumo energético, disminuyendo cuantitativamente el valor de esta y las respectivas emisiones de CO₂ comparativamente con un cemento portland, según ha quedado demostrado en los resultados obtenidos.

El aporte en volumen de la escoria en la producción de cemento siderúrgico es considerable, al ser la escoria un residuo del proceso de producción del acero, no se considera como un aporte al total de energía incorporada. Dicho de otro modo la asignación de todo el consumo energético asociado a la obtención de este residuo, se le asigna o imputa al proceso de producción del acero, considerando que los residuos que provienen de él tiene un consumo energético igual a cero.

3.2.3 Hormigón Premezclado

El hormigón es un material constituido principalmente, por áridos y pasta de cemento. Eventualmente contiene también una pequeña proporción de aire y aditivos utilizando para modificar algunas de sus propiedades (Zabaleta, 1988).

Según la (NCh 1934, 1992), un hormigón premezclado corresponde a un hormigón dosificado en una central hormigonera, mezclado en la misma central o en un camión mezclador, transportado a un lugar determinado y entregado en el sitio de la descarga. Para garantizar la calidad del hormigón producido es preciso disponer de instalaciones de almacenamiento adecuadas para los materiales que formarán parte de la mezcla (cemento, áridos, etc.).

Los aspectos ambientales asociados a la producción de hormigón premezclado, están más bien asociados a la generación de residuos sólidos (inertes) y líquidos (aguas residuales), como así mismo a la generación de emisiones (material particulado, CO₂, ruido, etc.) e impacto a la infraestructura vial (por traslado de materias primas y producto final hormigón).

Desde el punto de vista del consumo energético y GEI, considerando el ciclo de vida del material hormigón, las mayores asignaciones estarían dadas por el aporte de la energía

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

contenida en material cemento (específicamente en la elaboración del Clinker), de acuerdo a los antecedentes vistos en punto 3.2.2.

A nivel nacional, el hormigón es el material con mayor utilización en edificaciones (considerando muros de edificios) (INE, 2007). A nivel país, la cantidad de superficie en los cuales se ha utilizado es de 4.316.265 m², correspondiendo a un 38% del total nacional tal como se representa en Ilustración 3-25.

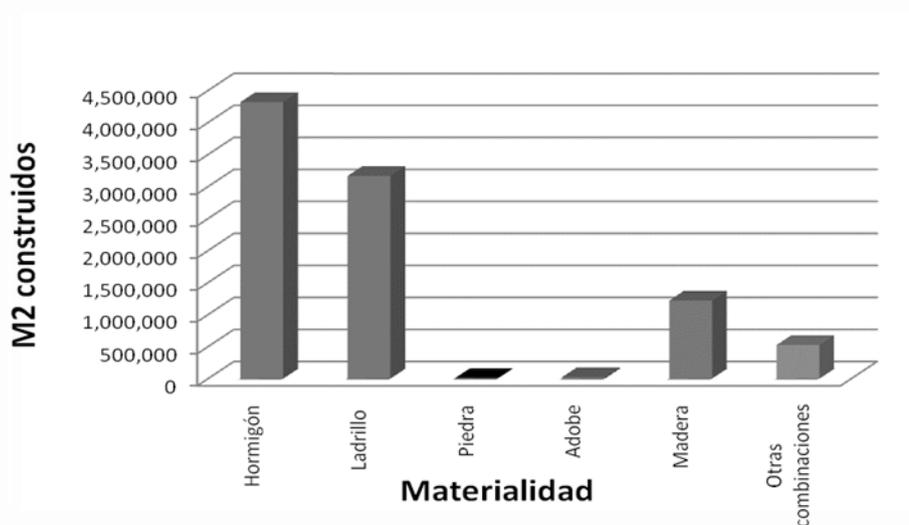


Ilustración 3-25: Materialidades, (INE, 2007)

Según el ICH la octava región del Biobío es una de las regiones con mayor producción de hormigón premezclado. En el año 2010 se despacharon un total de 787.907 m³ de hormigón premezclado, lo que equivale al 13% del total nacional, pasando a ser la segunda región con mayor despacho después de la Región Metropolitana, tendencia que se mantuvo para los años 2011 y 2012 con un 14,5% y 12% de participación a nivel nacional.

A través del siguiente inventario ambiental, se busca la determinar de la energía contenida y huella de carbono, asociada al proceso de fabricación de hormigones en una planta premezcladora en la región del Biobío, Chile, utilizando un enfoque de ciclo de vida.

El inventario ambiental incluye; el transporte de materias primas (externos e internos), proceso de dosificación, carguío y despacho, de los principales insumos materiales. Para todas estas actividades se cuantificaron, los consumos de combustibles y energías utilizados durante un año de producción.

Los resultados muestran que, para el caso estudio, el transporte de áridos gruesos es responsable, de una gran parte de las emisiones de Dióxido de Carbono y de la energía contenida del producto.

La ilustración 3-26 muestra de manera simplificada, el ciclo de vida del producto hormigón premezclado para la realidad nacional, considerando que el fin de vida del producto no es reciclado (de la cuna a la tumba).

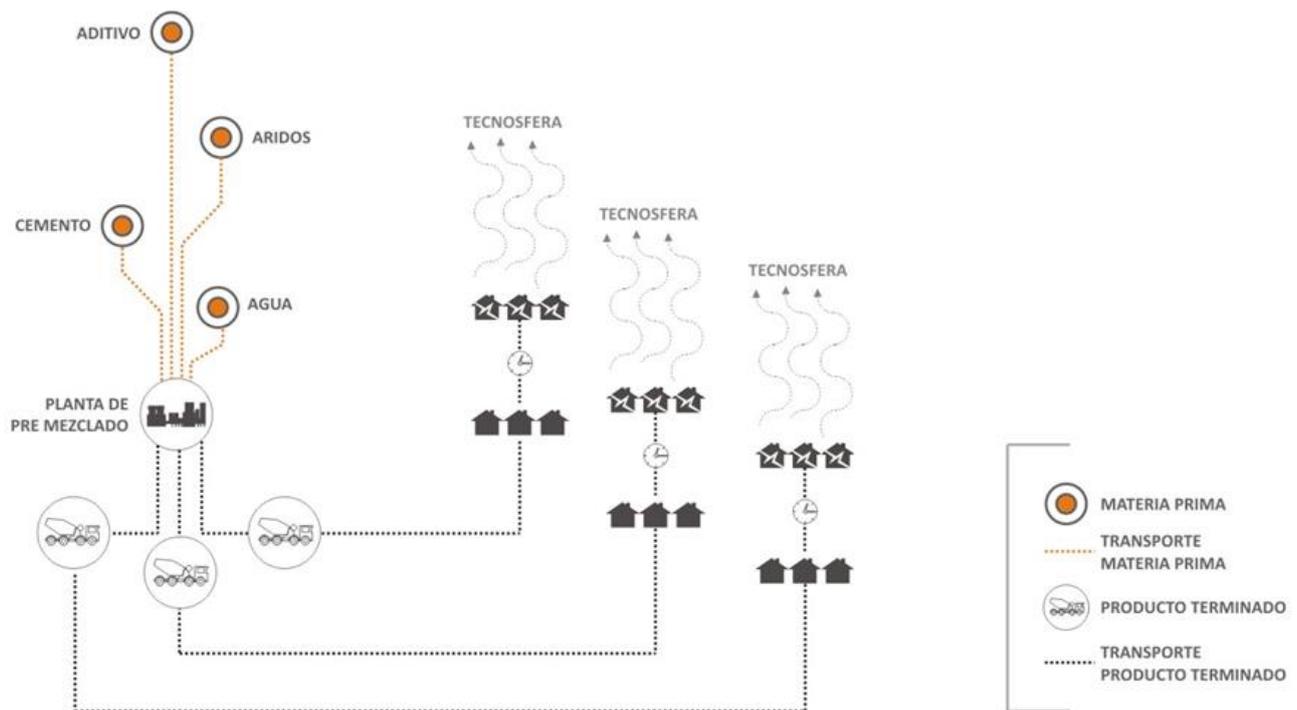


Ilustración 3-26: Esquema ciclo de vida hormigón premezclado (elaboración propia, 2010)

3.2.3.1 Inventario ambiental proceso de producción hormigón premezclado

-Objetivos: El presente estudio tiene como objetivo principal determinar la energía contenida en el proceso de fabricación del hormigón premezclado y su huella de carbono.

-Alcance del estudio: El estudio fue realizado en la octava región del Biobío, en la ciudad de Talcahuano. Se trabajó con la planta de premezclados con mayor producción de la región.

Se contempló sólo el estudio de las energías utilizadas en el proceso de fabricación del hormigón premezclado, máquinas y equipos; planta dosificadoras, cargadores frontales, camiones mixer, transporte de materias primas contemplando desde el lugar de despacho a su destino que es la planta.

No se incluyó en el estudio el consumo de energía por parte de la administración, relacionadas con la producción, Se excluyen además los recursos humanos que intervienen en el proceso.

-Unidad funcional: m³ hormigón premezclado

-Flujo de referencia: [MJ/m³].

-Límites iniciales del sistema Se evaluaron cada uno de los subsistemas, en los cuales la utilización de energía para llevarlos a cabo era incidente y significativa en el resultado final, se exceptuarán aquellos procesos en donde la utilización del recurso energético era menor al 5% del total del flujo final del proceso de fabricación del hormigón premezclado, según ISO 14040-2006.

-Criterios inclusión de datos: los datos de la producción de hormigón premezclado, fueron obtenidos de las bases de datos de la empresa, para una cobertura temporal de un año (1 de Enero al 31 de diciembre 2010).

La utilización de herramientas estadísticas de tendencia central y de dispersión, fue usada en cada una de las entradas de materias primas y energías asociadas a la producción, junto con los análisis de las salidas de producción de hormigón premezclado en el periodo del año 2010.

El detalle completo de los cálculos y resultados obtenidos, se muestran en el Anexo, de la presente tesis.

Validación de los datos: En la obtención de los datos se realizó un control pertinente con el cual se buscó la validación de la información obtenida, para ello se realizó un balance de masas, cuyo objetivo es contraponer los input y output del sistema, para ver las posibles ausencias de cualquier flujo elemental del sistema.

Además, al igual que para los inventarios anteriormente señalados (cemento y madera), los resultados obtenidos son comparados con otros inventarios ambientales descritos en bases de datos reconocidas (Ecoinvet, Bedec, ICE), bajo criterios de alcances y límites de estudio similares.

Para la correcta interpretación en la asignación de inputs y outputs del *Sistema* estudiado se realiza un diagrama de flujo incluyendo los procesos específicos, los cuales señalan todos los procesos unitarios que fueron estudiados, incluyendo sus interrelaciones (Ver Ilustración 3-27).

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

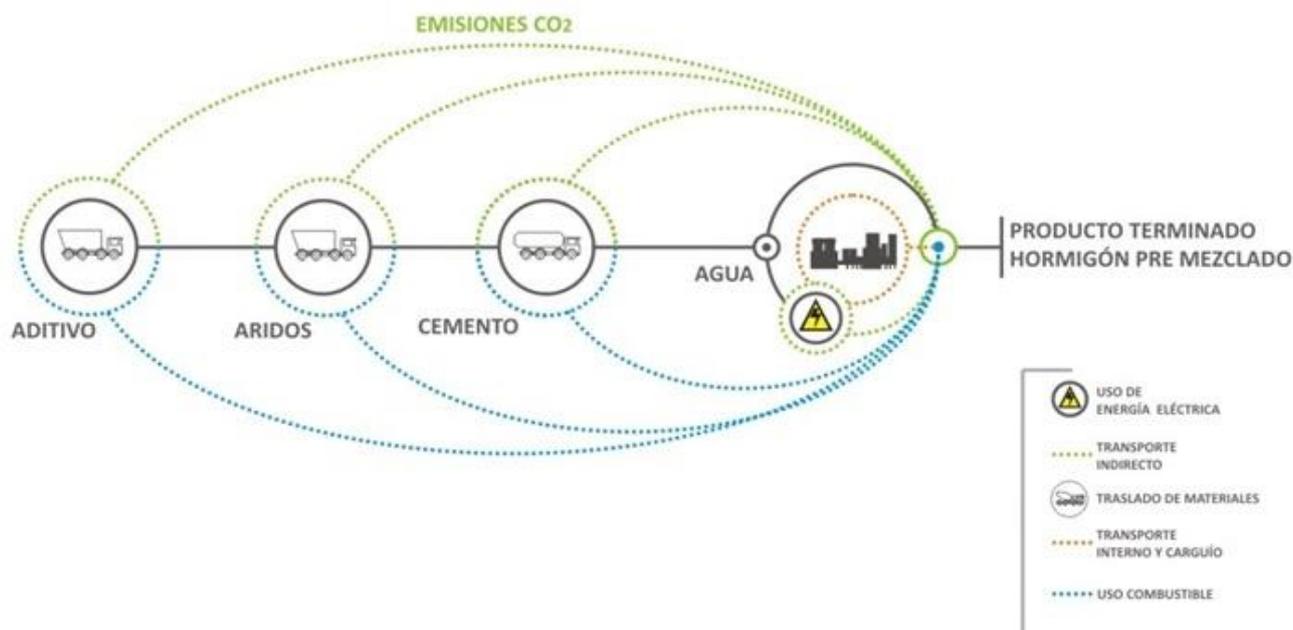


Ilustración 3-27: Diagrama flujo proceso productivo hormigón premezclado (elaboración propia, 2010)

Las entradas y salidas consideradas para el ICV del sistema estudiado son:

A) **Entradas:** Para el sistema estudiado, las entradas estarán compuestas por materias primas, combustibles, energía eléctrica. Detalladamente se tiene.

A1) Materias Primas: cemento, áridos gruesos: grava y gravilla, áridos finos, aditivos químicos y agua. Elementos constituyentes del hormigón.

A2) Combustibles y Energía eléctrica: Petróleo, utilizado en transporte directo (cargadores frontales y camiones mixer para utilizados en el mezclado del hormigón. Transporte indirecto, traslado de materias primas (cemento, áridos y aditivos). Energía eléctrica para funcionamiento planta dosificadora y bombas agua.

B) **Salidas:** Las salidas corresponden principalmente al producto hormigón. En estricto rigor una planta de hormigón premezclado produce una variedad de hormigones importantes, respondiendo básicamente a los requerimientos de cada proyecto constructivo y las especificaciones técnicas que los regulan. De este modo

una planta de hormigón produce diferentes tipos de hormigón según especificaciones de resistencias mecánicas, docilidad, desempeño técnico, etc.

C)

B1) Hormigón Premezclado: Como una manera de simplificar el inventario ambiental, se ha considerado la totalidad del volumen de hormigón producido por la planta como un solo tipo de hormigón (producto final), lo que sería objetivo de otra investigación, desagregarlo por tipo de productos.

B2) Emisiones de CO₂: Las cuales son cuantificadas tal como lo sugiere el principio normativo PAS 2050, tanto para las emisiones directas como para las indirectas. (Traslados internos y transporte de materias primas).

Resultado recolección de datos:

A) **Entradas :**

A1) Materias primas: Por razones de confidencialidad de información, no es posible entregar el detalle de las cantidades de cada una de las materias primas incluidas en el Sistema estudiado.

No obstante, para cada una de ellas se entrega una representación gráfica, en la cual queda claramente puede observarse la tendencia de estos resultados, los cuales además muestran un tratamiento estadístico.

- **Cemento**: el consumo de cemento se expresa en toneladas anuales, debido a criterios propios del proceso, es necesario dosificar este material a través de su masa. El cual es almacenado en silos apropiados en la planta estudiada. En Ilustración 3-28 se muestra el consumo de cemento para el año 2010, con una media geométrica de $3,2 \times 10^3$ (ton), destacando la baja sostenida durante el mes de marzo, debido a las evidentes consecuencias del terremoto 27 F, que afectó a la zona. Sin embargo, producto del mismo fenómeno se evidencia un aumento en los despachos de esta materia prima vital en la fabricación de hormigón premezclado.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

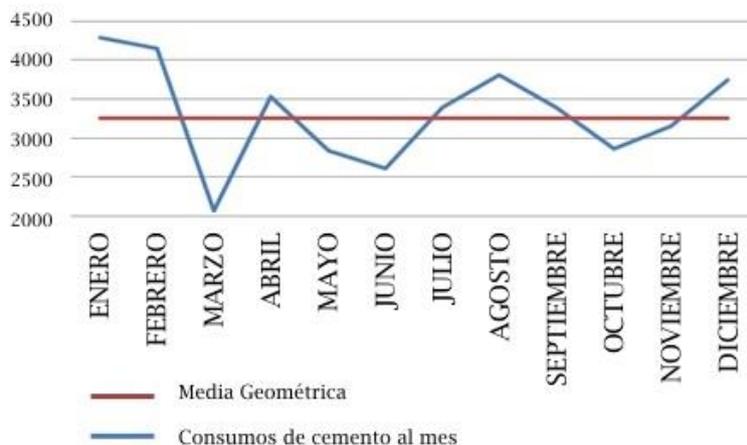


Ilustración 3-28: Consumo cemento año 2010 (elaboración propia, 2010)

- **Áridos gruesos (grava y gravilla):** los respectivos consumos de estos áridos son expresados en metros cúbicos ,debido a su forma de transporte y almacenamiento en la planta, la dosificación de estos en el proceso se realiza a través de su masa, obteniéndola de ensayos de densidad. Las densidades utilizadas para la trasformación a masa, son las históricas, obtenidas del promedio de 6 años. Como es de suponer y tal como se expresa en las ilustraciones 3-29 y 3-30, la tendencia de consumo de grava es similar a la del cemento y de todas las materias primas consideradas como inputs del sistema, por las mismas razones señaladas anteriormente.

Las medias geométricas de consumo tanto para la grava como para la gravilla es de $2,47 \times 10^3 \text{ m}^3$ y $4,35 \times 10^3 \text{ m}^3$, respectivamente.

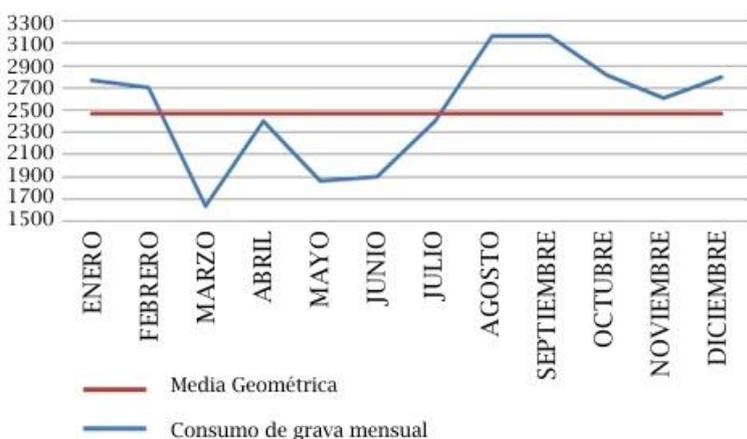


Ilustración 3-29: Consumo grava 40 mm (elaboración propia, 2010)

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

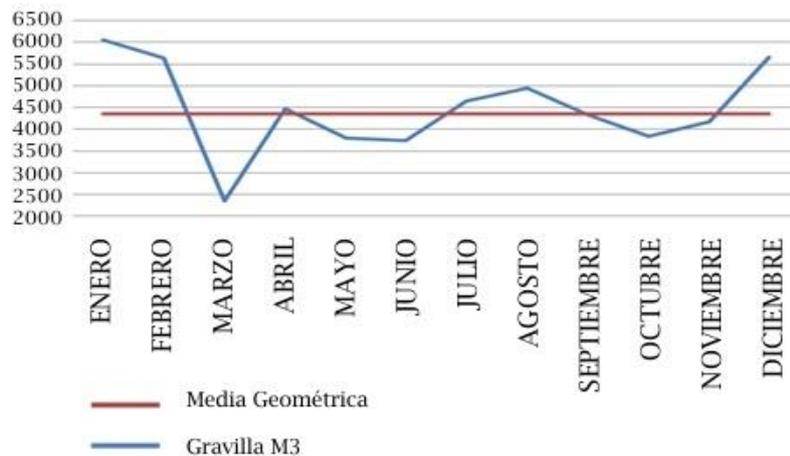


Ilustración 3-30: Consumo gravilla 20 mm (elaboración propia, 2010)

- **Áridos finos:** el consumo de arena contempla arenas gruesas y finas, las que son medidas en metros cúbicos debido a los registros de llegada y transporte de estas. Para la dosificación se emplean las densidades relativas, tomadas en planta y los porcentajes de humedad y esponjamiento. Su dosificación se hace necesariamente de acuerdo a su masa.

Como ya se ha mencionado anteriormente la tendencia de consumo es similar a las otras materias primas imputadas, en ilustración 3-31, se señala la tendencia del consumo de este material cuya media geométrica alcanza $5,78 \times 10^3$ m³.

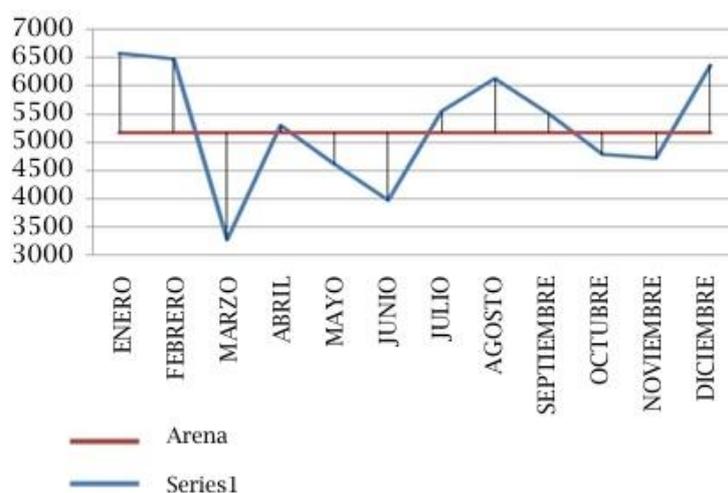


Ilustración 3-31: Consumo arena 5 mm (elaboración propia, 2010)

- **Aditivos:** los aditivos utilizados en la producción de hormigón con la finalidad de mejorar las propiedades reoplásticas de los hormigones, debido a esto podría señalarse pasa a ser un material estratégico en el resultado del producto final. Por

esta misma razón, no se entrega información referida a los nombres comerciales ni las cantidades utilizadas, son embargo en Ilustración 3-32 se muestra el consumo en toneladas. El cual arroja una media geométrica de 16,1 toneladas para el año 2010.

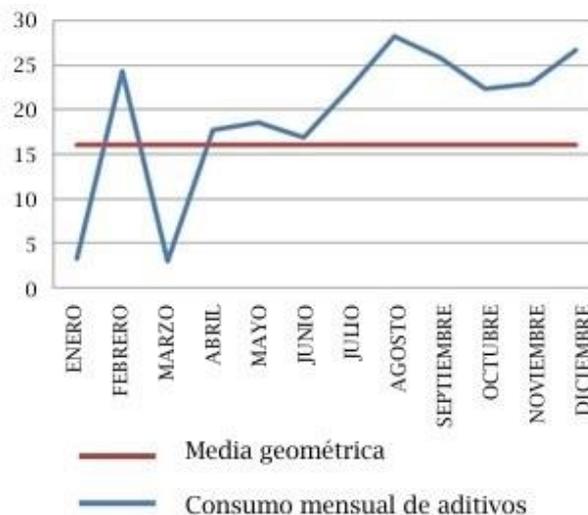


Ilustración 3-32: Consumo aditivos químicos (elaboración propia, 2010)

- **Agua:** En cuanto a los consumos de agua hay que señalar que el agua utilizada en las producciones de hormigones, es agua extraída desde un pozo existente en la planta (aguas de punteras), a través de bombas las que ocupan energía eléctrica y su consumo se asocia directamente al consumo de la planta dosificadora. Las cantidades de agua no han sido determinadas, ya que existen otros subprocesos internos que ocupan el recurso y no es representativo indicar un volumen de uso. Lo que sí es considerado es el consumo energético asociado al uso de las bombas impulsoras, lo cual será detallado posteriormente.

A2) Combustibles (Energía térmica - energía eléctrica):

Los criterios para consideraciones de las entradas referidas a combustibles, obedece a una distinción entre el transporte directo (traslados interno al interior de la planta) e indirecto (asociado a los proveedores por traslado de materias primas).

- **Transporte indirecto:** Se calculó el consumo de petróleo según la cantidad de recepciones por parte de la planta, de cada uno de los despachos de materias primas desde su lugar de origen hasta la planta. Se contempló además, la distancia recorrida por cada uno de los proveedores, los rendimientos de los camiones y el retorno de estos dependiendo de si su devolución se realizaba con carga o sin ella,

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

en el caso de que específico del transporte de los aditivos este fue el caso en el cual el regreso se realizaba con carga no asociada a la planta. Para los restantes la distancia se duplicó por efectos de incidencia en las energías asociadas al material transportado.

La distancia para el ciclo completo consideradas para el traslado de las materias primas alcanza un promedio anual de 295 Km y el promedio del total de consumo de combustible asociado al traslado de materias primas, el cual alcanza un valor promedio de 536,8 m³.

La cantidad de combustible consumido asociado a cada materia prima queda representado en Ilustración 3-33, en análisis posteriores se entrega detalles de las cantidades asociados a cada tipo de combustible.

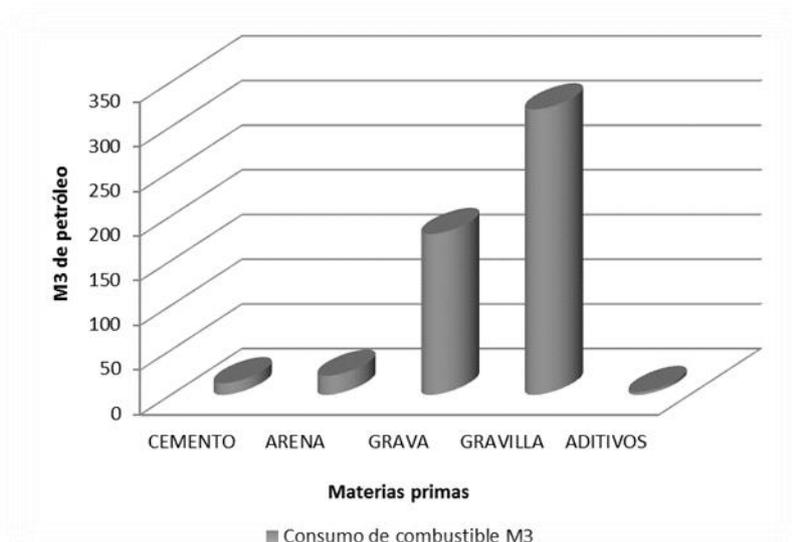


Ilustración 3-33: Consumo de combustible transporte indirecto (elaboración propia, 2010)

Los consumos de combustibles anuales por transporte indirecto de materias primas como la grava y gravilla, son los con mayor gasto debido a dos factores relevantes; la distancia recorrida y la frecuencia de transportes de estos materiales a la planta. Los materiales con mayor utilización en el periodo estudiado son los áridos. En el caso específico de la arena que es el material con mayor volumen de entrada a la planta, el consumo de combustible por transporte es menor a los materiales nombrados con anterioridad, debido a la reducida distancia desde el punto de despacho a la planta.

- **Transporte directo:** Los consumos se tomaron de las bases de datos de la empresa sub contratista del servicio y de los registros de la administración de la planta hormigonera, éstos consumos son expresados mensualmente en litros de

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

combustible por equipo de carga, no siendo relevante diferenciar el consumo unitario de estos para efectos de cálculo de consumo, de este modo se procedió a realizar la sumatoria mensual del consumo de ambos equipos.

El tipo de combustible es petróleo diesel el cual se contempla características y propiedades declaradas en inventarios anteriores (madera y cemento).

Finalmente los consumos de combustibles (petróleo) de transporte indirecto vinculados a los cargadores frontales y camiones mixer alcanzan valores de medias geométricas de 2.693 litros y 36.000 litros, respectivamente.

Para el consumo de combustible asignado a los camiones mixer o betoneras, se ha considerado la etapa de mezclado y homogenización del producto y la etapa de despacho de este, cuya etapa es variable debido a que son múltiples los puntos de despachos, variando sus distancias y cantidad de metros cúbicos transportados.

De este modo se obtuvieron los consumos mensuales de combustible por equipo de transporte llevándolos a un total mensual. Lo cual queda representado en Ilustración 3-34.

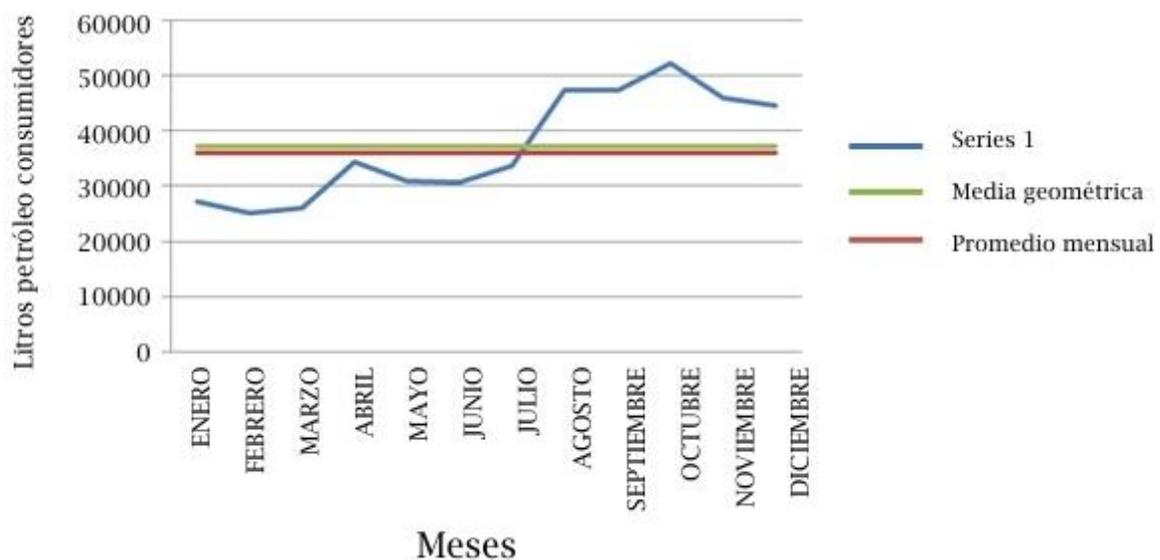


Ilustración 3-34: Consumo de combustible transporte indirecto (elaboración propia, 2010)

Como se mencionó anteriormente la variabilidad de los despachos, en cuanto a distancia y cantidad de producción asociada a estos refleja cierto grado de incertidumbre ya que es posible transportar un mínimo de hormigón a una distancia mayor teniendo un consumo de combustible mayor que una mayor cantidad de despachos de producto en una distancia menor.

- **Energía Eléctrica:** Se contempló la energía eléctrica utilizada por las dos plantas dosificadoras, (MTM y ROSS), considerando que estas solo funcionan con energía eléctrica proveniente del sistema interconectado central (SIC), medida en kilo watts hora mensual kWh/mes.

En ilustración 3-35 se muestra la distribución del consumo eléctrico mensual para el año 2010, para el proceso de fabricación de hormigón premezclado, la cual alcanzo una media geométrica de $21,86 \times 10^3$ kWh.

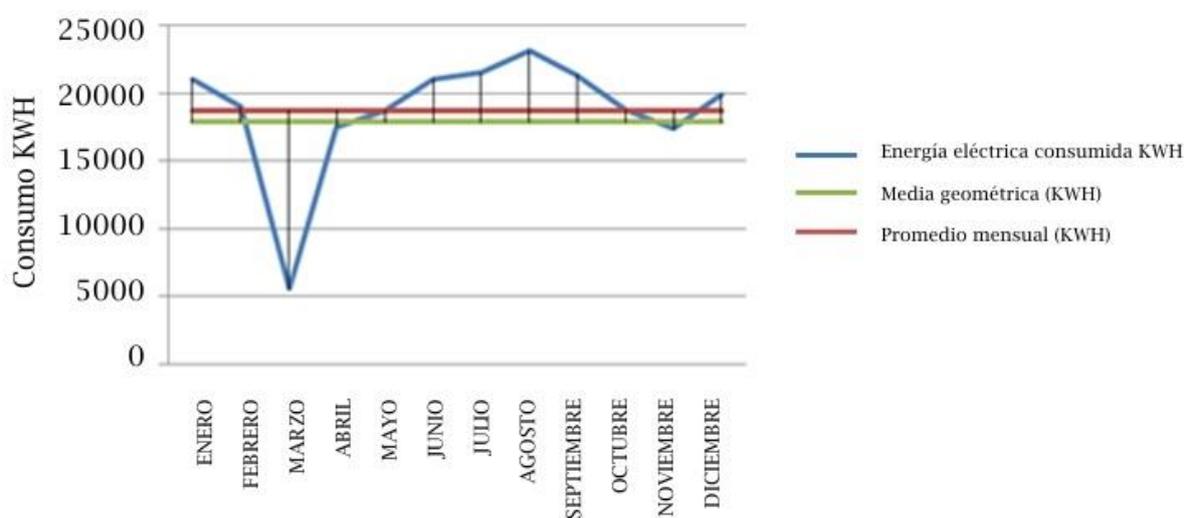


Ilustración 3-35: Consumo de energía eléctrica año 2010 (elaboración propia, 2010)

Salidas

La producción del año 2010, contempla todos los hormigones producidos en la planta en dicho periodo, sin identificar su grado de resistencia y dosificación asociada, debido a que lo que se busca es la energía requerida para la fabricación de un metro cúbico como producto único.

En Ilustración 3-36, se entrega una representación gráfica mostrando la tendencia de producción para el año 2010, cuyo volumen alcanzó $10,89 \times 10^4$ m³.

A partir de la gráfica, se puede apreciar la baja de producción desde marzo en adelante, considerando los efectos del terremoto 27F, bajando a volúmenes del orden de los 5.500 m³ (marzo y mayo), con un promedio mensual de 9000m³ de producción.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

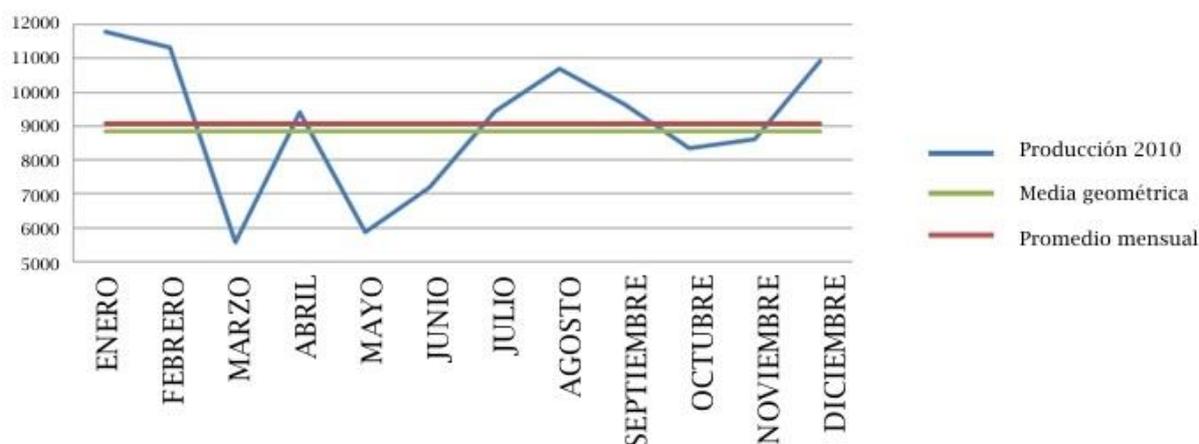


Ilustración 3-36: Producción anual hormigón premezclado (elaboración propia, 2010)

3.2.3.2 Cálculo de la energía contenida y emisiones de CO₂

-Energía Contendida:

Se realizaron los cálculos correspondientes a las entradas de materias primas, asociando el consumo de combustibles de transportes indirecto de estas, desde el proveedor hasta la planta hormigonera.

El cálculo de las energías necesarias para la producción del hormigón premezclado se dividieron en dos, *según su tipo y función* dentro del proceso unitario de fabricación.

La primera es la energía asociada al *transporte directo* de algunas de las materias primas dentro de la planta tales como grava, gravilla y arena, las cuales son transportadas por dos cargadores frontales. Otra es por transporte directo de la producción por medio de camiones mixer, la cual consta de dos etapas las que se nombraran posteriormente.

El segundo tipo de energía es la que interviene directamente en la dosificación, pesaje y liberación de los materiales. Esta es la energía eléctrica proveniente de la red de abastecimiento del sistema interconectado central (SIC), suministrada por la compañía general de electricidad (CGE).

La energía eléctrica contemplada cumple también la función de abastecer a las motobombas de extracción de agua desde el pozo y la extracción y pesaje de los aditivos. Considerando la media geométrica mensual del consumo de combustible diésel y eléctrico (señaladas en anteriormente), se procedió a realizar la transformación necesaria según su densidad en el caso del petróleo a kilogramos de este y posteriormente a energía aportada en mega Joule mediante el poder calorífico inferior. En el caso de la energía eléctrica esta se transformó de kilo watts hora a mega Joule por medio de los

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

factores de conversión correspondiente (señalados en los inventarios anteriores, cemento y madera).

Una vez obtenidas las energías tanto del transporte indirecto, transporte directo y consumo de energía eléctrica por producción, se realizó la sumatorias de estas obteniendo la energía mensual asociada a un mes de funcionamiento de la planta.

El consumo total de energía mensual, se dividió por la producción mensual de hormigón obtenida de la media geométrica, generando una magnitud de energía consumida por metro cubico producido. En tabla 3-20 se muestra el resumen de los valores alcanzados y en 3-21 y 3-22, se muestran detalles de los cálculos y valores de los factores de conversión utilizados para dichos cálculos.

Tabla 3-20: Resumen de energías mensuales y anuales en Mega Joule consumidas por actividad (elaboración propia, 2010)

Actividades	Mensual [MJ]	Anual [MJ]
Energía aportada por transporte indirecto	1.563.769	19.164.463
Energía aportada por transporte directo	1.381.469	17.091.446
Energía aportada por energía eléctrica	78.681	992.618
Total de energía consumida en Mega Joule	3.023.919	37.248.527

Tabla 3-21: Energía Transporte directo, cargadores frontales (elaboración propia, 2010)

Cálculo de energía aportada por el transporte directo (cargadores frontales)				
Tiempo	Consumo de petróleo [Litros]	Densidad 15°C [kg/lit]	PCI [MJ/KG]	Energía aportada [MJ]
Mensual [Media geométrica]	2.693	0.85	42	96.129
Anual	32.811	0.85	42	1.171.353

Tabla 3-22: Energía Transporte directo, camiones mixer (elaboración propia, 2010)

Cálculo de energía aportada por el transporte directo (camiones mixer)				
Tiempo	Consumo de petróleo [Litros]	Densidad 15°C [kg/lit]	PCI [MJ/KG]	Energía aportada [MJ]
Mensual [Media geométrica]	36.004	0.85	42	1.285.340
Anual	445.941	0.85	42	15.920.094

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

En Ilustraciones 3-37 y 3-38, se muestra la participación total para cada uno de los consumos asociados al proceso productivo de fabricación de hormigón premezclado, durante la producción y los porcentajes de distribución de los tipos de energías utilizadas en ello (a partir de combustibles fósiles y energía eléctrica).

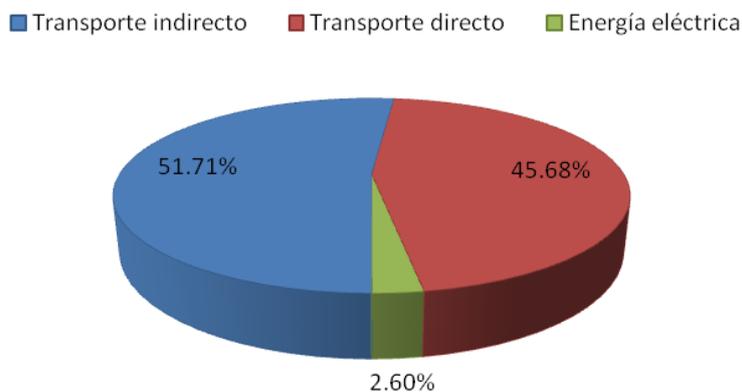


Ilustración 3-37: Consumo energía mensual asociada al proceso (elaboración propia, 2010)



Ilustración 3-38: Porcentaje de las energías utilizadas en el proceso de fabricación (elaboración propia, 2010)

A partir del análisis gráfico se observa que el consumo de combustibles fósiles es el que tiene mayor participación en todo el proceso y es el que aporta una mayor cantidad de energía al proceso.

Se advierte además, que tanto el transporte directo como el indirecto son los que generan mayor gasto energético en todo el proceso cerca del 97.4% de la energía utilizada, dejando tan solo un 2,6% de consumo en el proceso de dosificación de las dos plantas MTM y ROSS (energía eléctrica), bajo estos datos expuestos se puede inferir que la importancia del transporte de materias primas en el proceso cobra una mayor relevancia del punto de vista energético, con respecto al consumo de energía eléctrica asociado al proceso productivo de la planta estudiada.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Con respecto al de total energía contenida en la etapa de fabricación del hormigón premezclado para el año 2010, cuyos cálculos se encuentran expresados en tablas 3-23. Puede señalarse que alcanzaron de valores de 342,2 MJ/m³.

Tabla 3-23: Cálculo de la energía contenida etapa fabricación H° Premezclado anual (elaboración propia, 2010)

Cálculo de la energía contenida por m3 de hormigón producido		
Consumo total anual MJ	Producción Anual	Energía contenida anual [MJ/M3]
37,248,527	108.848	342,2

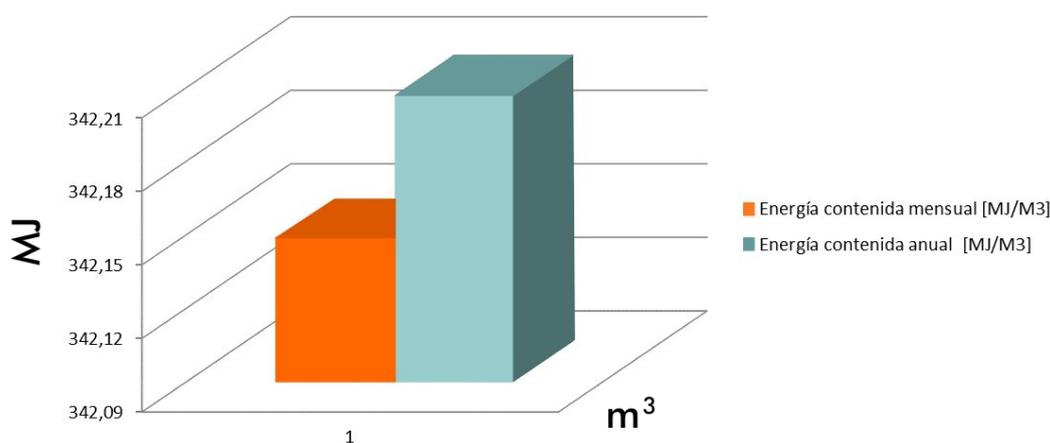


Ilustración 3-39: comparación energías contenidas mensuales (elaboración propia, 2010)

Al realizar los cálculos de la energía contenida por metro cúbico producido mensual y anual (ver Ilustración 3-39), se observó una diferencia de 0.06 Mega Joule con respecto de la energía contenida calculada en periodo mensual utilizando la media geométrica, a diferencia de los cálculos realizados tomando el año en su totalidad sin la utilización de herramientas estadísticas.

Esta diferencia se debe principalmente a la centralización de los consumos mensuales de energía.

➤ **Calculo Huella de Carbono:**

Obtenido el cálculo de la energía contenida en la producción de hormigón premezclado es posible determinar las emisiones de dióxido de carbono emitidas al medio ambiente producto de la fabricación.

El procedimiento matemático para el cálculo es relativamente simple, se contemplan las energías aportadas en cada subproceso y se multiplican por los factores de emisión del diésel y de la energía eléctrica respectivamente, para cada proceso (similar procedimiento realizado para los ICV anteriores madera y cemento)

Una vez obtenida las emisiones de CO₂ parciales de cada proceso, se suman obteniendo el total de emisión en una determinada unidad de tiempo, en este caso mensual y anual. Posteriormente las emisiones obtenidas se dividen por las producciones respectivas a cada periodo.

En tablas 3-24, 3-25 y 3-26, se da cuenta de los factores de emisión ocupados y los resultados alcanzados para las emisiones de CO₂ asociadas al *Sistema* estudiado.

Tabla 3-24: Emisiones CO₂ transporte indirecto (elaboración propia, 2010)

Para transporte indirecto				
Energía Anual	Unidad	Factor de emisión ¹	Unidad	Kg CO ₂
19.164.463	MJ	0,0741	[Kg CO ₂ /MJ]	1.420.087
Energía Mensual	Unidad	Factor de emisión	Unidad	Kg CO ₂
1.563.769	MJ	0,0741	[Kg CO ₂ /MJ]	115.875

Tabla 3-25: Emisiones CO₂ directo (elaboración propia, 2010)

Para transporte directo cargadores frontales.				
Energía Anual	Unidad	Factor de emisión ²	Unidad	Kg CO ₂
1.171.353	MJ	0,0741	[Kg CO ₂ /MJ]	86.797
Energía Mensual	Unidad	Factor de emisión	Unidad	Kg CO ₂

¹ Vega y Zaror. Proyecto Fondef D06/1060, Concepción. Chile, Universidad de Concepción, 2010.

² Vega y Zaror.. Proyecto Fondef D06/1060, Concepción. Chile, Universidad de Concepción, 2010.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

96.129 MJ 0,0741 [Kg CO₂/MJ] 7.123

Para transporte directo camiones mixer				
Energía Anual	Unidad	Factor de emisión	Unidad	Kg CO ₂
15.920.094	MJ	0,0741	[Kg CO ₂ /MJ]	1.179.679
Energía Mensual	Unidad	Factor de emisión	Unidad	Kg CO ₂
1.285.340	MJ	0,0741	[Kg CO ₂ /MJ]	95.244

Tabla 3-26: Emisiones CO₂ directo (elaboración propia, 2010)

En tabla 3-27 se entrega un resumen sintetizado de las emisiones parciales en cada uno de los procesos vinculados al proceso de producción estudiado.

Tabla 3-27: Resumen de emisiones de CO₂ proceso fabricación (elaboración propia, 2010)

Actividades	Mensual [KG CO ₂ emitidos]	Anual [KG CO ₂ emitidos]
CO ₂ aportada por transporte indirecto	115.875	1.420.087
CO ₂ aportada por transporte directo	102.367	1.266.476
CO ₂ aportada por energía eléctrica	10.076	127.110
Total de CO ₂ aportado en el proceso de fabricación	228.318	2.813.673
CO ₂ emitido por metros cúbico producido	26	26

A partir de los resultados obtenidos, se observa que existe un patrón entre las emisiones de dióxido de carbono de las tres actividades y las energías aportadas en cada una de las mismas actividades.

La importancia del tipo de combustible utilizado en cada una de las actividades es un factor incidente en cuanto a las emisiones generadas por estas, ya que no es lo

mismo la combustión directa de petróleo que la utilización de energía eléctrica generada principalmente por medios hídricos, como represas y embalses.

La incidencia del transporte de materias primas a la planta es la actividad que conlleva una mayor generación de emisiones de dióxido de carbono, producto de las distancias de transporte, la frecuencia de estas y los rendimientos asociados a los camiones, junto con el tipo de combustible utilizado en este caso petróleo diésel.

En segundo lugar tenemos el transporte directo de materiales y productos, los cuales presentan consumos constantes, independiente de la producción, generado por el recorrido habitual de los cargadores frontales, no así la frecuencia la que se ve afectada directamente por la producción. Es necesario establecer que los consumos del transporte directo fueron obtenidos según registros directos de las empresas, donde no se realizaron supuestos en cuanto al consumo.

En el caso del amasado del hormigón y posterior despacho de la producción se hace más complejo debido a la variedad de puntos de despacho y cantidad de producción transportada, en este caso al igual que el anterior los consumos de combustibles son obtenidos directamente de la empresa. Al tener los consumos mensuales y anuales se agrupan todas estas variables como distancias a distintos puntos y cantidad producción despachada.

En tercer lugar podemos apreciar que las emisiones generadas en la etapa de dosificación, son relativamente bajas en comparación con las dos actividades anteriores, producto principalmente de que la energía utilizada es mucho menor, pero si vemos que el factor de las emisiones generadas por la producción de energía eléctrica, está en una unidad distinta al factor de emisión del petróleo, esto implica que toma directamente la energía eléctrica en kilo Watts hora (kWh), transformándola en las emisiones de dióxido de carbono, no contemplándola en la unidad de energía como el Mega Joule.

Es relevante considerar que el factor de emisión utilizado en la transformación de energía eléctrica a emisión de dióxido de carbono, es exclusivo para el sistema interconectado central (SIC), el cual se abastece principalmente de energía hidroeléctrica, la cual tiene asociado una menor huella ecológica en su producción y menor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia del sistema interconectado del norte grande (SING), el cual se abastece principalmente de energía producida por centrales termoeléctricas teniendo un mayor factor y una mayor generación de gases de efecto invernadero.

3.2.3.3 Análisis de sensibilidad

Con el propósito de vislumbrar y proyectar los resultados obtenidos al manejar ciertas variables que condicionan el resultado final del cálculo efectuado, se hace necesario realizar este ejercicio.

➤ **Comparación de los poderes caloríficos inferior y superior de los combustibles**

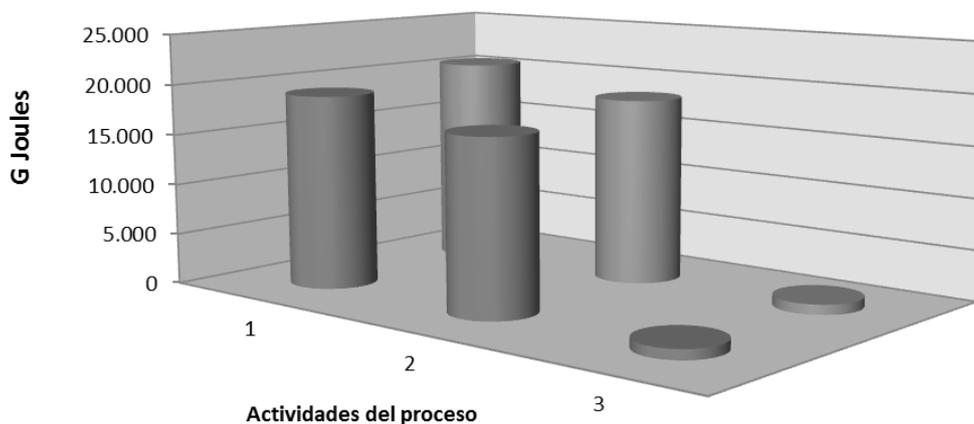
Se utilizó en el cálculo general, los poderes caloríficos inferiores del petróleo con la finalidad de lograr la representatividad de este resultado para el caso más desfavorable, pensando en que su poder de generación de calor es menor.

En el análisis realizado se contraponen ambos poderes caloríficos del petróleo tanto el inferior como el superior, con el objeto de ver cuál es la incidencia de estos en el resultado final.

Solo se realizaron las modificaciones del poder calorífico en las actividades de transporte indirecto y directo ya que solo en estas interviene el combustible petróleo, excluyendo la etapa de dosificación, debido a que esta presenta solo consumo de electricidad.

En Ilustraciones 3-40 y 3-41, se muestran los incrementos de energía por actividad y las variaciones de energía según los poderes caloríficos.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción



- 1.- Transporte indirecto 2.- Transporte directo 3.- Dosificación energía eléctrica
- 1.- Transporte indirecto 2.- Transporte directo 3.- Dosificación energía eléctrica

Ilustración 3-40: Incremento de energía por actividad (elaboración propia, 2010)

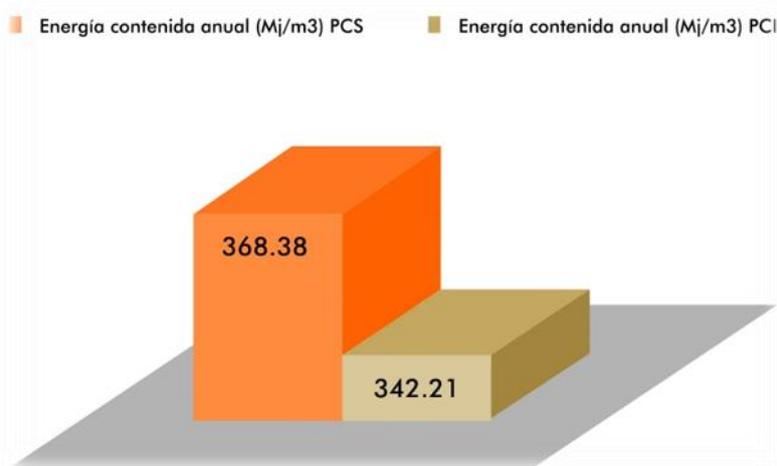


Ilustración 3-41: variación de energía contenida según poderes caloríficos (elaboración propia, 2010)

A partir de la representación gráfica es evidente el incremento de la energía en cada actividad al variar el poder calorífico de inferior a superior, en el caso de la actividad asociada a dosificación no se observan variaciones ya que la energía utilizada es eléctrica.

Al comparar los incrementos de energía entre las actividades modificadas se puede apreciar una variación del 4.04% en el transporte indirecto y un 3.61% en el transporte directo, con respecto al total de la energía utilizada en el proceso de fabricación, con respecto al poder calorífico inferior del petróleo.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Al comparar la energía contenida entre los dos resultados de la gráfica se aprecia un incremento de 26,17 MJ por metro cúbico siendo un incremento porcentual del 7.64%, con respecto los 342.21 [MJ/M3] inicialmente calculados.

La importancia de realizar el análisis de sensibilidad en estas dos etapas se debe principalmente a que concentran el 97.4% de la energía utilizada en todo el proceso.

-Análisis de sensibilidad para las emisiones de dióxido de carbono

A partir de los resultados de los cálculos de la energía contenida, considerando el supuesto del cambio del poder calorífico inferior al superior, se procedió a calcular las emisiones de dióxido de carbono.

La significancia de los resultados queda expresada en las Ilustraciones 3-42 y 3-43 las cuales muestran las emisiones de CO₂ asociadas al transporte (para este análisis de sensibilidad) y la comparación de la generación de emisiones de CO₂ variando los poderes caloríficos para el total producto un metro de hormigón, respectivamente.

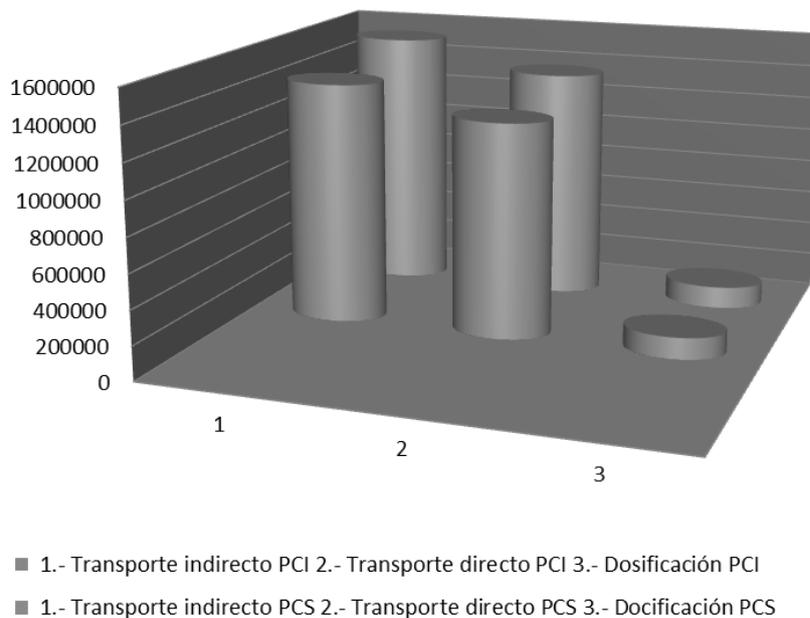


Ilustración 3-42: Emisiones CO₂ transporte - análisis sensibilidad (elaboración propia, 2010)

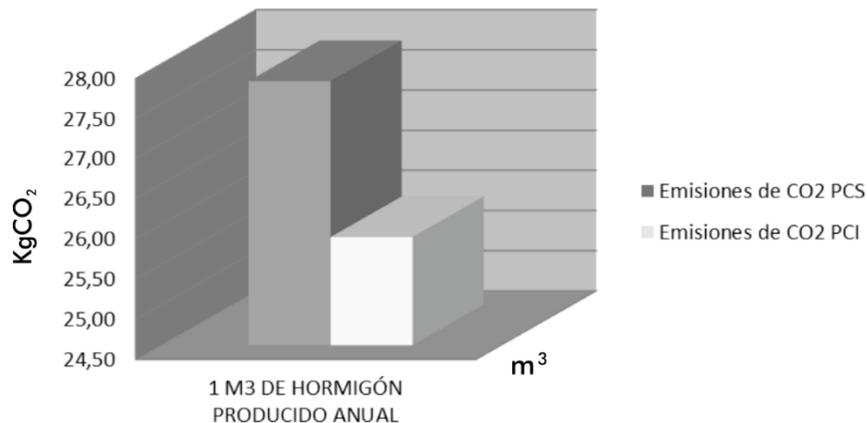


Ilustración 3-43: Variación poderes caloríficos (elaboración propia, 2010)

A partir de las representaciones gráficas, puede señalarse que las variaciones respectivas de cada uno de los cálculos efectuados son de 1.94 [Kg de CO₂/m³ anual], con respecto a las emisiones por metro cúbico producido utilizando el poder calorífico inferior, este incremento corresponde a un 7,5% del total calculado.

Se logra observar incrementos parciales de cada actividad, para el transporte indirecto un aumento del 3.9%, de igual manera el transporte directo aumenta un 3.54%, dado que al generar una mayor cantidad de energía por parte del combustible las emisiones de Dióxido de Carbono, aumentan proporcionalmente a la variación del poder calorífico.

3.2.3.4 Validación Datos

-Análisis balance masas

El objetivo principal de la realización del balance de masas es contraponer los input y output del sistema para ver las posibles fugas o ausencias de cualquier flujo elemental del sistema.

Para dicho análisis se consideró como unidad de referencia específica, la unidad de masa toneladas y para la temporalidad de 1 año.

La información contabilizada por materiales entrantes parcializada, fue tomada de las planillas de recolección de datos al igual que las salidas de producto.

En el cálculo de transformaciones de metros cúbicos a toneladas de materiales se utilizaron densidades promedios históricos, aportados por la planta en estudio, extraídas de las bases de datos de dosificación de esta, para los casos específicos de la grava, gravilla y arena, las cuales se encuentran señaladas en tabla A-13 Anexo de la presente

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

tesis. En el caso de los aditivos se obtuvieron directamente de las fichas técnicas de los proveedores respectivos de cada tipo.

Para el agua se utilizó la densidad de 1 [ton/m³], el cemento fue considerado en toneladas.

Para el caso de los flujos elementales de salida, como el de la producción total anual de hormigón se tomó una densidad máxima de 2550 (ton/m³), (Zabaleta, 1988).

La ilustración 3-44 muestra el resumen del balance de masas, incluyendo todos los materiales que forman parte del producto final, considerando dicho producto.

A partir de la información generada en el balance de masas, puede desprenderse que las entradas de materiales suman un 99.88%, generando un delta de 0.12% respecto al flujo final. Esto se debe principalmente a la variación de las densidades de cada tipo de hormigón producidos, a residuos que se encuentran en las canchas de acopio de materiales y material que se volatiliza en el proceso de carguío como en el proceso de descarda a las basculas y camiones.

En el caso específico del agua se disminuyó un 7%, del total calculado por perdidas por evaporación y cristalización del agua, propio de las reacciones químicas del procesos de hidratación del cemento presente en el hormigón (Zabaleta, 1988).

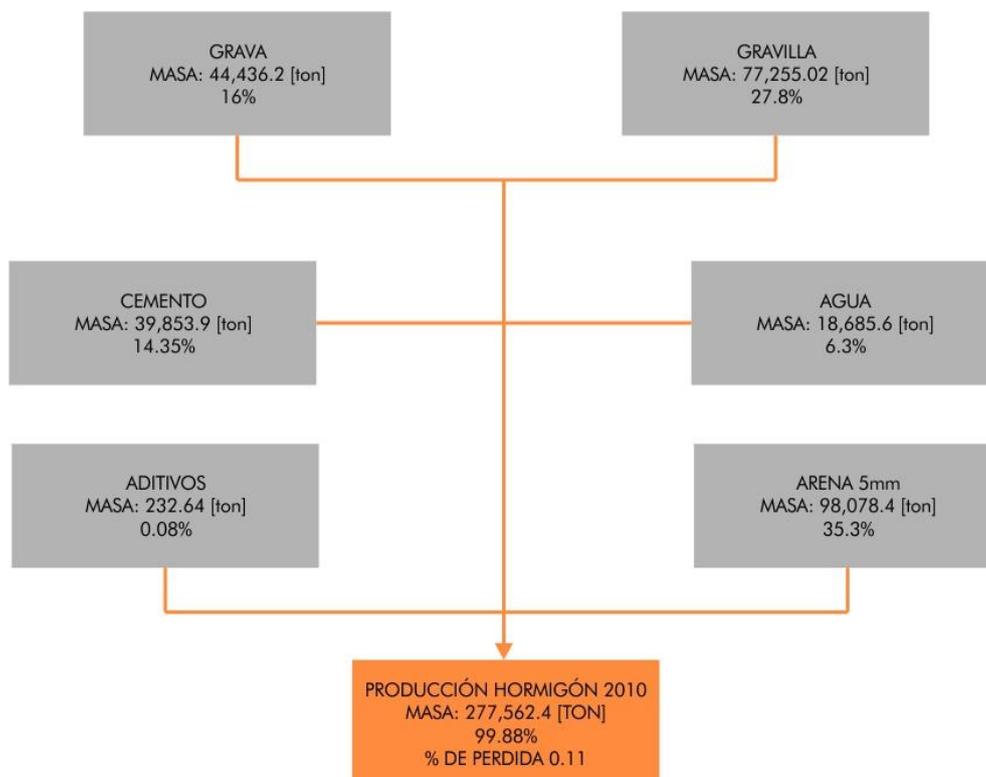


Ilustración 3-44: Balance masas ICV Hormigón Premezclado (elaboración propia, 2010)

3.2.3.5 Análisis comparativo Bases de datos internacionales.

Bases de datos Ecoinvent.

La comparación de los resultados se hace bajo parámetros reales, minimizando los supuestos para así generar una mejor comparación entre los datos obtenidos en el presente estudio y los tomados de la base de datos Ecoinvent.

Se obtuvo la energía contenida de un hormigón premezclado, fabricado en 11 plantas alemanas, de las siguientes características: Hormigón H 30, con una densidad de 2.380 [Kg/m³], 300 kg de *cemento Portland*, 190 kg de agua, 1890 kg de agregados pétreos.

Se consideraron en el estudio de este hormigón los procesos de elaboración para producir concreto premezclado, transporte interno y la infraestructura. No se incluyeron la administración, salidas aguas residuales.

La energía contenida por metro cúbico de este hormigón H30, alcanza los 55,95MJ/m³, considerando combustibles fósiles (diésel) en un 40,57% de transporte directo, un 28,05% de energía eléctrica, otros combustibles como el fuel oil representa un 29.29% y por último gas natural con un 2.07% (con diferencias claras en la composición de la matriz energética considerada para el caso de estudio).

Para lograr la correcta comparación entre la producción total de hormigón premezclado de la planta en estudio, fue necesario acotar partes de su proceso unitario buscando la similitud al estudio obtenido de la base de datos Ecoinvent. De este modo, solo se consideraron los consumos de energía de transporte directo y energía eléctrica utilizada por la planta dosificadoras. No se consideraron el transporte indirecto y se excluyó del transporte directo los despachos de camiones mixer. Para el cálculo de las emisiones de CO₂, se utilizaron los mismos criterios y simplificaciones. En tabla 3-28, se muestran los resultados de esta comparación, cuyos resultados son muy disímiles.

Tabla 3-28: Análisis comparativo energías contenidas y emisiones CO₂ Ecoinvent (elaboración propia, 2010)

UNIDADES	[MJ/M3]	[KG CO ₂ /M3]
Estudios SimaPro 7.3 Base de datos Ecoinvent.	55.95	256.78
UNIDADES	[MJ/M3]	[KG CO ₂ /M3]
Estudio realizado por el investigador	19.88	1.96

A partir de un análisis matemático de estas dos magnitudes, se observa que para la producción de un metro cúbico de hormigón premezclado de grado variable desde un H5 a un H50, se requieren 64.46% menos de energía, en contraste con la necesaria para producir un hormigón H30 producido en Alemania.

Esta comparación se establece asimétricamente, ya que según lo mencionado anteriormente, se compara la producción de diversos hormigones con uno en específico. Contemplando esta condicionalidad se efectúan los supuestos necesarios para desarrollar el análisis comparativo. Supuestos como considerar para este estudio una producción variada de hormigones y no específicamente un solo tipo. Se infiere que existen hormigones premezclados en la planta que pudiesen tener una mayor energía contenida, debido a que poseen una mayor dosificación con respecto a otros igualmente producidos, involucrando así una mayor cantidad de energía en transporte directo y en el proceso de dosificación, generando una compensación y llegando a un equilibrio de todos los hormigones producidos.

La diferencia entre la energía contenida en el estudio realizado y el tomado como referencia puede generarse en gran medida por que el 71.9% de la energía utilizada en el hormigón de referencia son derivados de combustibles fósiles y solo el 28.1% corresponde a energía eléctrica, a diferencia del estudio realizado que considera un 54.1% de combustibles derivados del petróleo y un 45.9% de energía eléctrica.

Es necesario recordar que con un mayor consumo de combustibles, especialmente los que poseen un mayor poder calorífico, como los utilizados en el caso particular del estudio de referencia, que utiliza diésel, aceites y gas natural. Los que elevan considerablemente la energía contenida en el producto debido a que sus elevados poderes caloríficos.

Al comparar las emisiones de CO₂, se aprecia que las emisiones producidas por la producción estudiada son de un 0,76%, con respecto a las generadas en la producción del hormigón de referencia. Esto se debe a los tipos de combustibles utilizados mencionados anteriormente, los cuales generan una importante cantidad de emisiones de dióxido de carbono.

De igual manera se debe considerar los factores de emisión de la energía eléctrica de Alemania, los cuales difieren de los de la matriz energética chilena específicamente para el SIC, la cual es principalmente energía producida por medio de centrales hidroeléctricas en donde las emisiones de Dióxido de Carbono son bajas en comparación a otras fuentes, como centrales termoeléctrica.

Estos factores de cierta manera pudiesen explicar la gran diferencia de emisiones de dióxido de carbono de ambos estudios.

Bases de datos de ICE (University of Bath)

Para este caso en particular se utilizó el inventario (Inventory of carbon and energy) ICE versión 2.0 (enero 2011), de la University of Bath, el cual cuenta con estudios de distintos hormigones premezclados en intervalos según su resistencia mecánica. La cual entrega valores de energía contenida y emisiones de CO₂, para cada uno de los intervalos señalados en tabla A-14 del Anexo del presente documento.

En dicha base de datos se aprecian rangos de resistencia de hormigones premezclados fabricados en plantas de Reino Unido, junto con sus respectivas energías contenidas por kilogramo de hormigón, considerando un ciclo de vida desde la cuna a la puerta.

Al igual que la comparación con base de datos Ecoinvent, debido a la asimetría de la información a contrastar se ajustaron criterios y parámetros comparativos, para de esta forma logra realizar una comparación más uniforme y adaptada a la realidad de los datos contrastados.

Ya que la ICV real, incluye las actividades de transporte de materias primas (transporte indirecto) transporte interno dentro de los límites directos de la planta y proceso de dosificación, carguío del producto y despacho. Se ajustaron los datos de las bases comparativas a estas tres actividades, considerando estudios internacionales que reflejan los porcentajes de consumo y emisiones por actividad (Häkkinen and Vares, 1998.), los cuales son detalladas en tabla A-15 del Anexo de la presente tesis.

En total se considera un porcentaje de 28% para los consumos de energía para las actividades de transporte de materias primas, producción de hormigón y transporte de producto con un 5,16% y 7% respectivamente para cada una de ellas (Häkkinen and Vares, 1998). A partir de estos porcentajes de participación se genera un análisis comparativo con el caso de estudio real, lo cual queda resumido en tabla A-16 del Anexo de la presente tesis. Donde las primeras dos columnas reflejan los datos de energía contenida y emisiones de dióxido de carbono por rango de resistencia de los hormigones en 1 kilogramo de este. La tercera columna en la que se presenta solo el 28% de la energía contenida (MJ/Kg) de los mismos hormigones según lo supuesto anteriormente, junto a ella se aprecia las emisiones

de Dióxido de Carbono (kg CO₂/kg), asociadas a la energía contenida de cada rango de hormigones.

Teniendo en consideración que la producción estudiada en esta investigación consideró una serie de hormigones producidos en 1 año, se hace necesario lograr de igual manera considerar un rango similar de los hormigones descritos en esta base de datos comparativa, los que van desde resistencias de 16 Mpa a 50 Mpa.

Para generar una mayor representatividad de los datos a comparar se aplicó una herramienta estadística de tendencia central (media geométrica), para las energías contenidas y emisiones de CO₂, por cada rango de hormigones hasta llegar a un total ponderado final de 0.23 Mega Joule por kilogramo de hormigón premezclado y 0.03 Kilogramos de CO₂ por kilogramo de hormigón.

Como consecuencia de los cálculos efectuados, se obtuvo una energía de 0,23 MJ/Kg y 0,03 kg de CO₂/kg de hormigón premezclado. A cada rango de resistencia de hormigones premezclado, se le redujo el 28% de energía contenida y emisiones de CO₂ del total, respectivamente.

Con la finalidad de realizar una comparación de los totales parciales para las tres actividades evaluadas, se procedió a buscar la tendencia central de los datos, cuya interpretación es que se requieren 0,23 MJ de energía para producir un kilogramo de hormigón premezclado de rangos de resistencia desde 16 MPa hasta los 50 MPa, en las tres actividades descritas anteriormente para plantas pre mezcladoras del Reino Unido. De igual manera se desprenden que las emisiones de CO₂, asociadas a la energía incorporada en la producción de estos hormigones son del orden de 0,03kg CO₂ por kg de hormigón.

Finalmente para poder realizar una comparación de acuerdo a la unidad funcional planteada en la investigación, se hicieron los cálculos necesarios para llevar la unidad comparativa a metros cúbicos.

De este modo y tal como se expresa en la tabla A-17 y A-18 Anexo del presente documento, es posible hacer un análisis comparativo de acuerdo las mismas unidades funcionales tanto para la energía contenida como para las emisiones de CO₂.

Al contrastar ambos datos se aprecia un diferencial del 37.5% con respecto a la investigación realizada. Este porcentaje correspondiente a 205 Mega Joule por metro cúbico de hormigón, se puede producir debido a una serie de variables propias de cada estudio de las cuales se hace muy difícil generar una homogeneidad de éstas.

Las principales variables son, distancias de recorrido de transporte indirecto de materias primas, transporte directo dentro de las plantas, proceso de dosificación y carguío, al igual que los tipos de medios de transporte y combustibles utilizados en cada estudio, lo cual tiene directa relación con las emisiones de dióxido de carbono.

Como consecuencia de los procesos productivos estudiados y contrastados sus resultados, se infiere que las emisiones de Dióxido de Carbono guardan relación directa con el nivel de energía utilizada en cada una.

La variación en cuanto a las emisiones de Dióxido de Carbono entre la base comparativa y el estudio realizado son de 49.38 Kilogramos de CO₂ por metro cúbico, correspondiente a un 65.9% sobre las calculadas en esta investigación.

Al asociar los datos de energía contenida y emisiones de Dióxido de Carbono, se logra desprender un dato importante el cual guarda directa relación con las emisiones de cada estudio, a diferencia de las comparaciones de energías contenidas en cada estudio comparado se ven diferencias de un 37.5%, en consecuencia, para las emisiones de CO₂ se logran observar diferencias superiores al 50% entre un estudio y otro. De esta información se concluye la importancia de los combustibles utilizados en cada estudio, donde los factores de emisiones cobran gran relevancia, junto con sus poderes caloríficos. Sumado a esto se debe tener en consideración que las matrices energéticas de cada país son diferentes, por lo tanto sus emisiones asociadas en la producción de energía.

Los resultados obtenidos de este análisis comparativo, no reflejan mucha simetría al respecto, pero tal como se ha señalado las variables que influyen en el estudio son decisivas, tal como se señaló para el caso del ICV del cemento los límites y los alcances de los sistemas estudiados son determinantes en las comparaciones de inventario. No obstante, de acuerdo a las comprobación de los resultados (balance de masas y análisis de sensibilidad) se da cuenta que el ICV del hormigón premezclado estudiado puede ser referente para la realidad local y con mayor conocimiento otros inventarios, podría aproximarse a las magnitudes de consumos energéticos y emisiones de CO₂ de procesos similares.

3.2.4 Albañilería de ladrillo

Cada año, alrededor de 100.000 viviendas se construyen en Chile. Más del 40% de estas casas se construyen con muros de albañilería de ladrillo prensado (Bustamante, 2005).

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

En nuestro país, la mayor proporción de viviendas existentes (53%) son de albañilería de ladrillo, bloque de cemento o piedra que constituyen métodos convencionales de construcción en obra, siguiéndole después las viviendas de tabique forrado en madera u otro material (28,2%) (Mideplan, CASEN 2006).

En relación a las viviendas que han sido adquiridas con algún subsidio del Estado (“viviendas sociales”), y que representan el 39,6% de las viviendas a nivel nacional, el 90,7% de ellas se ubica en zonas urbanas, y están construidas predominantemente en albañilería de ladrillo, bloque de cemento o piedra (66,6%), y luego en tabique forrado (22,1%). De hecho, comparadas con las viviendas privadas, aquellas construidas con algún tipo de beneficio estatal presentan un mayor porcentaje de construcción en albañilería tradicional de ladrillo o piedra, y un menor porcentaje en el resto de las materialidades, perfil que se ha mantenido constante en los últimos 15 años (Alvarado, 2009).

La materia prima principal en la fabricación del ladrillo es la arcilla, extraída habitualmente de canteras próximas a la planta. A su vez, el principal componente de la arcilla es el caolín, procedente de la erosión del feldespato, que contiene diversas impurezas, como el cuarzo, mica, feldespato residual, calcita, óxidos de hierro, etc. (Wendehorst R., Vollenschaar D., 1998). La fórmula del caolín se puede aproximar a la de la caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). El uso de diversos aditivos tales como serrín, escorias en polvo, etc. está cada vez más extendido, mejorando tanto el proceso productivo, reduciendo el consumo de combustible en la cocción, como el producto final, incrementando su porosidad y su capacidad aislante. Puesto que la fabricación del ladrillo constituye una industria de bajo valor añadido, resulta esencial la minimización de los costes de transporte entre las canteras y la planta de producción (Hauck, et al., 1997).

Uno de los mayores impactos ambientales asociados a la producción de ladrillos están dados por el consumo energético; cocción arcilla - secado del ladrillo. Finalizado el proceso de extrusión, los bloques de ladrillo deben permanecer durante 36 horas en horno de secado, el cual opera con una temperatura promedio de 60°C. Para posteriormente continuar el proceso en hornos de cocción, el cual logra alcanzar temperaturas de 900°C donde los ladrillos deben permanecer cerca de 3 horas.

(Zabalza, 2010) señala, que para fabricar un kilo de ladrillos se requiere consumir 3,56MJ equivalentes de energía primaria, gastar 1,89 litros de agua y emitir a la atmósfera 270 gramos de CO_2 .

En nuestro país no contamos con inventarios de ciclo de vida específicos para la fabricación de materiales de construcción, que permitan para este caso, evaluar con

precisión los aspectos e impactos ambientales vinculados al proceso de producción de un ladrillo cerámico. Considerando además, tal como se ha señalado en capítulo dos, que uno de los mayores problemas existentes para la elaboración de inventarios ambientales, es el acceso a la información referida al proceso productivo, lo que dificulta aún más avanzar en esa materia.

Pese a que, para la elaboración de un IVC para el proceso de fabricación de ladrillo cerámico con características locales, no fue posible contar con información primaria ni secundaria completa (a diferencia de lo ocurrió con la elaboración de los ICV de madera, cemento y hormigón premezclado), y en un esfuerzo por alcanzar primeras aproximaciones de los valores asociados al consumo energético y emisiones de CO₂ asociados al proceso productivo. Se ha desarrollado un ICV, a partir de información bastante restringida en términos de disponibilidad y confidencialidad, pero que permite tal como se ha señalado *estimar* los resultados que de energía contenida y huella de carbono, asociados a dicho proceso productivo.

A continuación se presenta dicho inventario, detallando los criterios y procedimientos para tratar los datos recolectados.

3.2.4.1 Inventario Ambiental proceso de fabricación de ladrillos (ICV - Ladrillo)

-Objetivo: determinación energía contenida en el proceso de fabricación del ladrillo.

-Alcance del estudio: Planta de producción de ladrillos, ubicada en la ciudad de Nacimiento, región del Biobío Chile.

-Unidad Funcional: 1 kg. de ladrillo cerámico.

-Flujo de referencia: MJ/kg Ladrillo cerámico.

-Límites del sistema: (de la cuna a la puerta), considera la extracción y transporte de materias primas hasta el posterior abastecimiento de estas en la planta correspondiente a cada proceso y subproceso.

-Criterios de inclusión de datos: Para el desarrollo de este inventario, no se contó con el total de información referida al abastecimiento de materias primas consumidas, para la temporalidad de estudio de un año. De este modo fue necesario aplicaron herramientas estadísticas, que le otorgarán mayor validez a los resultados, lo cual será detallado en el desarrollo de ICV.

*Nota: La industria al momento de desarrollar el trabajo de campo, al igual que las otras plantas estudiadas estaba con menos producción que lo habitual por efectos del terremoto 27F.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

-Validación de los resultados: Dado a que en Chile no existen inventarios ambientales que evalúen los aspectos ambientales del proceso de fabricación de ladrillo cerámico, y de este modo, poder comparar los resultados obtenidos, se hace necesario establecer un criterio para la validación de estos.

Para ello se realizará una comparación con bases de datos reconocidas internacionalmente, descritas y mencionadas en los ICV ya realizados (madera, cemento y hormigón premezclado).

Para simplificar y facilitar los criterios para los inputs y outputs considerados, en desarrollo del ICV, en ilustración 3-45, se detalla el diagrama de flujo correspondiente a los procesos unitarios a evaluar.



Ilustración 3-45: Diagrama de Flujo proceso fabricación ladrillo cerámico (elaboración propia, 2010)

Las entradas y salidas consideradas para el ICV, del Sistema estudiado son:

Entradas: Para el Sistema estudiado, las entradas estarán compuestas por materias primas, combustibles, energía térmica y energía eléctrica. Detalladamente, se tiene:

A1) Materias primas: madera, aserrín, pellet, carbón coque, arcilla

A2) Combustibles: diésel y gas licuado

Salidas: las salidas consideradas corresponden principalmente a los productos que produce la planta, pero al igual que el proceso productivo del hormigón premezclado no se hace una diferenciación entre ellos y se considera sólo un producto final, lo cual permite trabajar en forma congruente con la unidad funcional seleccionada (1 kg de ladrillo cerámico). De este modo la salida será:

B1) Ladrillo cerámico

B2) emisiones CO₂

3.2.4.2 Resultados recolección de datos

Como ya ha sido señalado para la recolección de datos, se ha recurrido al uso de herramientas estadísticas, para dar tratamiento a la información faltante. Por restricciones de confidencialidad de la industria estudiada, no se ha tenido accesos a la información referida a la cantidad de arcilla ingresada al Sistema, por lo tanto a partir del total de productos (dos tipos de ladrillos Sansón y Sansón 10), se ha desagregado dicha información, distribuyendo los consumos energéticos y combustibles para aproximar los resultados de los inputs que entran al proceso productivo.

Con respecto al análisis del uso del estadígrafos de tendencia central, tanto el uso de la mediana como de la media aritmética los cuales entregan resultados muy poco representativos, y debido a que la muestra presenta grandes rangos de dispersión en cuanto a la producción mensual (ver ilustraciones 3-46 y 3-47), se seleccionó como medida de tendencia central el uso de la media geométrica. Para este caso, esta herramienta es menos sensible a los valores extremos y además en ella intervienen todos los valores de la distribución.

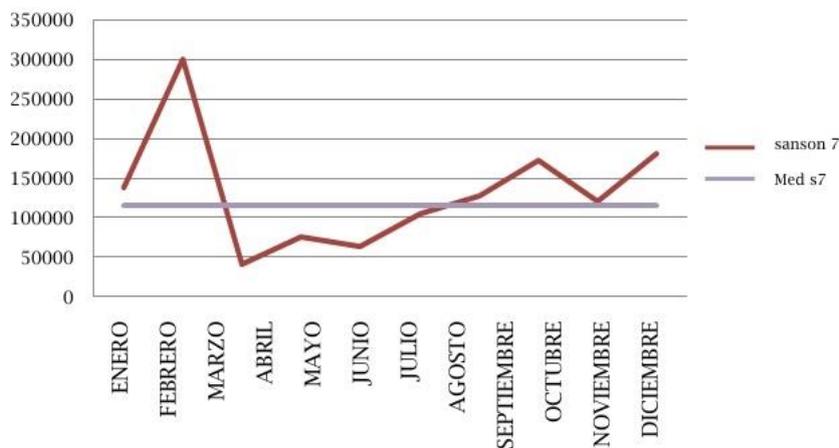


Ilustración 3-46: Producciones mensuales sansón 7 y media geométrica correspondiente (elaboración propia, 2010)

A partir de la definición de los valores de tendencia central, se transforman las unidades de ladrillos producidas mensualmente a totales de ladrillo en kg producido (de acuerdo a la unidad funcional definida para el ICV), cuyo total alcanza un total de $9,93 \times 10^5$ Kg ladrillos /mes.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

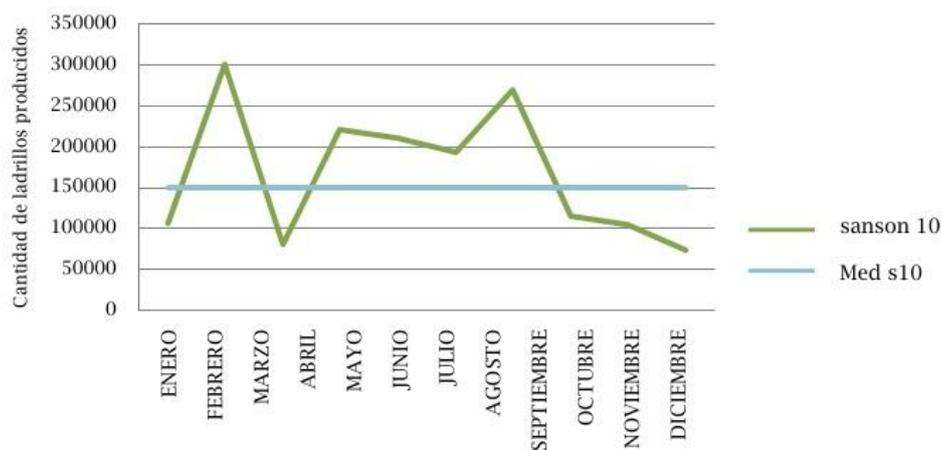


Ilustración 3-47: Producciones mensuales sansón 10 y media geométrica correspondiente (elaboración propia, 2010)

Teniendo establecidas las cantidades de producción de acuerdo a la unidad funcional definida, se procede a la recopilación de datos para asignar los inputs al *Sistema* por proceso unitario, referido a transportes directos e indirectos.

Concluida la contabilización del primer proceso unitario (transportes directos e indirectos), posteriormente fueron contabilizadas las entradas correspondientes al proceso de tratamiento mecánico, cuyos resultados se muestran en tablas, 3-29 y 3-30.

Tabla 3-29: Planilla recolección de datos proceso unitario secado (elaboración, 2010)

Descripción del proceso unitario				
Entradas de material	Unidades	Cantidad	Descripción de procedimientos de muestreo	Origen
Madera	Metro ruma(MR) / mes	120	Cantidad utilizada al mes para abastecer la cámara de secado.	Aserradero
Aserrín	M3/mes	144	Cantidades medidas por M3 de consumo diario	Aserradero

Tabla 3-30: Planilla recolección de datos proceso de cocción (elaboración, 2010)

Descripción del proceso unitario.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Entradas de material	Unidades	Cantidad	Descripción de procedimientos de muestreo	de Origen
Pellets	Kg/mes	56700	Cantidad medida por consumo mensual	Promasa
Carbón Coque	Kg/mes	5400	Cantidades medidas por Kg de consumo diario	Lebu

3.2.4.3 Cálculos de energía contenida y emisiones de CO₂

Concluido el levantamiento de la información respecto a los consumos energéticos por procesos unitarios se procedió a realizar los cálculos de energía contenida, para ello en tabla A-19 del Anexo se entregan valores de los poderes caloríficos utilizados para dichos cálculos, cuyos resultados quedan todos expresados en tabla 3-31.

Finalmente y a partir del resultado de la energía contenida en materias primas mensualmente, se procedió determinar la energía contenida para la unidad funcional del ICV, mediante la división de la energía entregada al sistema con el promedio geométrico mensual de producción por kg de ladrillo.

De este modo para un total de $3,642 \times 10^6$ MJ/mes, equivalente a un aproximado $9,93 \times 10^5$ kg/mes, se obtiene un tiene un total de energía contenida 3,66 MJ/kg de ladrillo cerámico.

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

Tabla 3-31: Energía contenida materias primas mensual - ICV ladrillos cerámicos (elaboración propia, 2010)

Energía contenida PCI								
Tipo mat prima combustible	Unidad tiempo	Unidad de medida	Total consumo	Unidad poder calorífico	PCI	Transformación unidades Kg	Transformación poder cal. Kj/kg	Total Energía kj
Madera	Mes	MR	120	Kj/Kg	14400	139.440	14400	2.007.936.000
Aserrín	Mes	M3	144	Kj/Kg	13400	31.248	13400	418.723.200
Pellet	Mes	Kg	56700	Kcal/Kg	4.000	56700	16.640	943.488.000
Carbón coque	Mes	Kg	5400	Kj/kg	29.300	5400	29.300	158.220.000
Gas licuado	Mes	Kg	792	Kcal/kg	10734	792	44.653	35.365.524
Diesel	Mes	Lts	1958	Kcal/kg	10165	1.723	42.286	72.860.469
Electricidad	Mes	Kwh	260					936.000
							Total energías mes Kj	3.637.529.194
							Transformación a Mj	3.637.529,2
							Total Mj mes	3.637.529,2

3.2.4.4 Comparación resultados con bases de datos internacionales

Ecoinvent.

Teniendo en cuenta que el valor obtenido como resultado para la energía contenida, es una primera aproximación del valor de la energía real del proceso, en términos que la cantidad de información primaria no ha sido completa y con el propósito de comparar el resultado obtenido con otras fuentes reconocidas, se decide realizar una comparación con los valores entregados por la base de datos Ecoinvent. Para ello, se ha trabajado en SimaPro con los datos entregado por bases de datos Ecoinvent, considerado el ciclo de vida del ladrillo en España (de la cuna a la puerta) y ajustando los valores para la matriz energética chilena, de este modo se ha establecido que de acuerdo a las tablas A-20 y A-21, Anexo de la presente tesis, donde se establecen las entradas desde la tecnosfera para la producción de 1 kWh para Chile y España, respectivamente.

De este modo y a partir de la información recogida del inventario para ladrillo cerámico de SimaPro, se tiene que para la etapa de ciclo de vida de una ladrillo cerámico, la energía en MJ, para el proceso de fabricación lo que equivale a un 78,2% del total, alcanza 2,79 MJ/kg y el potencial de calentamiento del orden de 0,22 Kg CO₂/kg ladrillo, según se resume en tabla 3-32.

Tabla 3-32: Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida de 1 kg de ladrillo cerámico (Circe, 2012)

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	2,79	0,33	0,15	0,30	3,56
	78,2%	9,2%	4,3%	8,3%	
Potencial de calentamiento global (kg CO ₂ -Eq)	0,22	0,02	0,02	0,01	0,27
	80,3%	7,1%	7,7%	4,9%	
Huella hídrica (l)	1,21	0,15	0,29	0,24	1,89
	63,8%	7,8%	15,5%	12,9%	
Puntuación única (mPt)	11,20	1,76	0,61	2,44	16,00
	70,0%	11,0%	3,8%	15,2%	

De esto al incorporar los valores de la matriz energética chilena, con sus respectivos poderes caloríficos y coeficientes de emisión, se tiene que el valor final de la energía contenida de la base de datos SimaPro, la cual alcanza a 3,585MJ /kg, comparada con la obtenida en el estudio arroja una diferencia mayor de 0,8 MJ/kg y una diferencia menor de 5x10⁻³ MJ /Kg.

De este modo puede concluirse, primero que no es sorprendente que la energía contenida para el proceso de producción de fabricación de ladrillo cerámico en Chile sea mayor, ya que si se comparan las estructuras de las matrices energéticas utilizadas (España y Chilena) se da cuenta que nuestra matriz tiene una componente de combustible fósil no menor 30%. En el caso de España la matriz energética incorpora energías renovables no convencionales (ERNC) en un porcentaje del orden del 20,2% y energía nuclear en orden del 20% lo que reduce bastante el efecto tanto en la energía contenida como en las emisiones de CO₂ asociadas.

Si bien es cierto, no podríamos validar el resultado que se ha obtenido para la determinación de la energía contenida, pero al menos en términos de orden de magnitud se acerca a los establecido en una reconocida base de datos.

Con respecto a las emisiones de CO₂, para este material no fueron determinadas, básicamente por no contar con la información primaria necesaria para calcularla, pero en función del análisis recientemente realizado podría estimarse que dichas emisiones debieran establecerse en un rango de 0,22kg CO₂ x 1,285= 0,28 Kg CO₂/kg de ladrillo (considerando un porcentaje de 28,5% mayor al obtenido para matriz considerada en Sima Pro).

3.2.4.5 Análisis de sensibilidad

Utilizando los mismos criterios para los ICV desarrollados, y con el fin de analizar los supuestos y los datos obtenidos a lo largo de esta investigación, se realizará un análisis de sensibilidad para determinar la relevancia de algunos supuestos y alcances asumidos.

Análisis comparativo de poderes caloríficos

Teniendo en cuenta que los resultados hasta aquí obtenidos han sido analizados considerando sólo el poder calorífico inferior (PCI), se hará el mismo procedimiento de cálculo pero ahora considerando el poder calorífico superior (PCS), para la determinación de la energía contenida en 1 kg de ladrillo con la finalidad de evaluar su significancia en los resultados obtenidos.

De este modo se tiene que los resultados en determinación de la energía contenida considerando el poder calorífico superior (PCS), para un total de $4,43 \times 10^6$ MJ/ mes, es decir considerando $9,93 \times 10^5$ Kg/mes. Se alcanza un total de energía contenida 4,46 MJ/kg de ladrillo.

En Ilustración 3-48, se muestra el efecto comparativo entre el resultado obtenido anteriormente 3,66 MJ/kg (PCI) y los 4,46 MJ/kg (PCS). Evidenciando el incremento

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

considerable de la energía contenida, variando el poder calorífico de los combustibles asociados a las materias primas, con las consiguientes variaciones en los resultados obtenidos.

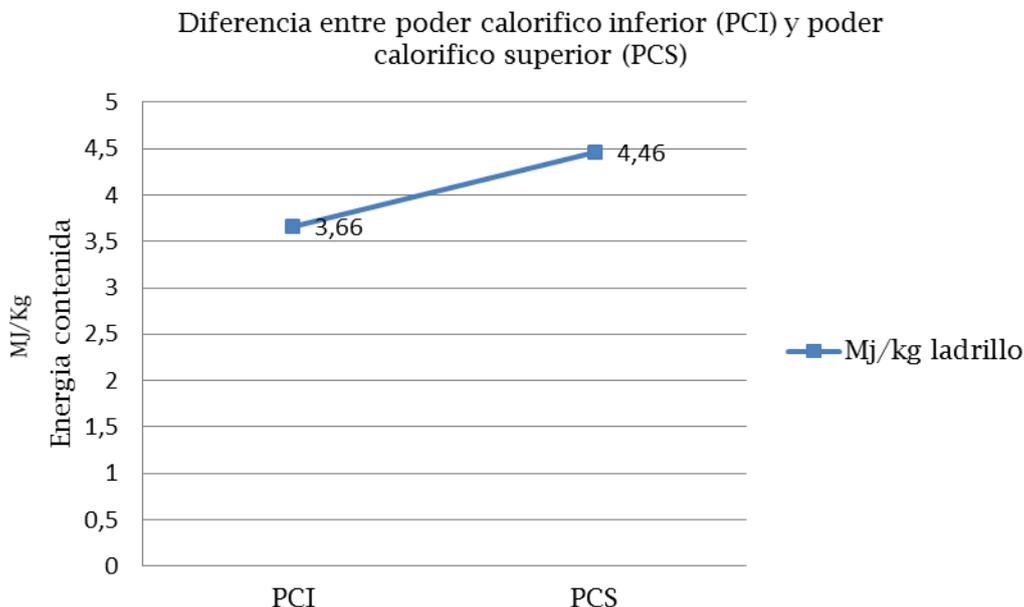


Ilustración 3-48: Diferencia entre energía contenida poder calorífico inferior y superior (elaboración propia, 2010)

Finalmente, se analizan los procesos unitarios que demandan mayor consumo energético, en Ilustración 3-49 se muestra que el proceso que más consume más energía, corresponde al secado del ladrillo, lo cual a simple vista resulta singular, debido a que lo lógico era esperar que el proceso que demandara mayor cantidad de energía fuera el proceso de cocción del ladrillo, esto por las altas temperaturas que alcanza (aprox. 900°C). No obstante, debido al tiempo que los ladrillos son mantenidos en la cámara de secado, cerca de 36 horas continuas, hacen que el proceso unitario de secado demande mayor consumo energético, asociando la alta cantidad de materia prima necesaria para mantener la cámara a temperaturas constantes.

A partir de los resultados obtenidos, también pueden ser relacionados los procesos unitarios entre sí

De este análisis también se obtuvo una relación existente entre los porcentajes de participación, con respecto al consumo energético de los procesos unitarios evaluados. A partir de la Ilustración 3-50 se advierte, que el proceso unitario asociado al tratamiento mecánico de las arcillas es muy poco influyente, con respecto al consumo de energía total del sistema, la cual no alcanza el 0,5% de esta. Situación similar ocurre con la energía

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

consumida, asociada al proceso unitario de transporte de materias primas con una participación muy baja con respecto al total, del orden del 3%.

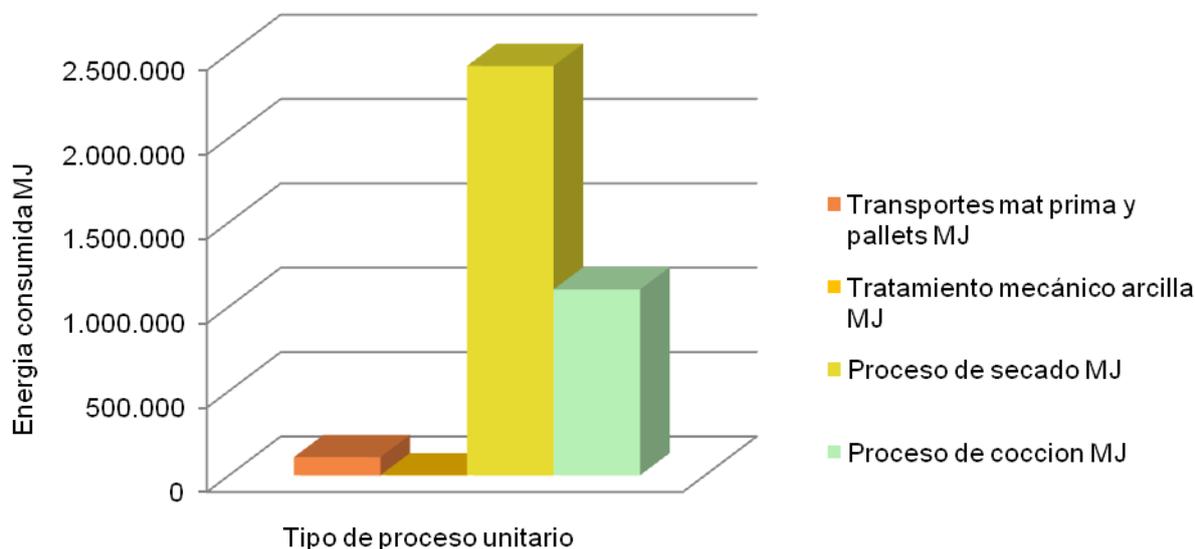


Ilustración 3-49: Comparación de consumos energéticos por proceso unitario (elaboración propia, 2010)

De este modo donde realmente están concentrados los consumos energéticos y las respectivas emisiones de CO₂, se encuentran tal como se ha señalado en punto 3.2.4.

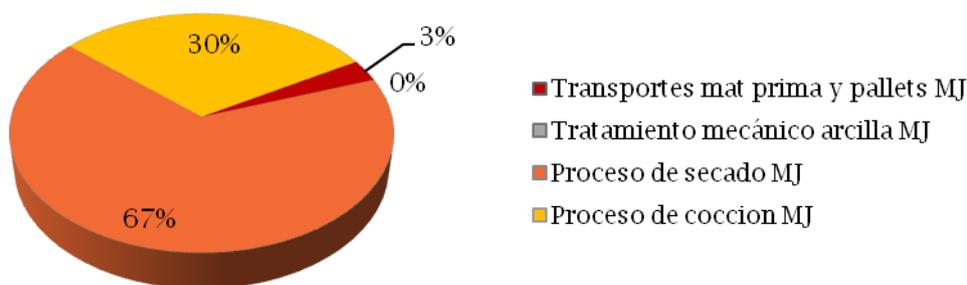


Ilustración 3-50: Porcentaje de incidencia de la energía en procesos unitarios en 1 kg de ladrillo

Podría señalarse entonces, que cualquier medida orientada a mejorar el desempeño ambiental del proceso de producción de ladrillos (con tecnología similares a la estudiada), debería centrarse principalmente a la reducción del consumo energético en los *procesos unitarios de secado y cocción del ladrillo*, ya que la suma de los porcentajes de

participación de estos dos sistemas unitarios alcanzan en 90% del total del consumo energético.

Al respecto (Zabalza, 2010), señala que a nivel mundial se están haciendo importantes esfuerzos para disminuir el fuerte impacto del consumo energético y efectos en las emisiones de CO₂ en la industria de fabricación del ladrillo (asociadas principalmente a al horno y proceso de secado) y entre las iniciativas destaca: utilización de paja u otro aditivo biomásico como elemento aligerante de ladrillos, recuperación de calor de hornos de cocción para precalentar/secar los productos cerámicos a cocer, sustitución de hornos de menor rendimiento por hornos túnel automáticos y continuos, instalación de quemadores de alta velocidad para calentar hornos túnel, secado y cocción de cerámicas asistidas por microondas, entre otras.

3.3 CONCLUSIONES

En Chile no se cuenta con datos públicos sobre inventarios ambientales de materiales de construcción, por lo que, al finalizar este capítulo se muestra la relevancia de avanzar en esta materia en términos que se evidenciado la importante cantidad de aspectos e impactos ambientales asociados a los *procesos unitarios* que forman parte de un *sistema* (productivo), teniendo en cuenta que el objetivo principal de esta investigación apunta a la categoría de impacto referida a la energía contenida y las emisiones de CO₂, asociadas a ello.

Ante la falta de datos públicos, existe la posibilidad trabajar sobre bases de datos e inventarios existentes, en efecto son una positiva ayuda, pero con claras limitaciones referidas principalmente a la asimetría de los *límites de los sistemas* estudiados, lo cual dificulta los análisis y conclusiones finales.

Al respecto (Carvalho, 2001) señala, que los inventarios existentes abarcan productos industriales muy amplios y son escasos los correspondientes a materiales de construcción. En correspondencia, existen modelos teóricos, que basándose en los resultados medidos y, en algunos casos, puede ser una alternativa razonable de minimización de mediciones producto de un trabajo de campo, tal como ha sucedido en el estudio de esta tesis.

Como resultado de este capítulo, se ha podido responder al objetivo referido a la determinación de la energía contenida y emisiones de gases efecto invernadero (al menos

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

para madera, cemento y hormigón premezclado), considerando características locales. Se ha visto la aplicación de la metodología ACV en el desarrollo los inventarios señalados y permitiendo construir una pequeña base de datos con los materiales mayormente utilizados en envolventes de viviendas, según lo señalado en los puntos 3.2.4 y 3.2.5, los cuales quedan resumidos en tabla 3-33. Dichos resultados serán incorporados en un estudio caso para evaluar con un enfoque de ciclo de vida, el aporte de la energía contenida y emisiones de CO₂ de estos materiales como parte de una envolvente térmica, tema que será desarrollado en detall en capítulo cinco.

Tabla 3-33: Resultados Base de datos inventarios ciclo de vida (ICV) de materiales (elaboración propia 2010)

Material	Unidad Funcional	Energía contenida	Emisiones de CO ₂
Madera	MJ/m ³	3.279 MJ/m ³	32 Kg CO ₂ /m ³
Cemento	MJ/Ton	2.632 MJ/Ton	502 Kg CO ₂ /Ton
Hormigón Premezclado	MJ/m ³	342 MJ/m ³	25,9 Kg CO ₂ / m ³
Ladrillo	MJ/kg	4 MJ/kg	0,3 Kg CO ₂ /kg

Para cada ICV desarrollado se recogen una serie de conclusiones considerables, las cuales se ha resumido y agrupado por materialidad:

ICV madera

- Se obtuvieron valores de consumo energéticos del orden de 3.279 (MJ/m³), en comparación a valores de 3.945 (MJ/m³) en estudios realizados por el CORRIM en el sureste de EE.UU, utilizando la misma metodología (ACV), lo que demuestra que los procesos productivos de la industria de la madera en estudio, están dentro de rangos internacionales de países desarrollados.
- Si se compara el consumo energético con el resto de materiales de construcción estudiados, queda demostrado que la madera es uno de los materiales que consume menor cantidad de energía en su proceso de elaboración, en nuestro país al igual que en el resto del mundo. Por lo que potenciar su consumo en relación a otros materiales con consumos de energía más elevados claramente es una forma de disminuir los impactos ambientales asociados.
- El porcentaje de energía térmica utilizada en los procesos de secado los que superan el 90% del consumo total de energía, muestra los altos poderes caloríficos

de los residuos de la madera, por lo que su utilización como subproducto biomásico es de vital importancia.

- La huella de carbono se ve mayoritariamente disminuida por la utilización de Biomasa en los procesos de secado, ya que como se mencionó, este proceso no es considerado para el cálculo de las emisiones de CO₂.

- Si bien la recopilación de datos se realizó en una sola planta, los valores de producción fueron triangulados con informes nacionales de producción forestal, en los que las variaciones porcentuales no son considerables alcanzando un máximo no superiores a 6,4% en los flujos de asignación de producto, además se debe mencionar que la asignación de producción realizada por la empresa es acorde a las necesidades de mercado. Al comparar los consumos energéticos con España éstos difieren considerablemente en valor por metro cúbico, aunque la relación de distribución de flujo es constante, mientras que con estudios realizados en EE.UU. por el CORRIM, se reducen el valor de consumo por metro cúbico y se mantienen las variaciones de distribución de flujos.

➤ **ICV Cemento**

- Los resultados del ICV la producción de cemento siderúrgico, muestran una importante cantidad de datos e información valiosa para analizar y comparar, los porcentajes de incidencia de cada proceso unitario estudiado, los cuales por cierto, al ser comparados dentro de similitud de límites del sistema, estuvieron dentro de los rangos de magnitud, al ser comparados con otros inventarios reconocidos (SimaPro y Cemberau).

- Las grandes particularidades del sistema productor en estudio fueron los combustibles usados, asociados a la matriz energética de nuestro país y el uso de la escoria de alto horno.

- Las emisiones se producen principalmente en la fabricación de Clinker, tanto por las reacciones químicas que se originan, como por la quema de combustibles fósiles.

- Con respecto a los combustibles mayormente utilizados y sistemas para la generación de energía; carbón, coque de petróleo y la energía eléctrica. Se determinó que el carbón, a diferencia de lo que se suponía, es el que presentó mayores impactos asociados a las emisiones de CO₂. Con un menor poder calorífico, comparado con el petcoke (residuo del petróleo), esto se demuestra en las variaciones que hay entre los años 2007 y 2008, donde el 2008 hay una baja de 1,09% en la producción de cemento, pero un aumento de un 4,82% en las emisiones de CO₂. Este aumento de emisiones se asocia al mayor consumo de carbón en el mismo año y la baja de uso de coque de petróleo, sin embargo se debe considerar que el carbón y el petcoke suman el 84,5% del consumo energético y el 87,8% de emisiones de CO₂ de la planta.

- Los aportes energéticos de los combustibles depende de su poder calorífico, y cada tonelada que se use influye en la energía contenida que tenga el cemento. Si se comparan los valores de energía de distintos cemento de distintos países, con el valor obtenido en este estudio vemos que la energía contenida del cemento siderúrgico es menor que la del resto, la razón de esto es el ahorro de energía que se produce por el uso de escoria de alto horno, lo que aumenta el volumen de producción pero no aporta como una entrada de energía, por ser un residuo de otro proceso, y solo participa en la etapa de obtención del cemento siderúrgico posterior a la calcinación del clinker.

- La huella de carbono está dentro del rango de magnitudes en comparación con las emisiones de otros países, este rango puede variar dependiendo de los límites de cada estudio, pero los resultados hace plantearnos la siguiente pregunta; ¿Por qué las emisiones de CO₂ están en el mismo orden de magnitud de otros países si tenemos un menor consumo de energía en el proceso productivo?, para esta interrogante se presentan dos posibles respuestas, primero que al aplicar la metodología ACV , los límites del estudio son más amplios que la de otras investigaciones, lo que es favorable al ver que tenemos casi la misma cantidad de emisión para un alcance de estudio mayor, y la segunda posibilidad es el uso de combustibles que registran mayores factores de emisión y un menor poder calorífico, consideremos el gas natural, combustible que se usa en menor medida pero que presenta el mayor poder calorífico y el menor factor de emisión, pero el

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

costo de este combustible es mayor y el estudio de esta variable no está considerada dentro de los alcances de esta investigación.

➤ **ICV Hormigón premezclado.**

- El ICV del proceso productivo del hormigón premezclado ha permitido, al igual que el desarrollo de los otros inventarios, establecer la implicancia de cuáles son los procesos unitarios que generan lo mayores consumos energéticos, al respecto:
- El transporte indirecto de materias primas aportó un 51.45% del consumo total de energía, a diferencia de los consumos internos de transporte directo y proceso de dosificación y carguío de la planta hormigonera, las que combinadas aportaron un 48.55% del consumo total de energía. Siendo estas dos procesos unitarios los más relevantes, desde el punto de vista del consumo energético y en donde habría que pensar en medidas de ahorro, considerando que son además actividades estratégicas dentro del proceso.
- La entrada de distintas materias primas a la planta conlleva un gasto o un consumo de energía asociado al transporte de estas, como lo es el elevado consumo de energía asociado al transporte de áridos; específicamente gravilla y grava con cerca del 59.5% y 33.5% respectivamente, del consumo total del transporte indirecto.
- Del mismo modo, las mayores emisiones de CO₂ del sistema estudiado, están asociadas al transporte de áridos; gravilla y grava con 28,7% y 169% respectivamente, del total de las emisiones anuales. Así podemos concluir que tanto la energía contenida como las emisiones de dióxido de carbono, asociadas al transporte indirecto de estos dos materiales, son las que presentan una mayor incidencia en todo el estudio.
- Como consecuencia de estos resultados se abren nuevas líneas de mejora en cuanto a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, en el proceso y por defecto a la reducción de la energía contenida en la producción total. Algunas recomendaciones para el cumplimiento de estas metas futuras pudiesen ser la aplicación de mejores tecnologías de maquinarias de transporte con mayor rendimiento y menor cantidad de emisiones, al igual que aumentar la capacidad de

carga de estos, lograr una cercanía de los proveedores a la planta para reducir las distancias de transporte, entre otros.

- Como resultado final de la investigación se determinó que para producir un metro cúbico de hormigón premezclado en el periodo 2010 en la planta en estudio se requieren 342.15 Mega Joules de energía, los que generan 25.83 kilogramos de Dióxido de Carbono. Dicho de otro modo en 1 Kilogramo de hormigón estudiado, existe una huella de carbono de 0.010 [Kg CO₂].

Al comparar parte de esta investigación con otras buscando la simetría en los límites de los procesos, se aprecia un aumento del 64.46% de la energía contenida por parte del estudio de referencia junto con una generación de Dióxido de Carbono de un 99.3% con respecto a las emisiones calculadas.

➤ **ICV Ladrillo**

- El ICV del proceso de fabricación de ladrillo es quizá el proceso con menos recursos tecnológicos comparados con los anteriormente desarrollados, ya que es una actividad considerada todavía bastante artesanal, no obstante es una actividad con un alto impacto en el consumo energético. Los mayores consumos energéticos están dados por el consumo energético; cocción arcilla, secado del ladrillo, para este estudio hablamos de porcentajes de participación sobre el total del consumo energético de un 66,7% y un 30,3%.

- Como quedó demostrado en la cuantificación de los procesos unitarios, el proceso que consume mayor demanda energética por 1 Kg de ladrillo, es el proceso de secado, debido a que la cámara debe estar en constante funcionamiento cerca de 36 horas lo cual demanda una mayor cantidad de energía a largo plazo.

- Dado que este ICV, comparado con los otros realizado (madera, cemento y hormigón premezclado), fue el más dificultoso de construir en términos, que no se contó con toda la información necesaria para establecer a cabalidad los estudios de los procesos unitarios. Entrega de igual una primera aproximación de la energía contenida asociada al proceso productivo de fabricación de ladrillo, la cual alcanza un valor de 3,66 MJ/kg ladrillo y una huella de carbono estimada de 0,28 kg CO₂/kg de ladrillo. Dejando muy bien establecidos los aspectos metodológicos y el

Capítulo 3 / Inventario ambiental (ICV): Determinación de energía contenida y huella de carbono en materiales de construcción

tratamiento que se ha dado al estudio para manejar la información faltante, permitiendo de este modo, a otro investigador completar el estudio.

- Este tipo de investigaciones deben estar en constante revisión, ya que los procesos unitarios, cada vez van a ir siendo optimizados no sólo del punto de vista energético, sino tecnológico pudiendo este efecto causar variaciones en los valores asociados al consumo energético e emisiones de CO₂.

4 CAPÍTULO 4: INVENTARIO AMBIENTAL (ICV): DETERMINACIÓN ENERGÍA CONTENIDA Y HUELLA DE CARBONO PARA LA FASE DE COSTRUCCIÓN.

4.1 INTRODUCCIÓN.

Según el Programa para las Naciones Unidas, la construcción sustentable debe constituir una manera de satisfacer las necesidades de vivienda e infraestructura del presente, sin comprometer la capacidad de generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades en tiempos futuros (UNEP, 2010).

La construcción sustentable debiera centrarse en minimizar la cantidad de recursos que consumen actualmente los edificios habitacionales durante su ciclo de vida. Recursos que, en su mayoría, no son renovables y su utilización tiene repercusiones directas en el ambiente, a saber, cargas ambientales a escala local y global. Impactos ambientales que derivan además en impactos sociales y económicos, siendo de este modo la eficiencia en el uso de la energía característico de las construcciones sustentables (Hernández y Meza, 2010).

Según la UNEP, el sector de la construcción, a nivel mundial, contribuye hasta en un 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente por el uso de energía durante la vida útil de los edificios. Por lo tanto, identificar oportunidades para reducir estas emisiones, dentro de la cadena de valor de un edificio, se ha convertido en una prioridad en el esfuerzo mundial para reducir el cambio climático.

Con respecto al consumo energético, referido al ciclo de vida de un edificio, puede indicarse, que la fabricación de materiales para construir un metro cuadrado de edificación estándar, puede suponer el consumo de energía equivalente a unos 6.000 MJ. El uso del mismo edificio, en condiciones habituales, durante el periodo de un año (expresado en m²), puede alcanzar los 500 MJ. Considerando la energía de uso del edificio para una vida útil de 50 años y sumándola a la de producción de los materiales, se llega a un valor total de 30.000 MJ/m² o bien 755 litros de gasolina/m² (Wadel et al., 2010).

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Algunos investigadores sugieren que el impacto ambiental referido al consumo energético durante la fase de construcción de un edificio es menor, en comparación con la fase de operación. Otros investigadores argumentan que este tema no está bien estudiado y que cuantificar el impacto es necesario para neutralizar dichos efectos (Xiaodong et al., 2009).

Por todo lo anteriormente descrito, la reducción del impacto medioambiental de los edificios requiere de la aplicación de metodologías de evaluación de impacto adecuadas, de carácter global y local, y que incluyan todas las etapas de la vida útil de un edificio.

En el presente capítulo a través de un caso estudio, se identifican y cuantifican los recursos materiales y energéticos consumidos en la fase de construcción de una edificación.

Mediante la aplicación de un análisis de ciclo de vida simplificado, se realiza una evaluación de los aspectos e impactos ambientales asociados a dichos recursos y se evalúan de acuerdo a la categoría de impacto energía contenida y potencial de calentamiento global, con parámetros e indicadores ambientales sitio específicos para Chile.

Los resultados de este estudio de campo muestran por una parte que casi el 100 por ciento de los recursos consumidos constituyen barreras para la sostenibilidad y por otro lado desde el punto de vista del consumo energético y emisiones de CO₂, el mayor aporte está dado por las actividades de fundaciones y albañilerías de ladrillo.

Finalmente se advierte que desde un enfoque de ciclo de vida, el consumo energético de la fase de construcción, es despreciable con respecto a otras fases del ciclo de vida estudiadas.

4.2 ASPECTOS TEÓRICOS

Tal como se señaló en el capítulo uno (punto 1.2.2.), un edificio puede ser considerado como un conjunto integrado de productos componentes, los cuales son fabricados, usados y dispuestos de acuerdo a su vida útil. Pudiendo indicarse entonces, que un edificio, en sí mismo, corresponde a un Sistema Producto.

Por otro lado, y tal como se ha venido señalando en capítulos anteriores, el análisis de ciclo de vida (ACV) estudia los aspectos medioambientales e impactos ambientales durante la vida de un producto desde la adquisición de la materia prima hasta la producción, uso y disposición (es decir; de la cuna a la tumba), lo que para el caso de un edificio, quedaría representado en la Ilustración 4-1.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

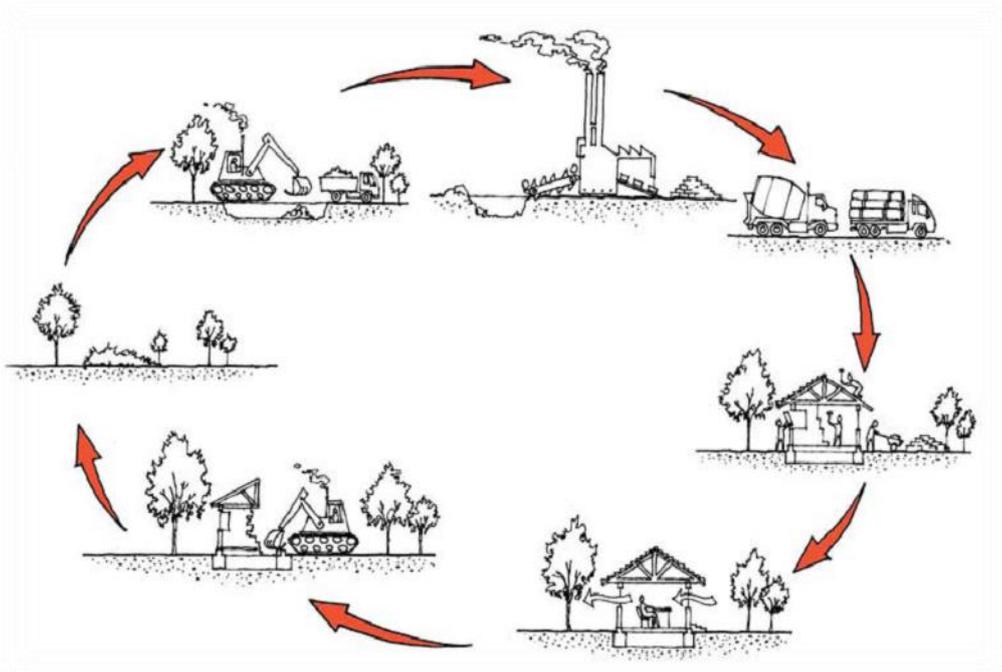


Ilustración 4-1: Ciclo de Vida de un producto - vivienda (Bustamante, 2009)

El principio normativo ISO 14.040 – 2006, indica que, un *sistema producto* es un conjunto de *procesos unitarios*, conectados por flujos de productos intermedios que realizan una o más funciones definidas, definido en ilustración 4-2.

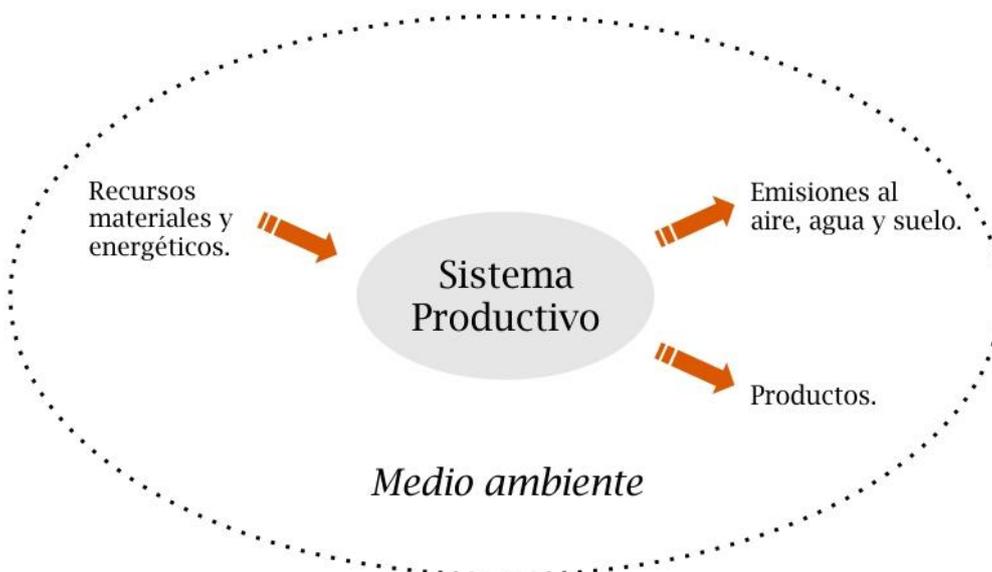


Ilustración 4-2: Sistema Producto - Cargas Ambientales (ISO 14.040, 2006)

Los sistemas productos se subdividen en grupos de procesos unitarios. Dividir un *sistema producto*, en sus correspondientes procesos unitarios facilita la identificación de las

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

entradas (Ej.: energía, materias primas, etc.) y salidas del producto (Ej.: emisiones), en cada una de las fases del proceso.

Para una mejor comprensión y vinculación de los conceptos mencionados, con los objetivos de la investigación, se precisa que: El *Sistema Producto* corresponde a la vivienda estudiada y el *proceso unitario* estaría dado, por la fase de construcción de la misma, considerando las partidas que esta fase involucra, tal como representado en Ilustración 4-3.

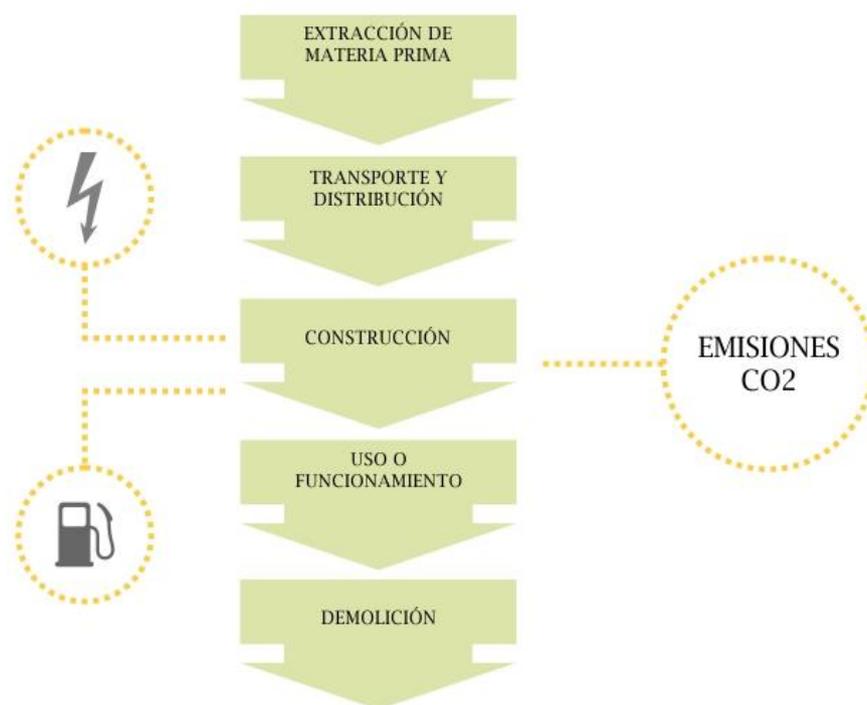


Ilustración 4-3: Ejemplo de un grupo de procesos unitarios para un ACVs de una vivienda (elaboración propia, 2012)

Los *procesos unitarios*, a su vez, están relacionados entre sí, mediante flujos de productos intermedios y con el medio ambiente a través de flujos elementales (material o energía que ingresa o sale del sistema en estudio sin transformación humana subsecuente), representado gráficamente en Ilustración 4-4.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

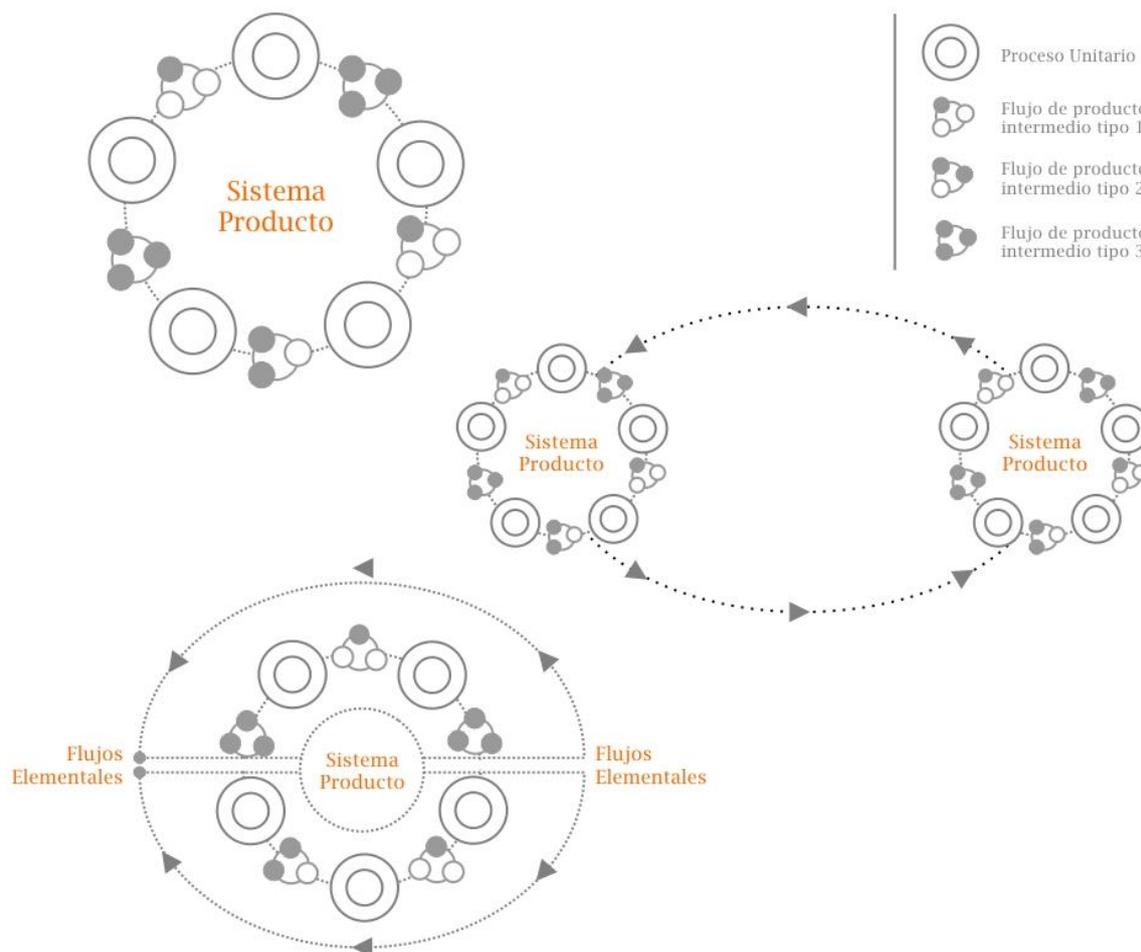


Ilustración 4-4: Relación de Sistema producto con procesos unitarios interrelacionados por flujos intermedios y elementales, con el medio ambiente. (Elaboración propia, 2012)

4.3 ASPECTOS METODOLOGICOS ICV FASE DE CONSTRUCCION

El objetivo y alcance del estudio, es la identificación de las entradas energéticas y aspectos ambientales en la etapa de construcción de la vivienda *caso estudio* y además la comparación del consumo energético de ésta etapa, con otras tales como la obtención de materias primas y la de operación o uso, de manera de clasificar la importancia en el ACV de la vivienda estudiada.

La metodología utilizada obedece al principio normativo ISO 14040 - 2006. Evaluación del Ciclo de Vida.

La unidad funcional, que define la cuantificación de las funciones identificadas, corresponde a 1 m² de vivienda de *caso estudio*.

Como flujo de referencia, correspondiente a la medición de la cantidad de producto que se necesita para cumplir la función, en este caso flujo energético del sistema en estudio, corresponde a 1 MJ/m² construido.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Para este estudio se modeló, el proceso unitario llamado “Construcción del producto” en el que se estudiaron los consumos de energía combustible y eléctrica (entradas) y la huella de carbono que fue emitida de la energía combustible y eléctrica (salidas). Los límites de este proceso comenzaron con el trazado de la vivienda y terminó con la envolvente de la vivienda edificada.

Entre las consideraciones relevantes, se tiene: Entradas de la secuencia principal de construcción (vivienda), transporte interno de los materiales desde la zona de acopio a la vivienda en construcción, transporte externo sólo para camiones mixer (partida de hormigones), estimación en promedio del tiempo utilizado por equipos y herramientas, uso de combustibles y electricidad de las máquinas y equipos utilizados en la envolvente de la vivienda, las emisiones de CO₂ producidas por los combustibles fósiles y electricidad, entre los más relevantes.

Para el estudio no se consideró: el uso y mantenimientos de los equipos y máquinas, disposición de productos y residuos de proceso, recuperación de productos usados, excepto si es parte fundamental de algún proceso unitario, manufactura de materiales auxiliares, manufactura, mantenimiento y desmantelamiento de equipo principal, operaciones adicionales, tales como iluminación y calefacción, la energía utilizada por el hombre, entre los más relevantes.

De acuerdo al objetivo planteado en este estudio, la categorización de los datos fue energética, esta descripción se separó en dos tipos; combustibles fósiles y electricidad.

Como criterio para las entradas y salidas del *Sistema Producto* en estudio, fueron considerados los inputs energéticos (también se consideró la masa de los componentes de la vivienda) y emisiones de GEI, identificados para cada uno de los procesos unitarios evaluados.

Con respecto a los requisitos de la calidad de los datos utilizados en el estudio, desde el punto de vista de la cobertura temporal (período de tiempo durante el cual se recolectaron los datos), fueron 2 meses. Con respecto a la cobertura geográfica, se consideró una situación sitio específica (región del Biobío), en la cual se recogieron los datos del proceso unitario (etapa de construcción). Finalmente para las consideraciones tecnológicas, los equipos, máquinas y herramientas fueron considerados en su óptimo funcionamiento, de manera de representar el mayor consumo esperado.

Finalmente es relevante destacar, que como criterio de refinación de datos, para la evaluación del caso estudio, se dejó sin considerar aquellas entradas (energías combustible o eléctrica) de aquellos procesos constructivos, que utilizaron menos del 1% de la energía total consumida en la fase de construcción.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

4.3.1 Alcances y Justificación Caso Estudio:

En Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, plantea que el actual marco regulatorio en materia de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), hace necesario evaluar soluciones más apropiadas para el diseño de envolventes de edificios, y las primeras acciones deben estar dirigidas a la vivienda de interés social (MINVU, 2011). De este modo y atendiendo la pertinencia nacional en el tema, para la realización del ICV, se ha seleccionado como caso estudio, un “Sistema Producto” de construcción masiva, correspondiente a una unidad habitacional, la cual forma parte de un conjunto habitacional de 225 viviendas sociales, ubicado en la Región del Biobío, Chile, cuyos planos y detalles se muestran en Ilustraciones 4-5 y 4-6.

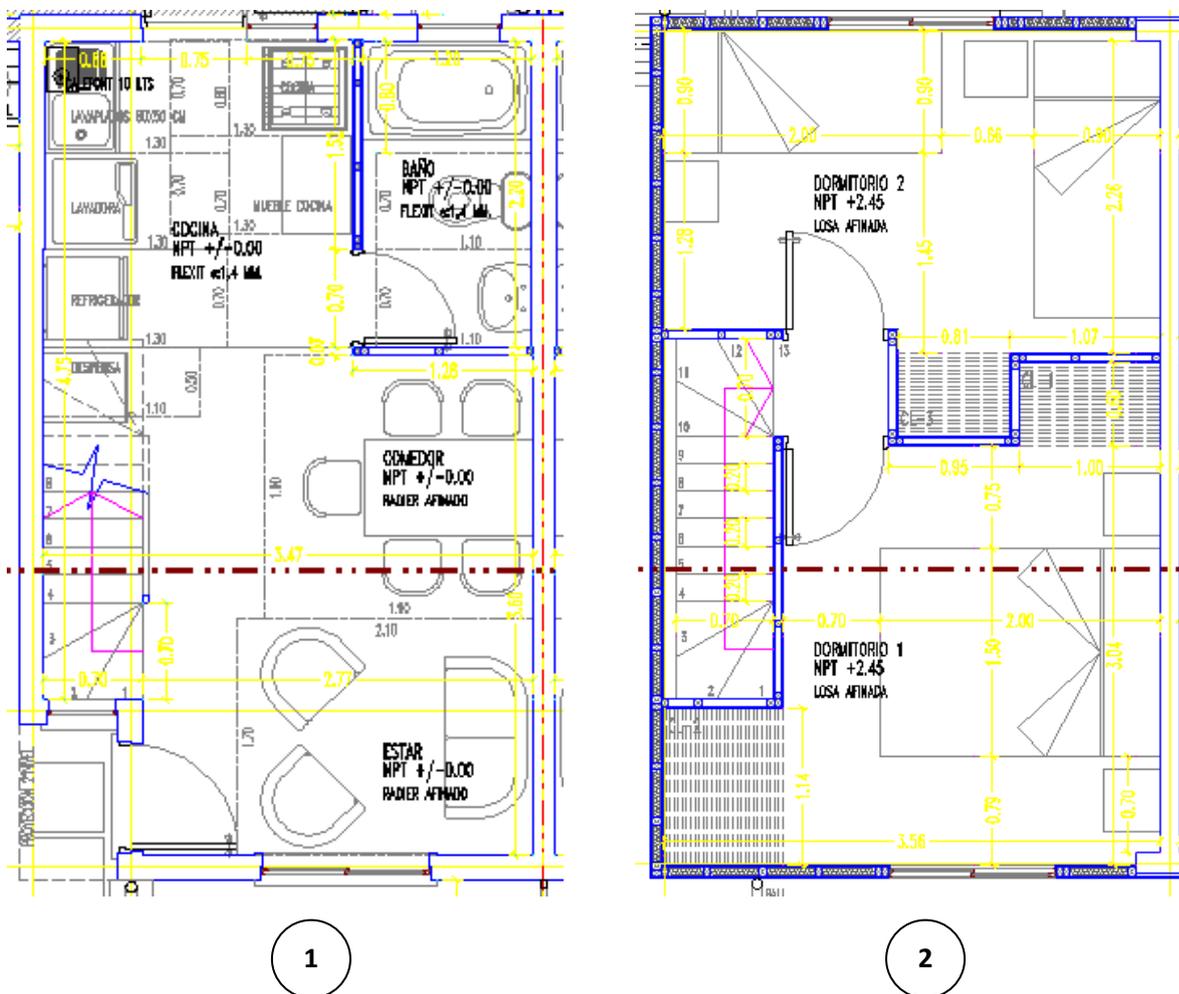


Ilustración 4-5: Planos planta vivienda tipo FSV - caso estudio (MINVU, 2012) 2012

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Superficie plantas de la Vivienda tipo FSV - caso estudio.

Planta 1° piso 26.06 m².

Planta 2° piso 23.80 m².

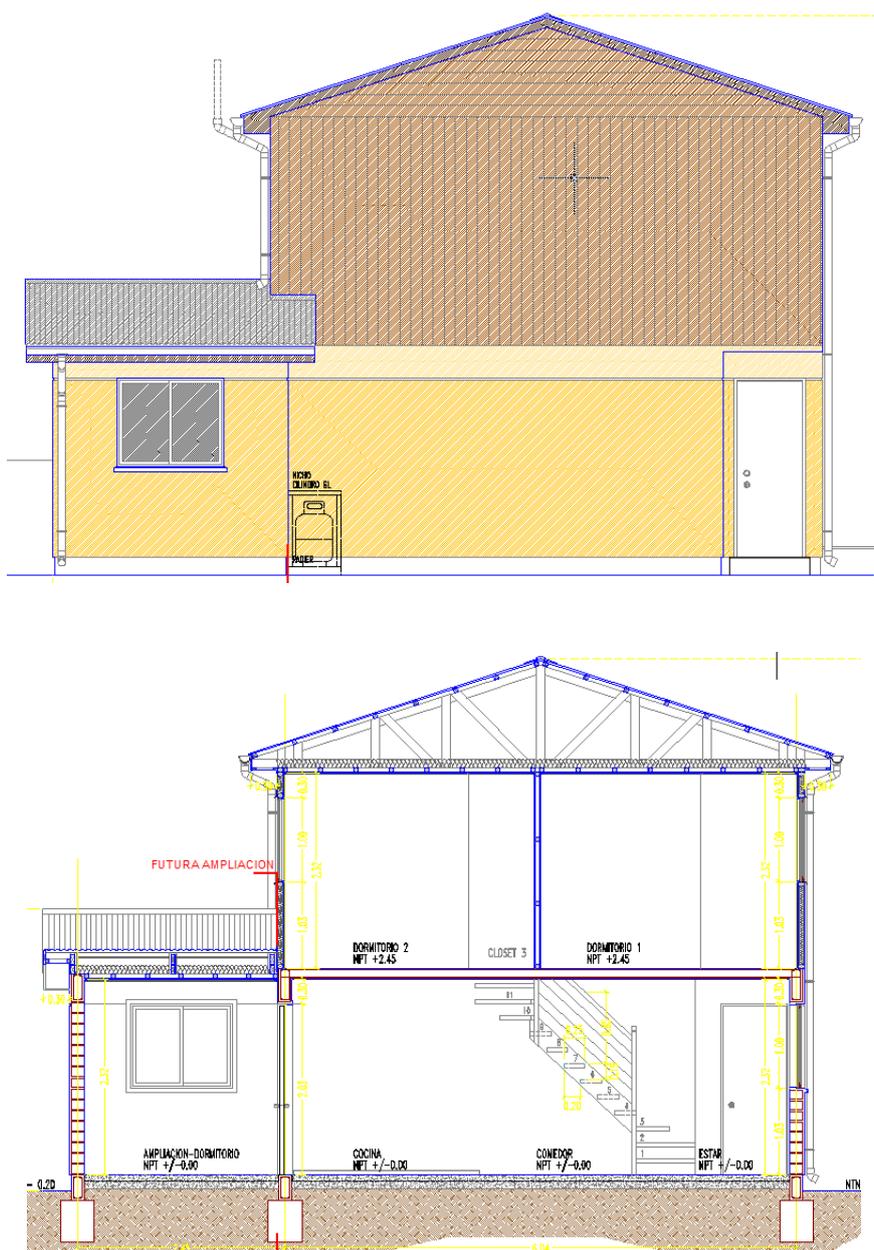


Ilustración 4-6: Corte y elevación lateral-Vivienda Tipo FSV - caso estudio (Minvu, 2012)

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

4.4 RESULTADOS ICV FASE DE CONSTRUCCIÓN – CASO ESTUDIO

Datos de entrada: En tabla 4-1 se muestran los datos obtenidos del estudio teórico realizado, correspondiente al peso de los materiales utilizados en cada una de las partidas mencionadas y su representatividad en energía contenida de estos. En la misma tabla se muestran los datos determinados a partir del trabajo de campo realizado, referido al cálculo estimado de energía consumida en la etapa de construcción de la vivienda en estudio, a partir de la cual se determina su respectiva huella de carbono. La base de datos utilizada para la cuantificación de esta energía fue la base datos de BEDEC (ver Anexo tabla A-22).

Tabla 4-1: Resumen datos totales de: Peso (Kg), Energía Contenida (MJ), Consumo Energético Eléctrico y Combustible (MJ) y Huella de carbono (Kg CO₂) de la fase de construcción (elaboración propia, 2011)

RESUMEN		PESO (KG)	ENERGÍA CONTENIDA (MJ)	CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO	CONSUMO ENERGÉTICO COMBUSTIBLE (LITROS)	HUELLA CARBONO (Kg CO ₂) POR ELECTRICIDAD	HUELLA CARBONO (Kg CO ₂) POR COMBUSTIBLES	TOTAL KG CO ₂
TRAZADO	22,33	5,2	25,3	0,143	0,00	0,00005	0,00	0,00
FUNDACIONES	36,80	16.376,4	10.794,4	7,998	9,37	0,00320	29,22	29,23
MOLDAJES	58,17	885,5	1.795,5	4,103	0,00	0,00164	0,00	0,00
ALBAÑILERÍA Y ESTRUCTURA	36,55	19.914,7	95.255,5	11,678	7,27	0,00457	22,68	22,68
LOSA	23,11	10.887,7	18.626,5	1,817	8,09	0,00073	9,68	9,68
TABICERÍA EXTERIOR	81,87	987,8	3.845,2	0,662	0,00	0,00026	0,00	0,00
ESTRUCTURA TECHUMBRE	19,00	538,2	6.200,0	1,856	0,00	0,00074	0,00	0,00
AISLACIÓN	32,35	93,1	11.096,9	0,000	0,00	0,00000	0,00	0,00
PUERTAS	7,00	195,5	3.814,4	0,457	0,00	0,00018	0,00	0,00
REVESTIMIENTO EXTERIOR	36,42	389,9	5.787,2	2,658	0,00	0,00106	0,00	0,00
REVESTIMIENTO INTERIOR	35,57	141,3	687,2	0,369	0,00	0,00015	0,00	0,00
VENTANAS	4,96	7,0	1.124,0	0,227	0,00	0,00009	0,00	0,00
VIDRIOS	4,96	67,0	1.272,2	0,000	0,00	0,00000	0,00	0,00

En Tabla 4-2, se muestran los resultados tanto para las fases de obtención y fabricación de materias primas, como de construcción considerados por m² de vivienda construida. Del mismo modo se muestra el valor de huella de carbono emitida al ambiente con Potencia de Calentamiento Global.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Tabla 4-2: Resumen de las cantidades de Peso (Kg), energía contenida (MJ), consumo energético eléctrico y combustible (MJ) y la Huella de carbono (Kg CO₂) por m² de construcción de la vivienda por partidas (elaboración propia, 2010)

RESUMEN	PESO (KG)		ENERGÍA CONTENIDA (MJ)	CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO	CONSUMO ENERGÉTICO COMBUSTIBLE (LITROS)	HUELLA CARBONO (Kg CO ₂) POR ELECTRICIDAD	HUELLA CARBONO (Kg CO ₂) POR COMBUSTIBLES	TOTAL KG CO ₂
	M2	KG/M2	MJ/M2	MJ/M2	LITROS/M2	KG CO ₂ /M2	KG CO ₂ /M2	TOTAL KG CO ₂ /M2
TRAZADO	22,33	0,23	1,13	0,006	0,00	0,000003	0,00	0,00
FUNDACIONES	36,80	445,01	293,33	0,217	0,25	0,000087	0,79	0,79
MOLDAJES	58,17	6,31	88,77	0,077	0,00	0,000031	0,00	0,00
ALBAÑILERÍA Y ESTRUCTURA	36,55	544,86	2.606,17	0,319	0,20	0,000128	0,62	0,62
LOSA	23,11	458,99	809,99	0,075	0,13	0,000031	0,42	0,42
TABICUERÍA EXTERIOR	81,87	29,42	120,64	0,021	0,00	0,000008	0,00	0,00
ESTRUCTURA TECHUMBRE	19,00	28,33	326,32	0,098	0,00	0,000039	0,00	0,00
AISLACIÓN	32,35	2,88	343,03	0,000	0,00	0,000000	0,00	0,00
PUERTAS	7,00	27,88	402,06	0,065	0,00	0,000026	0,00	0,00
REVESTIMIENTO EXTERIOR	36,42	10,71	158,90	0,073	0,00	0,000029	0,00	0,00
REVESTIMIENTO INTERIOR	35,57	3,96	19,27	0,010	0,00	0,000004	0,00	0,00
VENTANAS	4,96	8,13	1.300,93	0,263	0,00	0,000105	0,00	0,00
VIDRIOS	4,96	13,50	256,50	0,000	0,00	0,000000	0,00	0,00

En Tabla 4-3, se muestra un resumen con las partidas con mayores porcentajes de participación en el peso total de la vivienda; en la energía contenida de los materiales; en el consumo energético; producto de la construcción de la vivienda y la huella de carbono asociada.

Tabla 4-3: Resumen de la participación de porcentajes por cada partida constructiva - caso estudio (elaboración propia, 2011)

RESUMEN	M2	% PARTICIPACIÓN EN PESO (Kg)	% PARTICIPACIÓN ENERGÍA CONTENIDA (MJ)	% PARTICIPACIÓN CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO (MJ)	% PARTICIPACIÓN CONSUMO ENERGÉTICO COMBUSTIBLE (Litros)
TRAZADO	22,33	0,01	0,02	0,45	0,00
FUNDACIONES	16,80	32,86	6,78	25,02	47,50
MOLDAJES	53,17	0,67	1,13	12,84	0,00
ALBAÑILERÍA Y ESTRUCTURA	36,55	39,96	59,79	36,53	36,86
LOSA	23,11	21,74	11,69	5,68	15,65
TABICUERÍA EXTERIOR	31,87	1,88	2,41	2,07	0,00
ESTRUCTURA TECHUMBRE	19,00	1,08	3,89	5,81	0,00
AISLACIÓN	32,35	0,19	6,96	0,00	0,00
PUERTAS	7,00	0,28	0,43	1,43	0,00
REVESTIMIENTO EXTERIOR	36,12	0,78	3,63	8,32	0,00
REVESTIMIENTO INTERIOR	35,67	0,39	1,77	1,15	0,00
VENTANAS	4,96	0,01	0,71	0,71	0,00
VIDRIOS	4,96	0,13	0,80	0,00	0,00

4.4.1 Resultados gráficos datos de entrada ICV fase de construcción - caso estudio

A continuación se muestra un completo análisis gráfico, que resume todos los resultados del estudio.

En primera instancia se muestra un análisis gráfico, referido a la participación porcentual de cada una de las partidas del proyecto estudiado, de acuerdo a la incidencia del peso (masa) que estas tienen en la vivienda evaluada, lo cual queda indicado en Ilustración 4-5. Del mismo modo en Ilustración 4-6, se da cuenta del porcentaje de energía contenida que cada material entrega a cada partida cuantificada. También se hace referencia al porcentaje del consumo energético (energía eléctrica o combustible) utilizado para la construcción de las partidas evaluadas de la vivienda, lo cual queda establecido en Ilustración 4-7. Finalmente en Ilustración 4-8, se muestra la participación porcentual de la huella de carbono emitida por la energía consumida para la fase de construcción del ciclo de vida estudiado.

Complementariamente y consolidado la información anteriormente señalada, en ilustraciones 4-9 y 4-10 se entrega un análisis comparativo por unidad por m² de vivienda de cada una de las partidas evaluadas v/s los aspectos ambientales considerados.

- **Distribución Porcentual participación en peso.**

La Ilustración 4-7, indica que las partidas de la vivienda con mayor peso corresponden principalmente a la superestructura; partida de albañilería y estructura con un 39,9% del total de las partidas en estudio; partida de fundaciones con un 32,9% y la partida referida a losa con un 21,7%.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

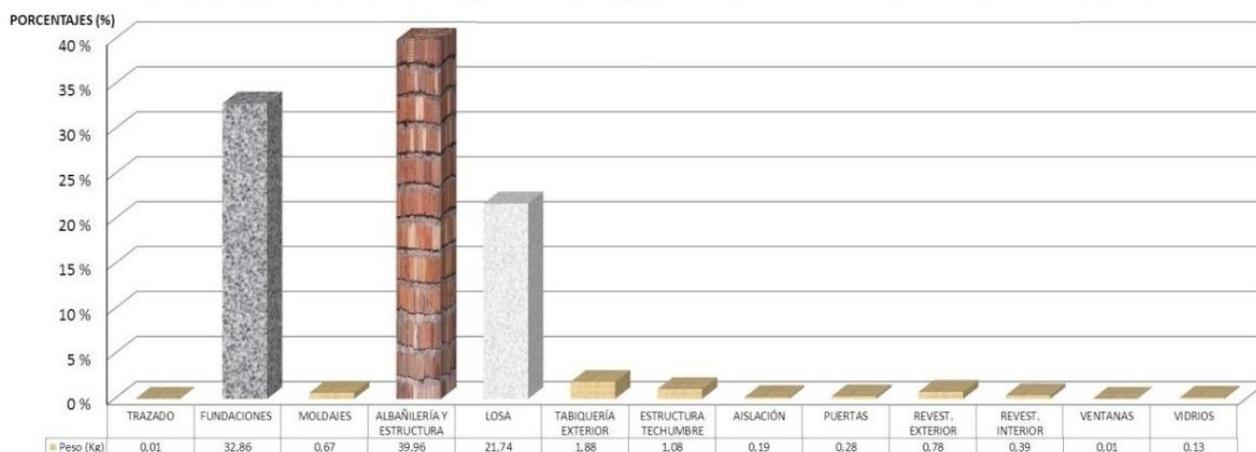


Ilustración 4-7: Distribución porcentual de la participación en peso (kg) de las partidas de fundaciones y envoltorio de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

- **Distribución porcentual - Energía Contenida**

La Ilustración 4-8 muestra la energía contenida de los materiales que componen cada partida estudiada. Se tiene que la partidas con mayor energía contenida corresponde a la albañilería de ladrillo y estructura, con una porcentaje de participación de un 59,8% con respecto al total, seguida por la partida losa con un porcentaje de participación 11,7% y finalmente con una participación de un 7%, la partida correspondiente a la aislación térmica.

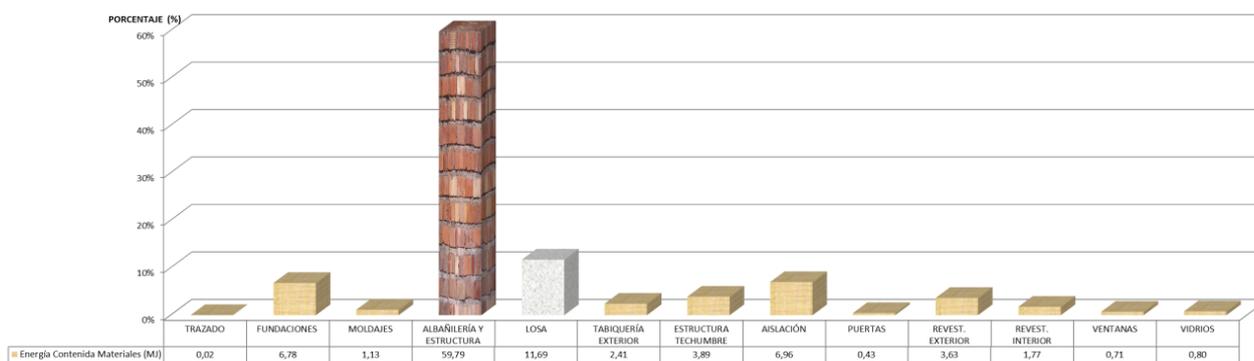


Ilustración 4-8: Distribución porcentual en participación de energía contenida (MJ) en las partidas de fundaciones y envoltorio de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

- **Distribución porcentual consumo energético - Máquinas y Equipos**

La Ilustración 4-9, muestra la relación porcentual de los consumos energéticos producidos por máquinas y equipos utilizados en la fase de construcción para las distintas partidas del caso estudio. Se observa que el más alto porcentaje está asociado a las partidas de albañilería y estructura con un 36,5%, sucedido por la partida de fundaciones con un 25% y por último la partida de moldajes con un 12,8%.

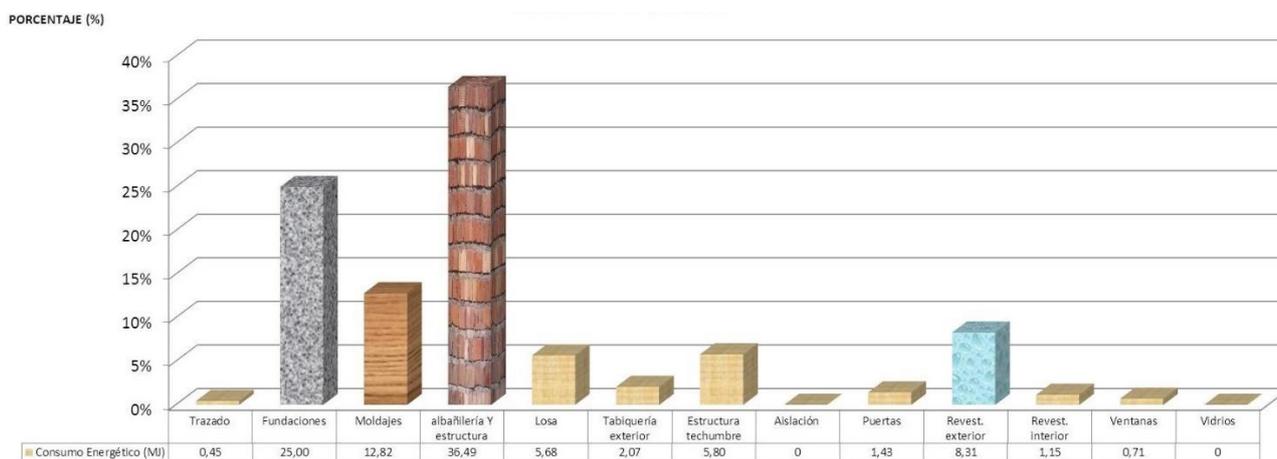


Ilustración 4-9: Distribución porcentual en participación del consumo energético eléctrico (MJ) en las partidas de fundaciones y envoltorio de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

La ilustración 4-10, muestra aquellas partidas asociadas al consumo de energía a través del uso combustible. Dentro de las cuales se tiene; partida de fundaciones con el mayor porcentaje de participación alcanzando un 47,5%, seguido por la partida de albañilería y estructura con un 36,7% de participación y por último se tiene la partida de losa con un 15,7% de la participación total.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

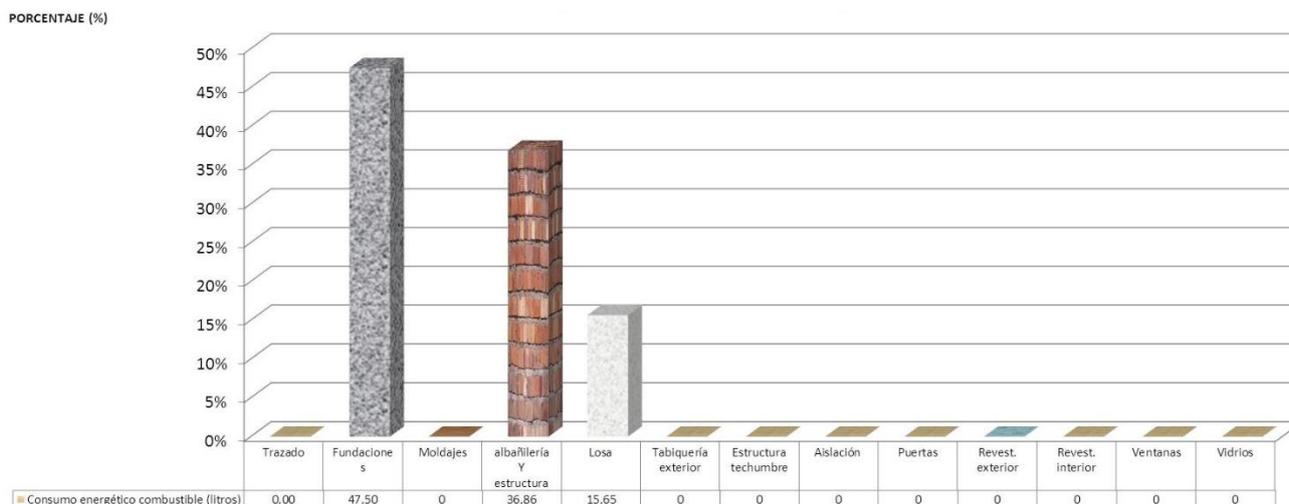


Ilustración 4-10: Distribución porcentual en participación del consumo energético combustible (MJ) en las partidas de fundaciones y envolvente de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

- Distribución porcentual - Huella Carbono

Con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la Ilustración 4-11 muestra que el 47,5% de la huella de carbono, es decir, la mayor emisión de CO₂ se produce en la partida de fundaciones, seguida por la partida de hormigones y albañilería con un 36,9% y finalmente con la partida vinculada de losa con un 15,7%, considerando generación eléctrica a partir de combustibles fósiles y energía eléctrica.

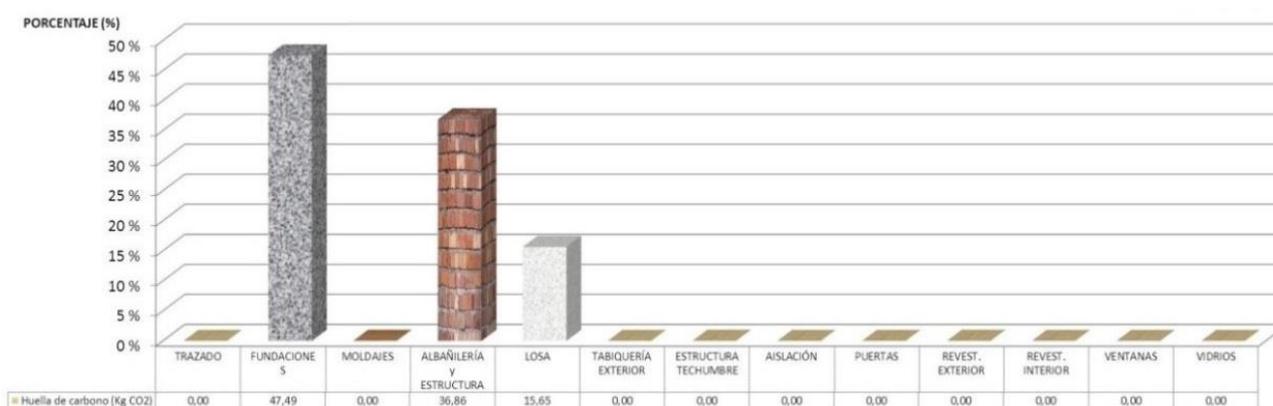


Ilustración 4-11: Distribución porcentual en participación de la huella de carbono (Kg CO₂) producida por el consumo de energías (eléctrica y combustible) en las partidas de fundación y envolvente de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012).

4.4.2 Interpretación resultado datos de entrada

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

- **Distribución porcentual entre el peso (Kg) y energía contenida (MJ)**

A partir de la información mostrada en Ilustraciones 4-12 y 4-13, se desprende que la relación entre el peso y la energía contenida en los materiales de construcción asociados a las partidas evaluadas no son directamente proporcional. Esto indica que al aumentar el peso no necesariamente hay un aumento la energía contenida, ya que este aumento tal como se ha comprobado en capítulo tres depende de los poderes caloríficos de los combustibles utilizados en sus respectivos procesos de fabricación. Por ejemplo, la partida de fundaciones alcanza un porcentaje en peso de la vivienda de un 32,9% y su energía contenida es tan solo de un 6,8% para esa fase del ciclo de vida. Caso contrario con lo que sucede con la partida de aislación térmica, la cual posee un porcentaje de participación del 0,2% de peso en la vivienda, siendo un porcentaje muy bajo por cierto, pero su energía contenida alcanza un porcentaje de participación de un 7%, una participación nada despreciable, considerando que ocupa el cuarto porcentaje más alto de todas las partidas analizadas.

De este modo, se establece que la relación importante entre el peso y la energía contenida de un material, radica en la determinación del consumo energético en la fase de extracción y fabricación de materias primas dentro del ACV.

Esto indica que pudiéramos estar construyendo una vivienda totalmente eficiente para su uso, pero en cuanto a la eficiencia en la producción de sus materiales no necesariamente existiría esa correspondencia, pudiendo generar un aumento considerable en la huella de carbono.

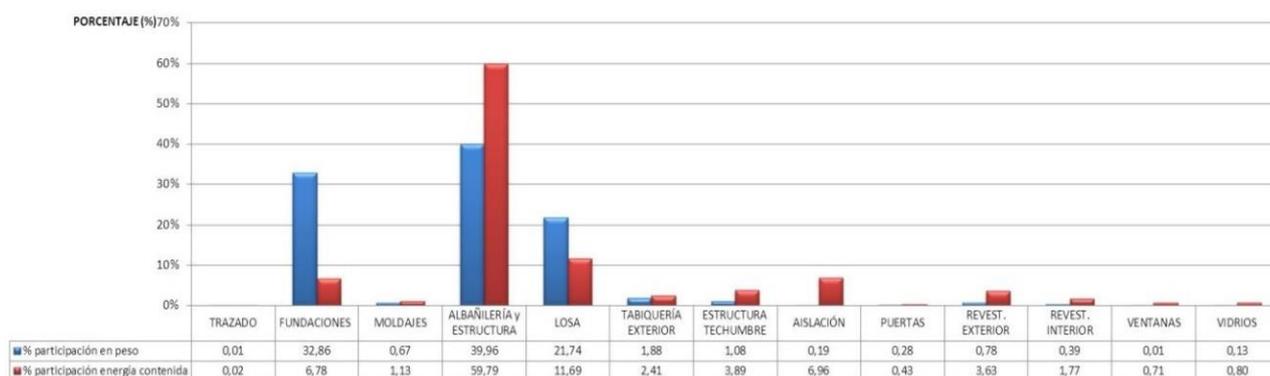


Ilustración 4-12: Distribución porcentual comparativa entre el peso (kg) v/s la energía contenida (MJ) de las partidas de fundación y envoltorio de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

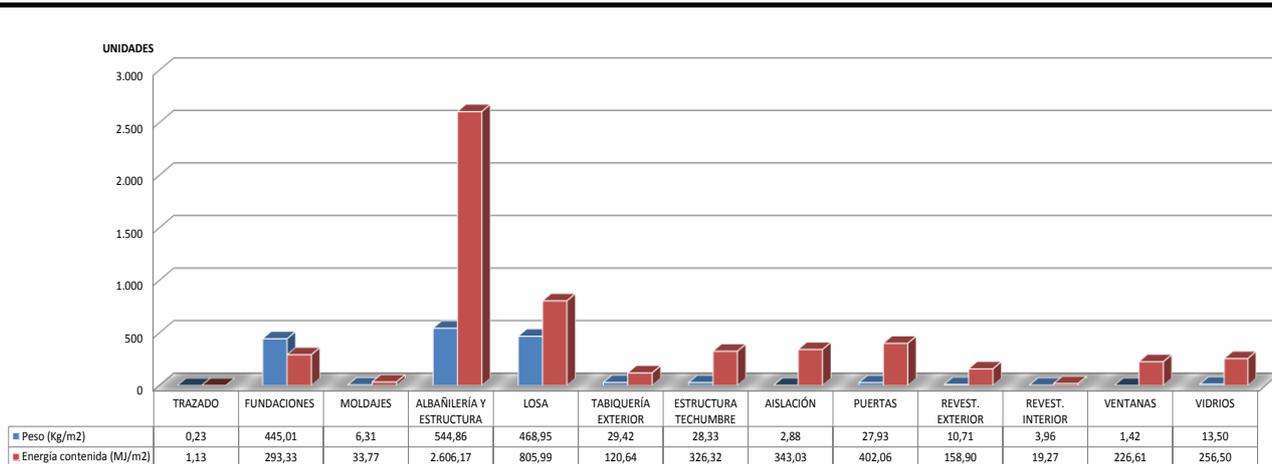


Ilustración 4-13: Distribución porcentual comparativa entre el peso (kg/m²) v/s la energía contenida (MJ/m²) de las partidas de fundación y envolvente de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

- Distribución comparativa entre el peso y el consumo energético - Fase Construcción

A partir de la información señalada en las ilustraciones 4-14 y 4-15, se desprende que la relación dada entre los pesos de los materiales y los consumos energéticos (combustibles y energía eléctrica), sería que a mayor peso de la partida existe un mayor consumo energético utilizado en la concreción de esos componentes constructivos (expresados en kilos) por unidad de superficie (metros cuadrados). La justificación a este fenómeno estaría dada, ya que considerando las condiciones de este estudio, un mayor peso del componente constructivo (subsistema), demanda una mayor cantidad de equipos para realizar una determinada actividad. Por ejemplo, la partida de losa (hormigón) requiere de un camión mixer, un vibrador y una allanadora para ejecutar su ejecución. Por otro lado, una mayor cantidad de obra está directamente relacionada con el tiempo que se utiliza una máquina o equipo.

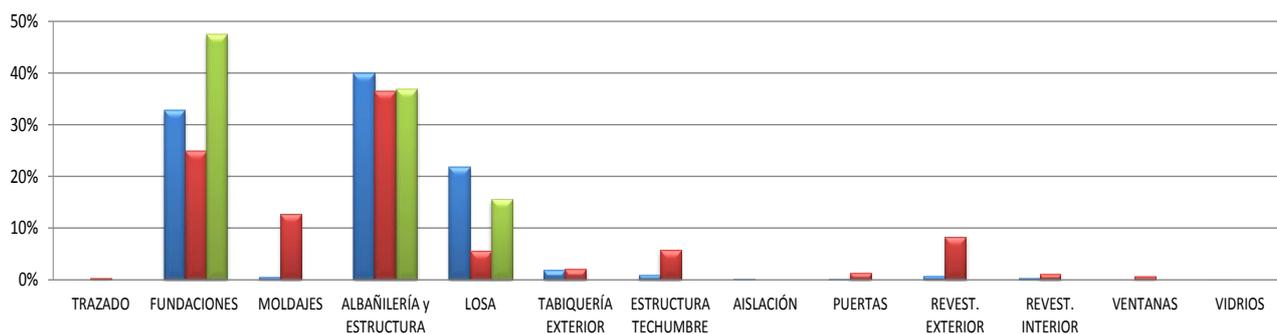


Ilustración 4-14: Distribución porcentual comparativa entre el peso (kg) v/s el consumo energético (MJ y litros) durante la construcción de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

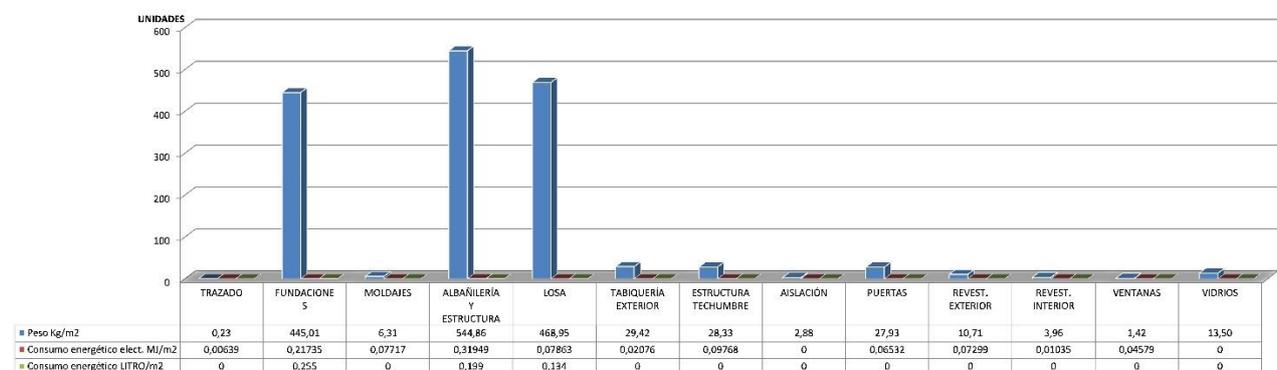


Ilustración 4-15: Distribución comparativa entre el peso (Kg/m²) de los materiales v/s el consumo eléctrico (MJ/m²) y combustible (litro/m²) producido durante la construcción de la vivienda tipo (elaboración propia, 2012)

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Consumo Energético Eléctrico y Combustible v/s la huella de carbono

El análisis del gráfico de la ilustración 4-15, señala que la energía consumida por los equipos eléctricos produce un bajo impacto ambiental, desde el punto de vista energético (Potencial de Calentamiento Global), esto quiere decir que su huella de carbono emitida es muy baja, llegando a ser casi imperceptible para el estudio de una sola unidad de vivienda. No obstante, este resultado no debe ser minimizado, dado que este valor va a aumentar considerablemente si consideramos el efecto sinérgico de contabilizar las 225 unidades del conjunto habitacional, para este caso estudio.

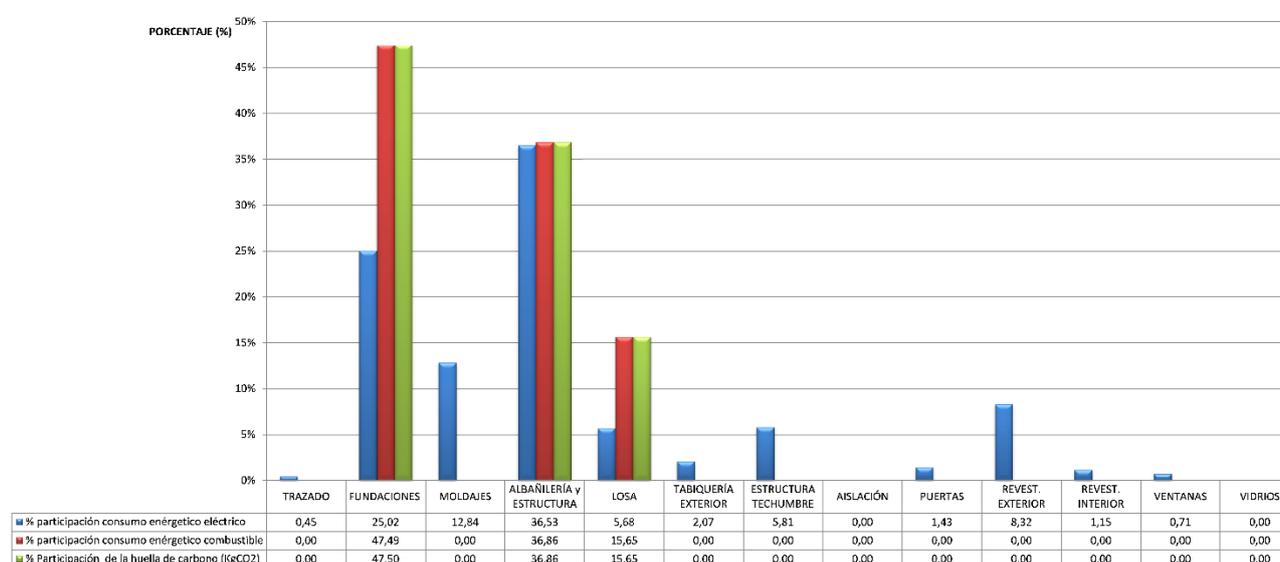


Ilustración 4-16: Distribución porcentual comparativa entre el consumo energético (eléctrico y combustible) (MJ) v/s su huella de carbono emitida (Kg CO₂/m²). Fuente: elaboración propia

Con respecto al consumo del combustible utilizado por las máquinas y equipos del caso estudio, se puede deducir que está relacionado directamente con el porcentaje de emisiones a la atmósfera, que se investigó. Como podemos ver, el porcentaje utilizado en las partidas de fundaciones, albañilería y estructura y losa, es muy similar (aumento a partir del 0,001 kg CO₂ por parte del consumo eléctrico). Con esto se concluye que el consumo de combustibles provoca la mayor cantidad de Dióxido Carbono emitido a la atmósfera, por lo tanto se debe tener presente, el uso de este tipo de energía en la fase de construcción de una obra de edificación. Por último, se puede decir que el consumo de combustible está directamente relacionado con el índice de huella de carbono emitida por la vivienda en la fase de construcción ver Ilustración 4-17.

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Como muestra la ilustración 4-18 existe un alto consumo de energía eléctrica en prácticamente todas las partidas, no obstante las emisiones de Dióxido de Carbono a la atmósfera, son bajas. Esto sucede, ya que la matriz energética del Sistema Interconectado Central (SIC) es en su mayoría hidroeléctrica (de bajo consumo de emisiones, “energía limpia y renovable”), la cual produce entonces un factor de emisión muy bajo. Generando esta disociación entre el consumo energético y las emisiones de CO₂.

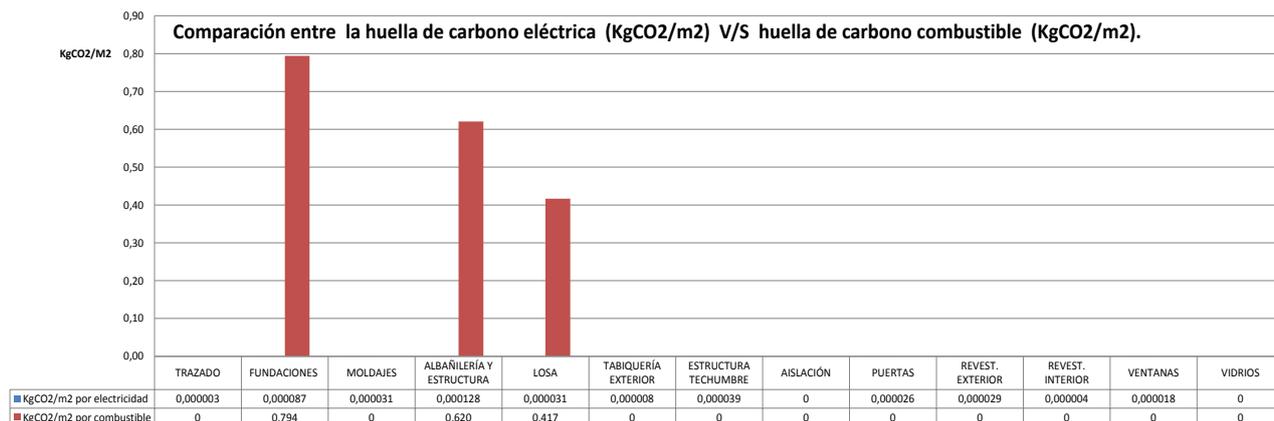


Ilustración 4-17: Distribución comparativa entre la huella de carbono (Kg CO₂/m²) v/s huella de carbono combustible (Kg CO₂/m²) (elaboración propia, 2012)

La Ilustración 4-19, relaciona las emisiones de CO₂ al consumo de combustible por m² de vivienda. Al respecto señalarse, que los combustibles fósiles son el gran causante de los impactos ambientales (Potencial de Calentamiento Global) provocados por la etapa de construcción de la vivienda. Están directamente relacionadas, a mayor consumo de combustible, mayores son las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

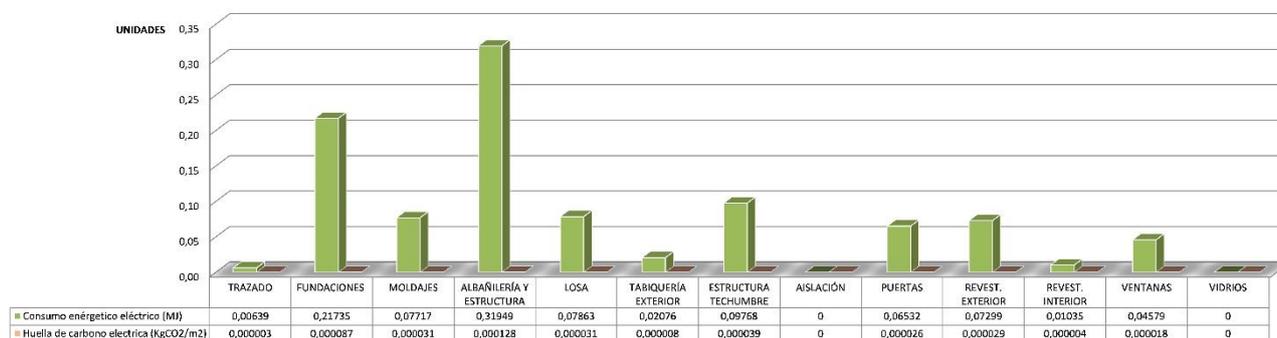


Ilustración 4-18: Distribución comparativa entre el consumo energético eléctrico (MJ/m²) v/s su huella de carbono emitida (Kg CO₂/m²). (Fuente: elaboración propia, 2012)

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

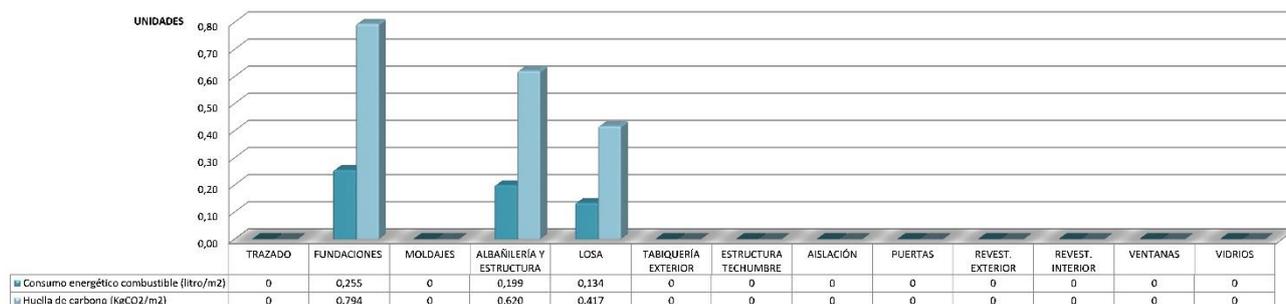


Ilustración 4-19: Distribución comparativa entre el consumo combustible (litros/m²) de los materiales v/s su huella de carbono emitida (Kg CO₂/m²) durante la fase de construcción de la vivienda tipo (Elaboración propia, 2012)

- **Distribución porcentual comparativa entre materiales y fase de construcción.**

En Ilustración 4-20 se establece que la relación entre las fases de fabricación de materiales y construcción del producto (*sistema*), desde una perspectiva de ciclo de vida, casi no se relacionan entre sí.

Una manera de relacionar éstas fases sería: producir materiales que requieran de una instalación simplificada (caso de los elementos industrializados), lo que ayudaría a disminuir el consumo de energía asociada a la fase de construcción, sin embargo con un enfoque de ciclo de vida, esto no significa que el impacto se haya minimizado totalmente, ya que el confeccionar un elemento con estas características, la energía incorporada en él podría verse aumentada y en su defecto disminuir el consumo energético en la fase de construcción, es un tema que habría que evaluarlo y cuantificarlo a través de una evaluación de ciclo de vida.

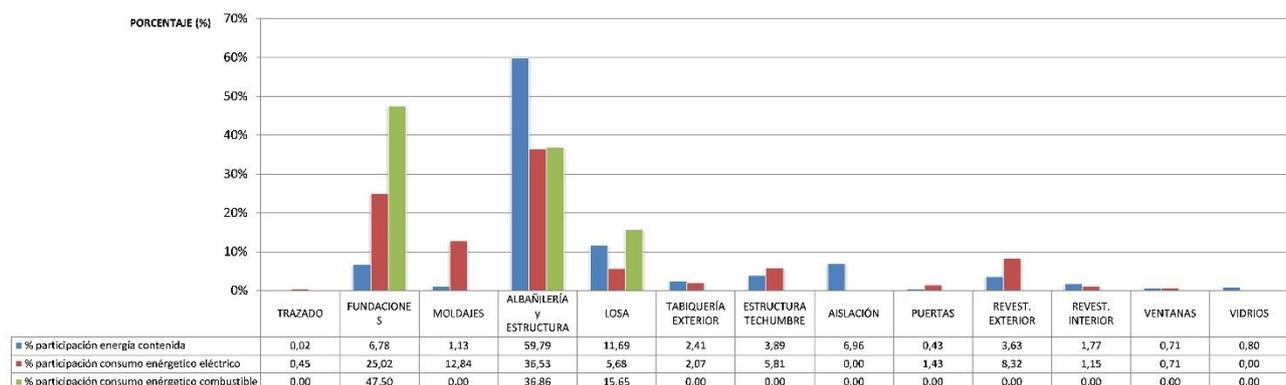


Ilustración 4-20: Distribución porcentual comparativa entre la energía contenida (MJ /m²) de los materiales v/s el consumo energético (eléctrico MJ/m² y combustible litros/m²) requerido para la construcción de la vivienda Tipo (elaboración propia, 2012)

Tal como se observa en Ilustración 4-21, la energía contenida (MJ/m²) y el consumo energético eléctrico (MJ/m²) muestran resultados muy disímiles. Tal diferencia se debe principalmente al uso de energía renovable (electricidad proveniente del Sistema

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Interconectado Central), la cual como ya se ha venido señalando posee un bajo factor de emisión (caso Región del Biobío), tal como se muestra en tabla 4-2.

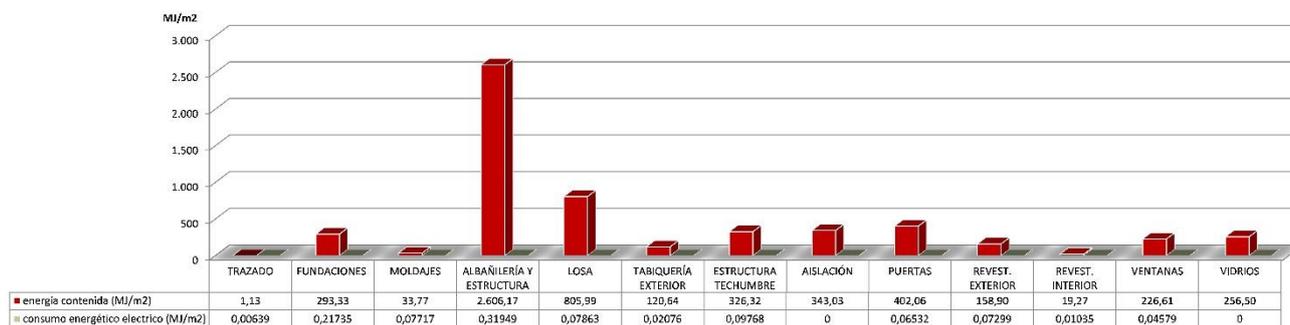


Ilustración 4-21: Distribución comparativa entre la energía contenida (MJ/m2) de los materiales v/s el consumo energético eléctrico (MJ/m2) requerido para la construcción de la vivienda Tipo (elaboración propia, 2012)

4.5 RESUMEN GLOBAL DE ACV – CASO ESTUDIO

Con la finalidad de estimar la injerencia de la participación de la fase de construcción en el ciclo de vida del caso estudio. Se establecieron los supuestos necesarios para representar un escenario de ciclo de vida, que considere la energía incorporada para las fases de fabricación de materiales, construcción y uso de la “vivienda caso estudio”.

Para ello han sido considerados los resultados referidos a la energía incorporada para la fase de extracción de materias primas y fabricación de materiales se encuentran establecidos e informados en tabla 4-1. Valores, que por cierto consideran los resultados obtenidos en ICV de materiales estudiados en capítulo tres de esta tesis. Lo mismo para los resultados de la fase de construcción cuyos resultados ya se han señalado y discutido en este capítulo y se encuentran resumido en tabla 4-2.

Sin embargo para estimar el ACV completo del estudio caso, se hace necesario establecer los datos para la fase de uso. Para ello y considerando las características del caso estudio (zona climática, solución constructiva, materialidades envolvente, entre las más importantes), se toma como referencia los valores indicados en la Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social para zona climática cuatro (Concepción), suponiendo una vivienda pareada (similar escenario caso estudio) y mejorada energéticamente, para ello supone 100 mm de aislante en el cielo y 50 mm de espesor de aislante térmico en muro y vidriado doble, condiciones disímiles al caso estudio, pero que permiten tener una estimación a la demanda y consumo de energía para el estudio del ciclo de vida. De este modo para la determinación del consumo en la etapa de uso y funcionamiento se estimó una demanda energética de 46 kW/m² (Bustamante, 2009).

Finalmente para estimar el consumo durante la fase de uso, se estimó para la vivienda *caso estudio*, una vida útil de 40 años, basada en un cálculo promedio del período fijado

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

por el Servicio de Impuestos de Chile (SII, 2003), para tasación del activo inmovilizado (Hatt, 2012).

Así y de acuerdo a los resultados obtenidos del ICV realizado para la fase de construcción del caso estudio, cuyos resultados se muestran en forma resumida en tabla 4-4, se determinó que la energía contenida en la fase de extracción y fabricación de materias primas fue del 34,6% del total de la energía contenida en la vivienda estudiada y el porcentaje de participación de la fase de uso, arrojó un 65,4% del total de energía consumida para el ciclo de vida, considerando una vida útil de 40 años.

Finalmente y objetivo primordial de este capítulo se estableció en un porcentaje de participación del 0,01% el consumo energético utilizado en la etapa de construcción del ACV de la vivienda caso estudio, representando en Ilustración 4-22.

Tabla 4-4: Flujo Energético, Vivienda Caso Estudio - Región del Biobío-Chile (elaboración propia, 2012)

		Consumo Energético (kWh/m ²)	Consumo Energético (MJ/m ²)	Total Vivienda (MJ)	Consumo Energético Total Vida Útil (MJ)	% de participación de energía en la LCV de la vivienda en estudio
Extracción y Fabricación Materiales	Energía Invertida /m ² (materiales envolvente)	971,0	3506,256	159.321	3.983	34,61
Construcción	Etapa de construcción	0,2	0,70	32	1	0,01
Liso y Funcionamiento	Etapa de uso o funcionamiento	1.840	6.674	300.225	7.525	65,38

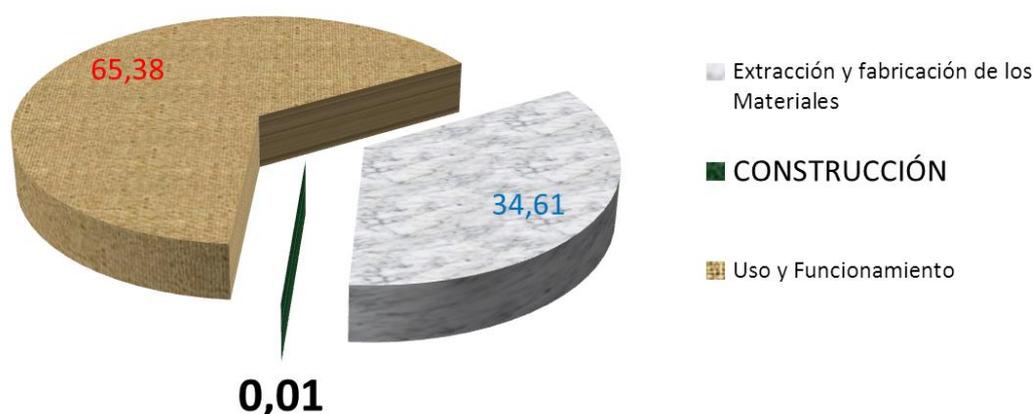


Ilustración 4-22: Porcentaje de la energía total consumida en la Evaluación del Ciclo de Vida Simplificado de una vivienda - caso estudio (elaboración propia, 2012)

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

4.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DATOS

Los resultados obtenidos son sensibilizados, de acuerdo a dos parámetros: factor de emisión matriz energética (SIC v/s SING) y uso de equipos y herramientas (consumo eléctrico).

Factor de emisión matriz energética (SIC vs SING).

La matriz energética del Sistema Interconectado Central (SIC) chileno es mayoritariamente hidroeléctrica, lo que refleja un factor de emisión bajo. Con este factor se obtuvieron las emisiones de Dióxido Carbono producido en la fase de construcción correspondiente a 3×10^{-2} kg CO₂ emitidos (indicados en tabla 4-5). Si consideramos que el país está desarrollando y tramitando proyectos termoeléctricos importantes (MMA, 2012), podríamos pensar que la matriz energética se está carbonizando, lo cual evidentemente a la luz de los resultados obtenidos, estos se verían importantemente impactados, por las emisiones de GEI.

Como factor de sensibilidad se evaluó el factor de emisión del Sistema Interconectado Central (SIC) mencionado versus el Sistema Interconectado del Norte Grande que se diferencia del SIC por producir un factor de emisión que duplica a este. Esto se debe a que la matriz del norte es más bien de origen termoeléctrico, y evidentemente posee un alto porcentaje de energía carbonizada, tal como se señala en tabla 4-6.

Tabla 4-5: Resultados comparativos entre máquinas y equipos con consumo eléctrico y combustible por otros de consumo sólo eléctrico (elaboración propia, 2012)

RESUMEN	Huella de Carbono (kg Co2) por electricidad	Huella de Carbono (kg Co2) por combustible	RESUMEN	Huella de Carbono (kg Co2) por electricidad	Huella de Carbono (kg Co2) por combustible. Cambiado a eléctrica
FUNDACIONES	1,83E-05	2,92E+01	FUNDACIONES	3,20E-03	6,26E-03
ALBAÑILERÍA Y ESTRUCTURA	1,02E-03	2,27E+01	ALBAÑILERÍA Y ESTRUCTURA	4,67E-03	2,05E-04
LOSA	5,24E-04	9,63E+00	LOSA	7,27E-04	1,74E-03
TRAZADO	1,50E-03	0,00E+00	TRAZADO	5,71E-04	5,71E-04
MOLDAJES	2,33E-04	0,00E+00	MOLDAJES	1,64E-03	1,64E-03
TABICERÍA EXTERIOR	8,47E-05	0,00E+00	TABICERÍA EXTERIOR	2,65E-04	2,65E-04
ESTRUCTURA TECHUMBRE	2,38E-04	0,00E+00	ESTRUCTURA TECHUMBRE	7,43E-04	7,23E-04
AISLACIÓN	0,00E+00	0,00E+00	AISLACIÓN	0,00E+00	0,00E+00
PUERTAS	5,86E-05	0,00E+00	PUERTAS	1,83E-04	1,89E-04
REVESTIMIENTO EXTERIOR	3,40E-04	0,00E+00	REVESTIMIENTO EXTERIOR	1,06E-03	1,06E-04
REVESTIMIENTO INTERIOR	4,73E-05	0,00E+00	REVESTIMIENTO INTERIOR	1,48E-04	1,48E-04
VENTANAS	2,91E-05	0,00E+00	VENTANAS	9,09E-05	9,09E-04
VIDRIOS	0,00E+00	0,00E+00	VIDRIOS	0,00E+00	0,00E+00
	4,09E-03	6,15E+01		1,33E-02	2,00E-02
TOTAL DE KG CO2 EMITIDOS AL AMBIENTE 61,5			TOTAL DE KG CO2 EMITIDOS AL AMBIENTE 0,032		

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

Tabla 4-6: Huella de carbono de la electricidad en Chile Año 2008 (Zaror, Vega 2010)

Sistema de generación	kg Co2 / MWh
SING	1084
SIC	461

De acuerdo a los resultados sensibilizados puede señalarse que al cambiar la matriz del SIC por la del SING la huella de carbono aumentaría en más del 40% con respecto a la actual, tal cual queda señalado en tabla 4-7.

Tabla 4-7: Resultados comparativos entre el consumo eléctrico SIC y el SING (elaboración propia, 2012)

RESUMEN	Mwh	Huella de Carbono (kg Co2) por electricidad emitida en el SIC	Huella de Carbono (kg Co2) por electricidad emitida en el SING
FUNDACIONES	3,97E-08	1,829E-05	4,30E-05
ALBAÑILERÍA Y ESTRUCTURA	2,22E-06	1,024E-03	2,41E-03
LOSA	1,14E-06	5,244E-04	1,24E-03
TRAZADO	3,24E-06	1,405E-03	3,52E-03
MOLDAJES	5,05E-07	2,327E-04	5,47E-04
TABICERÍA EXTERIOR	1,84E-07	8,471E-05	1,99E-04
ESTRUCTURA TECHUMBRE	5,05E-07	2,377E-04	5,59E-04
AISLACIÓN	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PUERTAS	1,27E-06	5,855E-05	1,38E-04
REVESTIMIENTO EXTERIOR	7,35E-07	3,404E-04	8,04E-04
REVESTIMIENTO INTERIOR	1,03E-07	4,728E-05	1,11E-04
VENTANAS	6,31E-08	2,908E-05	6,84E-05
VIDRIOS	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TOTALES (Kg CO2)		4,09E-03	9,63E-03
PORCENTAJES (%)		29,84	70,16

Como conclusión, puede indicarse que la matriz energética chilena (SIC) se está carbonizando, de este modo, el Dióxido de Carbono que hoy ha emitido la vivienda en estudio, será mucho mayor en el futuro. Por lo tanto, implementar medidas de mejoras en la fase de construcción es y será muy beneficioso para mitigar el impacto medioambiental asociado a ello.

El uso de equipos y herramientas (consumo eléctrico)

De acuerdo al estudio realizado, se observa que la mayor cantidad de Dióxido de Carbono emitido es producido por los combustibles fósiles, llegando a representar el 99,97% de las emisiones en fase de construcción evaluada. Si se cambiaran las máquinas y equipos utilizados por otros que utilicen solo energía eléctrica, su huella de carbono disminuiría considerablemente.

Realizando la comparación, a partir de información de tabla 4-5, resulta que el cambio de máquinas y equipos combustibles a otros eléctricos produce una disminución de 61,5 KG CO₂.

Lo anterior indica la importancia que tiene seleccionar o proponer el uso de máquinas y equipos de acuerdo a su modo de funcionamiento (eléctrico o combustible), ya que al realizar mejoras o medidas de mitigación en la etapa de construcción del ACV, es muy beneficioso, tanto como para la disminución del consumo de energía como para la huella de carbono.

4.7 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El desarrollo de este estudio permitió dimensionar el impacto desde el punto de vista de la energía incorporada en todos y cada uno de los procesos unitarios constitutivos del sistema estudiado. A través de la aplicación de un análisis de ciclo de vida simplificado han podido identificarse los recursos materiales y energéticos consumidos en la fase de construcción de una vivienda (*caso estudio*).

Se ha podido establecer la relación de energía incorporada de los materiales de construcción que forman parte de la vivienda estudiada y las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a ella. De este modo y a partir de los resultados obtenidos, puede señalarse que el impacto de las emisiones de CO₂ obedece principalmente a la cantidad de energía incorporada en el material y no necesariamente a las propiedades del mismo, esto se observa en el hecho que entre el peso y los otros indicadores (energía y emisiones) no existe el mismo paralelismo que se da entre energía y emisiones. Tal es el caso del material hormigón (partida de fundaciones) que representa una relación porcentual en peso aproximado de un 40% con respecto al total de la vivienda, con un porcentaje de participación de energía contenida aproximado de un 6,8% para esta etapa

Capítulo 4 / Inventario ambiental: Determinación energía contenida y huella de carbono para la fase de construcción

del ciclo de vida. Contraponiéndose a la parida de aislación térmica cuya participación en peso no supera el 0,2% del total considerado para la vivienda, pero considera un porcentaje total de energía contenida de aprox un 7%, dependiendo del material.

Los resultados finales del ACV de la vivienda estudiada, muestran que la energía utilizada en las tres fases estudiadas, son muy disímiles. En la fase de construcción, a diferencia de las otras dos (fabricación de materiales y fase de operación), el uso de energía es despreciable (del orden del 0,01%). La fase de extracción y fabricación de materias primas, resultó mucho más significativa en el uso de energía (34,6%) y finalmente, la fase más importante en el consumo energético dentro del ACV, fue la correspondiente al uso y funcionamiento de la vivienda alcanzando un porcentaje de participación del orden de un 65,4%, valores que son refinados y verificados en desarrollo capítulo cinco.

Con respecto a la generación de emisiones de CO₂, se concluye que la densidad de los materiales no está directamente relacionada con la energía contenida de estos, ya que este impacto depende del factor de emisión de los combustibles que estuvieron presentes en el proceso de fabricación de dicho material. De este modo se tiene que tal como se había señalado anteriormente, materiales con alto peso (masa) no necesariamente generarán mayores emisiones de CO₂, o en su defecto un material con menor peso generará menores emisiones de CO₂. Como se vio para este caso estudio para el caso de la aislación térmica que con bajo porcentaje de participación en peso (0,19%) alcanza una participación en las emisiones de CO₂ de caso un 7%.

Por otra parte es relevante destacar que, habiendo demostrado que la mayoría de las emisiones de GEI de un edificio, se originan durante la fase de operación de éste, se deben incluir las fases que ocurren durante el ciclo de vida del edificio, para lograr la totalidad de la neutralidad de las emisiones de carbono.

5 CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE LA ENERGÍA INCORPORADA EN EL CICLO DE VIDA DE UNA VIVIENDA EVALUANDO DISTINTAS SOLUCIONES MATERIALES EN SU ENVOLVENTE TÉRMICA

5.1 ANTECEDENTES

Los edificios tienen una gran demanda energética durante el ciclo de vida en forma directa e indirecta. Directamente, asociado a las fases de construcción, operación o uso (energía de funcionamiento) y desconstrucción. Indirectamente, durante las fases correspondientes a la extracción y fabricación de materiales (energía incorporada), (Sartori & Hestnes, 2006). El mayor consumo energético se centra en la fase de uso, donde aproximadamente el 85 % proviene del consumo energético de la calefacción, la ventilación y utilización de artefactos eléctricos y sólo el 15% en su fase de construcción, (Castells et al, 2008). Estas evidencias dejan de manifiesto que estrategias de diseño y técnicas constructivas, pueden cumplir un papel muy importante, en la reducción de demanda energética, durante el ciclo de vida de un edificio.

Algunos autores, cifran el aporte de los materiales en más de un 30% de la energía total y del 40% de las emisiones de CO₂, respecto a los producidos en toda la vida útil del edificio. Siendo el segundo factor de demanda energética, superado solamente por la calefacción. (Zabalza, 2009). Si bien cada caso particular, puede conducir a porcentajes diferentes, algunos estudios han llegado a niveles equiparables de energía incorporada, (Arreaza, 2009).

Hasta hace poco, en las estrategias de diseño de eficiencia energética, sólo se consideraba la energía de operación (fase de uso), debido a su mayor participación en la energía del ciclo de vida total. Sin embargo, debido a la evolución tecnológica y aumento en la eficiencia de los equipos, junto con el mejoramiento de materiales de aislación, ha significado que el potencial para controlar la energía, en la etapa de uso en un edificio ha aumentado y, en consecuencia, el énfasis actual está cambiado *para incluir la energía incorporada en los materiales de construcción* (Hannon et al, 1998; Ding, 2004; Crowther, 1999; Sartori and Hestnes, 2007; Manish et al., 2007; Keolian et al., 2007; Roche, 2010).

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Las regulaciones en el Sector de Construcción introducen una mejora de la calidad ambiental, mediante la eficiencia energética, centrándose principalmente en determinadas fases del ciclo de vida, donde la fase de uso permite un mayor control por parte de los profesionales que participan en el diseño, excluyendo otras fases que de igual manera impactan sobre el medio ambiente.

(Alonso, 2010) plantea que es a través de la envolvente térmica de un edificio donde se produce el intercambio entre ambiente interior y el exterior, y donde la iluminación, ventilación o *flujo de calor* son parámetros fundamentales para el diseño. De este modo se podría deducir que mejorando el desempeño térmico de la envolvente, se podría reducir considerablemente el impacto ambiental asociado tanto a la selección de materiales como al generado por el uso del edificio.

En Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, plantea que el actual marco regulatorio en materia de consumo de energía y emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), hace necesario evaluar soluciones más apropiadas, para el diseño de la envolvente de los edificios (MINVU, 2011).

Al respecto, desde el año 2000, se encuentra vigente la Reglamentación Térmica del país, luego de su incorporación a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC Artículo 4.110). La cual en una primera etapa definió exigencias de transmitancia térmica máxima, para el complejo techumbre de viviendas, haciendo disminuir las pérdidas de calor a través de este elemento de la envolvente, mejorando notablemente el comportamiento térmico de las viviendas sobre todo en invierno, teniendo alto impacto en la vivienda social y sus habitantes (Bustamante, 2009). En una segunda fase se establecieron las exigencias para limitar las pérdidas de calor a través de muros, pisos ventilados y a través de ventanas. Para tal objetivo se definieron zonas térmicas en base a criterios de Grado Día de Calefacción anuales, clasificando al país con siete zonas térmicas.

Desde el punto de vista energético, en Chile, los criterios para elegir la materialidad a considerar en la especificación técnica para una envolvente de una vivienda (o edificio en general), se basan principalmente en la demanda global o de energía de calefacción y/o el comportamiento higrotérmico de la envolvente, de acuerdo al clima. Basándose en el criterio anterior, se podría concluir que un determinado sistema constructivo para la envolvente, presenta un mejor comportamiento térmico que otro. (Bustamante, 2009).

El efecto de la actual Reglamentación Térmica, referidos a la selección de materiales para ser usados en la envolvente térmica de edificios, tiene una implicancia significativa en el consumo energético durante el ciclo de vida de estas soluciones habitacionales. Sin

embrago, la necesidad de aumentar la resistencia térmica de esos materiales en la envolvente térmica, no necesariamente lleva a una selección de materiales de bajo consumo energético. Esto último, hace necesario contar con una evaluación del flujo energético de edificios, considerando una visión sistémica y con enfoque de ciclo de vida. Lo cual permita evidenciar los impactos energéticos y ambientales, asociados a cada fase evaluada.

De este modo y tal como se ha venido señalando en los capítulos anteriores, la herramienta ACV, permite tener una visión más globalizada de los flujos energéticos de un edificio y puede servir además, como herramienta para la toma de decisiones anticipada, en la fase de diseño.

El presente capítulo tiene como objetivo principal dimensionar y valorar, la energía incorporada en el ciclo de vida de una vivienda. En ese sentido se buscó evaluar las implicancias del consumo energético y emisiones de CO₂ durante todo el ciclo de vida, vinculadas a las distintas soluciones de envolvente térmica de esta. Considerando para dicha evaluación las tres materialidades presentes en la envolvente térmica (muros) más comunes utilizados en viviendas de interés social en Chile (INN, 2007).

Dentro de los resultados relevantes del estudio, se evidencia la alta influencia de la selección de materialidades que conforman la envolvente térmica, en el impacto asociado a la energía incorporada en ellos y las emisiones de GEI respectivas. Destacando además la alta influencia que tiene la fase de uso, desde el punto de vista del consumo energético y emisiones de C2O durante el ciclo de vida estudiado.

5.2 METODOLOGÍA

La metodología propuesta permite valorar los aspectos e impactos ambientales vinculados a la energía incorporada y generación de Dióxido de Carbono en diferentes soluciones de materialidades de envolvente térmica, utilizada en una solución habitacional de tipología social (llamada “*caso estudio*”), con un enfoque de ciclo de vida, ajustada a las directrices y principios establecidos por la norma NCh ISO 14.040- 2006.

5.2.1 Justificación Selección Caso Estudio

La política habitacional chilena, se basa en tres ejes fundamentales; aumentar la cantidad de soluciones habitacionales para atender especialmente al 40% más pobre de la población, garantizar la calidad de las viviendas, mejorando su estándar, los procesos de diseño y construcción, promover la integración social; procurando soluciones habitacionales insertas en barrios y ciudades, (Bustamante, 2009).

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Dentro de este contexto, el Estado chileno, se planteó como desafío elevar los estándares mínimos de las edificaciones y en especial de la vivienda social, con el objetivo de lograr un mayor confort, una mejor habitabilidad, prolongar la vida útil y reducir el consumo de energía en las distintas construcciones, (Tokman, 2009).

Por otro lado, el terremoto ocurrido el 27 de Febrero de 2010, en la zona sur, generó un deterioro cerca de 30% de las viviendas existentes en las regiones afectadas; Maule, Biobío y Araucanía. Lo que requiere el desarrollo de diversas iniciativas de construcción residencial, (García et al., 2012). Sumado a ello, los resultados de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional - CASEN 2011- realizada por Ministerio de Desarrollo Social, la cual indica que en Chile, el déficit habitacional alcanza las 439.304 unidades.

Dentro de ese contexto, y dando cuenta de la necesidad real de entregar solución a las demandas habitacionales de tipología social, con criterios de sustentabilidad y eficiencia energética en el país, con especial énfasis en las Regiones de la Araucanía y Biobío, se decide trabajar con una *caso estudio* que esté direccionado, a aportar en esa línea de desarrollo.

De este modo, se selecciona como *caso estudio*, a un proyecto singular de tipología social: Vivienda del Programa Fondo Solidario de Viviendas (FSV). Con estándares de eficiencia energética, basado en prestaciones o desempeños exigibles a construcciones habitacionales para la Región de la Araucanía, (Caracterizada en punto 5.2.2). Cuyo diseño fue realizado por el Centro de Investigación en Tecnologías de la Universidad del Biobío (CITEC), cuyo diseño se muestra en Ilustración 5-1, y planos de arquitectura se detallan las ilustraciones 5-2, 5-3 y 5-4.



Ilustración 5-1: Vivienda FSV. Región de la Araucanía (CITEC UBB, 2010)

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica



Ilustración 5-2: Elevación frontal y posterior caso estudio (Citec UBB, 2011)

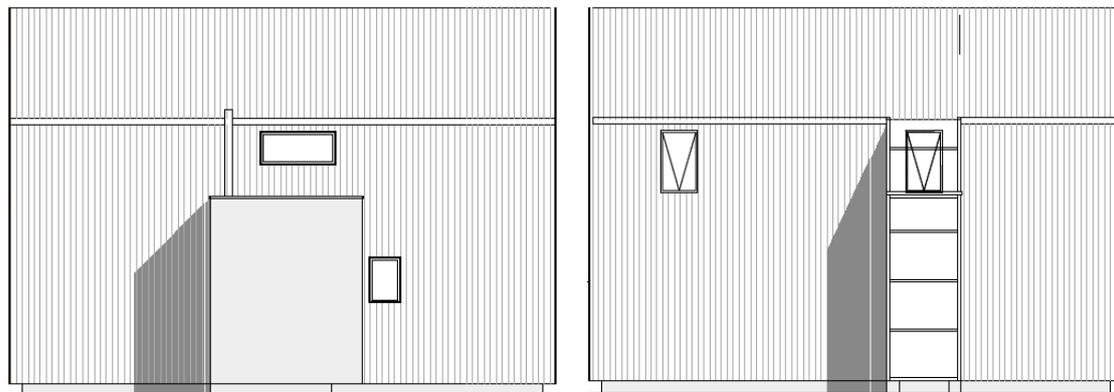


Ilustración 5-3: Elevación laterales caso estudio (Citec UBB, 2011)

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

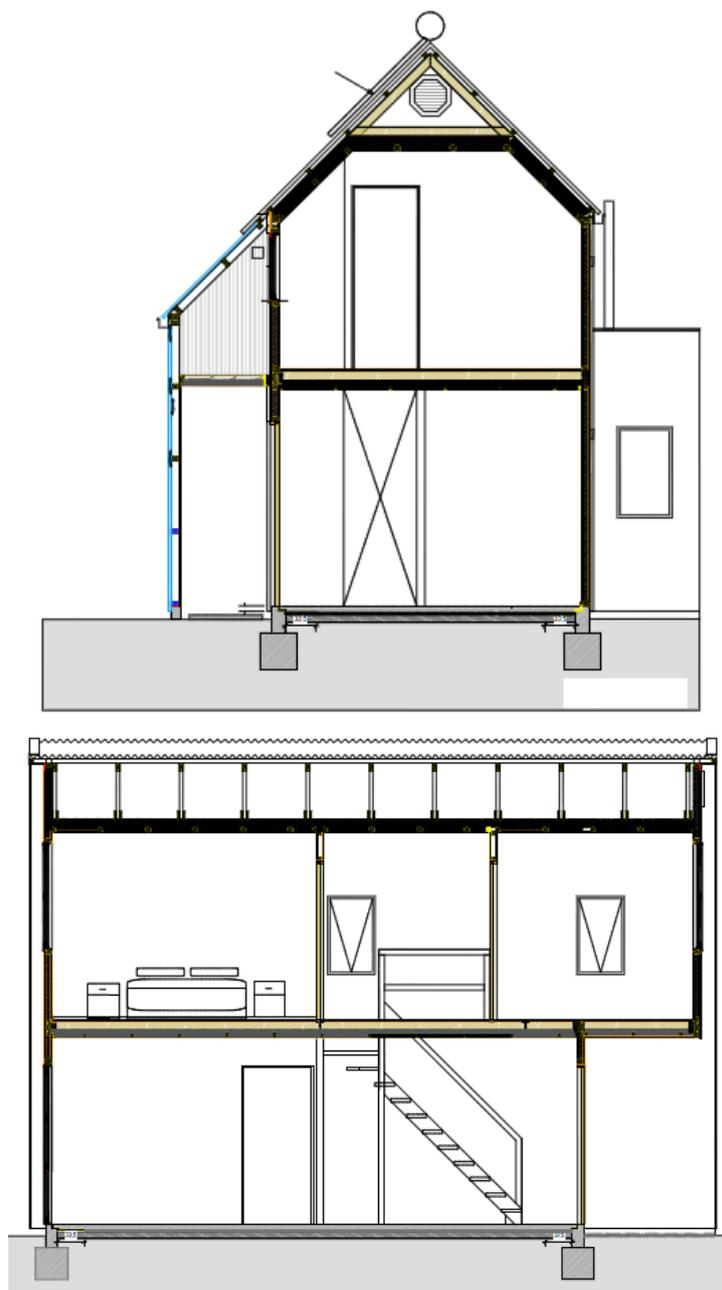


Ilustración 5-4: Elevación laterales caso estudio (Citec UBB, 2011)

Para la evaluación del caso estudio se trabajó con la metodología ACV, según ISO 14.40-2006, descrita y detallada en capítulos anteriores (capítulo 2, capítulo 3 y capítulo 4). De este modo se tiene:

5.2.2 Objetivos y Alcances del Estudio

- **Objetivo 1:** Estudio del flujo energético en el ciclo de vida un vivienda (*caso estudio*), y la implicancia de los materiales de construcción en el aporte de la energía contenida y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- **Objetivo 2:** Evaluación de las oportunidades de reducción de los impactos en términos de energía primaria y emisiones GEI, asociados a la selección de materiales de construcción, como así mismo, a las estrategias de diseño de envolventes térmicas.
- **Alcance:** Según se señala en punto 5.2.1, el *estudio caso* corresponde a una vivienda tipo FSV, Vivienda de tipología social, mejorada energéticamente para ser construida en la ciudad de Temuco, región de la Araucanía, Chile. La vivienda cumple con las exigencias de acondicionamiento térmico pertenecientes a la Zona 5. Se determinó en este estudio, realizar un análisis comparativo desde el punto de vista del desempeño energético, con otra vivienda con características similares, pero ubicada en la Zona 4 correspondiente a la ciudad de Concepción, Región del Biobío, Chile.
Se asume la vivienda FSV, como una *línea base*, sobre la cual se desarrolla el trabajo de analizar el flujo energético, evaluando tres diferentes soluciones constructivas para la envolvente térmica en base a las tres materialidades más utilizadas en soluciones de muros para viviendas en el país: madera, ladrillo de albañilería y hormigón, según se ha señalado en los puntos 3.2.2 y 3.2.3 correspondiente a Capítulo 3 de la tesis.
- **Unidad funcional:** un metro cuadrado construido de envolvente térmica
- **Flujo de referencia:** MJ/ m² envolvente térmica
- **Límites del sistema del estudio:** se consideraron dos sistemas diferentes: La *energía incorporada* en los materiales que constituyen la *envolvente* térmica estudiada (*Fase 1*) y los procesos que tienen lugar durante *la fase de uso de la vivienda*, orientados básicamente a la determinación de la *demanda energética*, por concepto de calefacción. (*Fase 2*).
- Tal como se ha señalado en punto 1.5.1 del capítulo 1, uno de los principales objetivos de esta tesis es valorar el aporte de la energía incorporada en las fases del ciclo de vida de una vivienda, de este modo para la evaluación del ACV del *estudio caso*, se propone considerar los resultados obtenidos en capítulos

tres y cuatro, el cual considera las fases referidas a la energía contenida en los materiales que forman parte de la envolvente térmica, la energía contenida en la fase de construcción (aun dando cuenta de su baja participación en el ciclo de vida total, del orden de un 0,01% para evaluar finalmente el ciclo de vida incorporando la energía asociada a la fase de uso u operación.

- Consideraciones y supuestos *caso estudio*:

Tal como se ha indicado en punto 5.2.1 (*Justificación caso estudio*), el diseño de la vivienda, fue *realizado* por el Centro de Investigación en Tecnologías de la Universidad del Biobío (CITEC), por lo que todo lo se refiere a desempeños y estándares técnicos exigibles, se basan en lo propuesto por los diseñadores que participaron en el estudio. Mismo criterio para las condiciones internas para la determinación de energía de calefacción, para la vivienda FSV en Región de la Araucanía (Zona climática 5, según NCh 1079 Of. 2008), lo cual queda resumido en tabla 5-1. Mediante técnicas de simulación energética se llegó a definir una demanda anual de $2.434,70 \text{ kWh}$, finalmente la demanda expresada mediante el indicador, de energía anual por unidad de superficie requerida por calefacción es de $49,70 \text{ (kWh/m}^2\text{año)}$ (muy por debajo del valor límite señalado en tabla 5-1).

Con respecto a las soluciones constructivas de las envolventes térmicas estudiadas y con la finalidad de realizar una evaluación comparativa de los flujos energéticos en el ciclo de vida de la vivienda en estudio y las emisiones de gases de efecto invernadero. Se disminuyen los parámetros de evaluación, determinando mantener fija la variable transmitancia térmica, de las envolventes que son evaluadas.

De este modo se buscaron tipologías de envolventes, con igual o similar transmitancia térmica. Las cuales fueron seleccionadas del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (última versión aprobada en mes de junio año 2012), considerando como criterio de selección las materialidades mayormente utilizadas en envolventes térmicas para tipología de viviendas social, según lo expresado en punto 5.2.2.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-1: Desempeños técnicos y estándares recomendados (CITEC UBB,2010)

N°	Desempeño Técnico	Estándar Mínimo Exigible		
1	Eficiencia Energética de la Construcción	Menor o igual a 60 KWh/m2 año.		
2	Aislación Térmica de elementos de la envolvente	Menor o igual a 0,6 W/m2C, para muros perimetrales, 0,35 W/m2C para complejos de techumbre y 1,0 W/m2C para pisos en contacto con terreno.		
3	Aislación higrotérmica de elementos de la envolvente	No ocurrencia de condensación para 90% H.R ambiente interior y condiciones ambientales exteriores propias del lugar de emplazamiento del proyecto.		
4	Protección hídrica de las fachadas	Límites de estanqueidad superior a 600 Pa		
5	Permeabilidad al aire de la construcción	Cambios de aire a 50 Pa inferiores a 8 (valor n50) Cambio de aire a 4 a Pa inferiores a 2 (valor n4).		
Condiciones internas para la determinación de energía de calefacción				
- modelo de ocupación y cargas asociadas se establecen como 160 Wh/m2 día, según CCTE_CL (Manual Certificación Comportamiento Térmico de Edificios).				
- Se fija la temperatura al interior de 20°C, entre las 7:00 y 23:00 horas, y 17°C ENTRE LAS 23:00 Y 7:00.horas.				
- Las renovaciones de aire propias, con una tasa de renovación de aire exterior de 1,5 ach.				
Valores de transmitancia térmica de la envolvente perimetral U(W/m2K) usados en simulación, medidos son:				
Caso	Pisos	Muros	Techumbre	Ventana
Vivienda FSV	1,00	0,53	0,3	2,58

Las soluciones seleccionadas del Listado de Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU, son las señaladas en la ilustración A-23 del Anexo de la presente tesis para las materialidades; hormigón armado, albañilería de ladrillo y madera denominada **M1**, **M2** y **M3**, respectivamente:

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

- (M1) Muro Hormigón armado con aislación de poliestireno expandido. Código 1.2 M.A 17.3
- (M2) Placa aislante Aislaforte sobre muro de albañilería. Código 1.2 M.B 10.2
- (M3) Muro estructurado pino radiata 2x3” exterior Smart Panel 11,1mm, interior aislante térmico de poliestireno expandido. Código 1.2.M B10.2

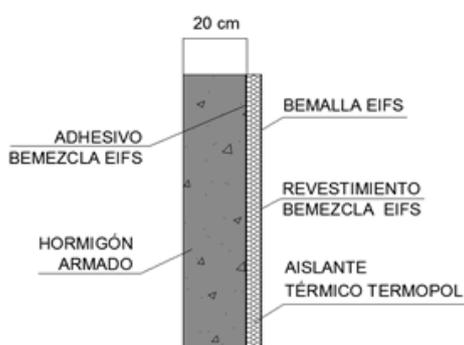
Con la finalidad de disminuir la cantidad de variables a evaluar en la envolvente térmica de la vivienda, se consideró la misma solución constructiva para el complejo de techumbre. No obstante, la solución constructiva evaluada, cumple con la exigencia de transmitancia térmica “U” igual o menor, o una resistencia térmica total “Rt igual o superior, a la zona cuatro y cinco establecido en el del artículo 4.1.10 de la Ordenanza General De Urbanismo y Construcciones.

En ilustraciones 5-5, 5-6, 5-7 y 5-8 se muestran los detalles constructivos, características técnicas de las soluciones consideradas tanto para envolvente de muros como de envolvente de techumbre.

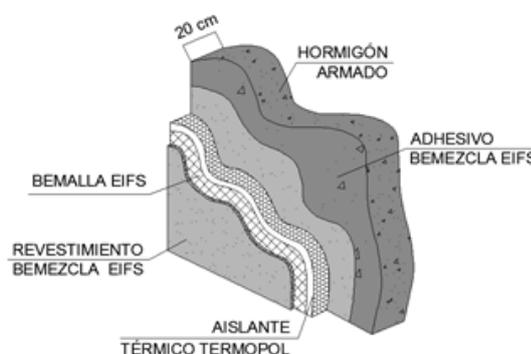
M1 - Solución constructiva Muro N°1:

Muro de hormigón armado normal de 200 mm de espesor, con aislante térmico de poliestireno expandido de densidad 15 Kg/m³ con espesor de 20 mm (variable según la zonificación térmica nacional). Se adhiere al muro mediante pegamento BEMEZCLA EIFS. Como revestimiento exterior se aplica mortero cementicio modificado BEMEZCLA EIFS en espesor de 2mm reforzado con malla de fibra de vidrio.

Corte:



Detalle:



Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Materiales	Densidad Aparente [Kg/m ³]	Conductividad Térmica [W/mK]	Espesor [m]
Hormigón Armado	2400	1,63	0,2
Poliestireno Expandido	15	0,0413	0,02
Mortero	2000	1,4	0,002

Rt:	0,77 [m ² K/W]
U:	1,30 [W/m ² K]

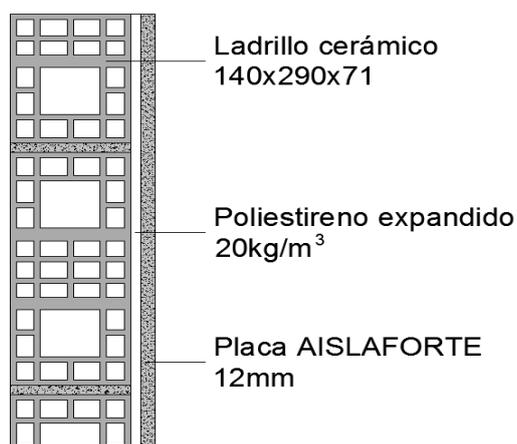
Ilustración 5-5: Detalle Muro Hormigón Armado solución MINVU (elaboración propia, 2012)

M2 - Solución constructiva Muro N°2:

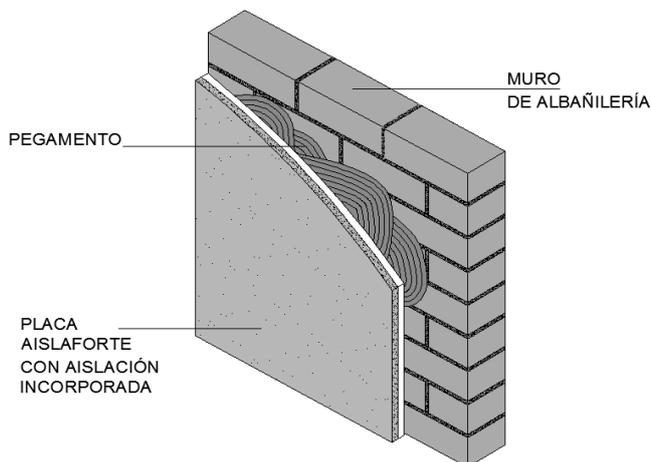
Placa aislante Aislaforte sobre muro de albañilería de 140 x 290 x 71 mm.

Muro de albañilería construido con ladrillos cerámicos de 140 x 290 x 71 [mm], unidos mediante un mortero de pega de dosificación 1:3 cuyo espesor entre ladrillos es de 18 mm, aproximadamente. Sobre una de sus caras va una plancha de poliestireno expandido de 10 a 45 mm de espesor y densidad 20 kg/m³. Sobre esta plancha se instala una placa de cemento "Aislaforte" de 12 mm de espesor con refuerzos de malla de fibra de vidrio. La placa y la plancha se han adhieren mediante un pegamento cementicio.

Corte:



Detalle:



Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Materiales	Densidad Aparente [Kg/m ³]	Conductividad Térmica [W/mK]	Espesor [m]
Ladrillo cerámico 140x290x71	1276	0,5	0,14
Poliestireno Expandido	20	0,0384	0,01
Placa Aislaforte	939	0,2	0,012

Rt	0,77 [m ² K/W]
U	1,30 [W/m ² K]

Ilustración 5-6: Detalle Muro Albañilería solución MINVU (elaboración propia, 2012)

M3 - Solución constructiva Muro N°3:

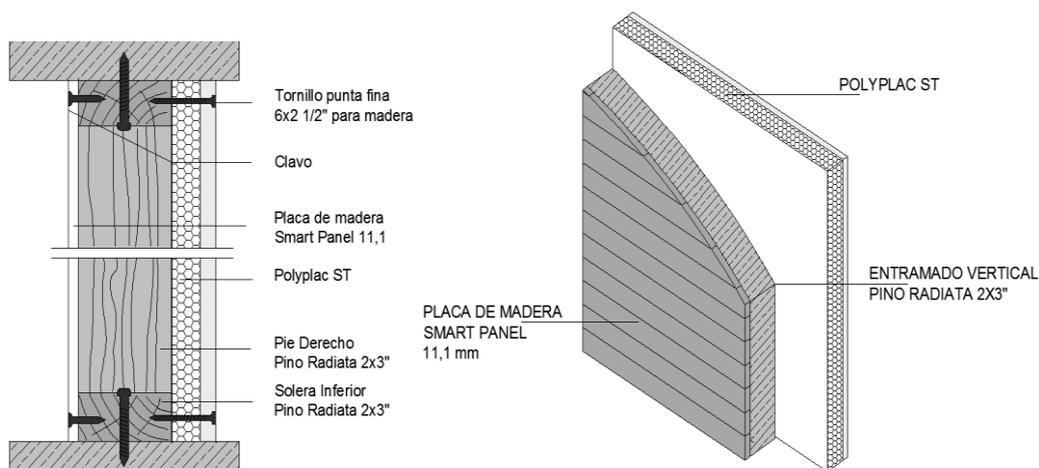
Muro estructurado pino radiata 2x3” exterior SmartPanel 11,1mm, interior aislante térmico de poliestireno expandido de 15kg/m³ en Polyplac ST Knauf. Sistema WE111 400.

Solución compuesta por una estructura de entramado vertical de pino radiata 2x3”, con pie derechos distanciados entre ejes cada 40cms. Las soleras superior e inferior de pino radiata 2x3” con aplicaciones de banda acústica Knauf de 3mm de espesor y 50mm de ancho. La estructura considera revestimiento exterior de placa de madera Smart Panel 11,1mm fijada a la estructura mediante tornillos punta fina 6x1 ¼” para madera. Por el interior está forrada por Polyplac ST Knauf, formada a partir de una placa de yeso cartón ST 10mm, adherida a una plancha de poliestireno expandido Polyplac, fijada a la estructura de pie derechos con de tornillos 6x2 ½” para madera.

Corte:

Detalle:

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica



Materiales	Densidad Aparente [Kg/m ³]	Conductividad Térmica [W/mK]	Espesor [m]
Smart Panel	700	0,083	0,011
Entramado Vertical + Cámara de Aire	410	0,4	0,073
Poliestireno Expandido	15	0,0413	0,01
Yeso Cartón	700	0,26	0,01

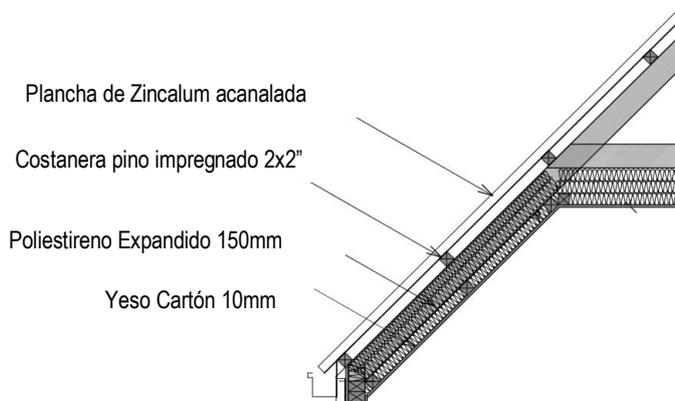
Rt	0,77 [m ² K/W]
U	1,31[W/m ² K]

Ilustración 5-7: Detalle Muro Madera solución MINVU (elaboración propia, 2012).

Descripción Solución Constructiva complejo estructura de techumbre.

Estructura de madera de 2"x4", con encintado de cielo de 2"x2". Estructura forrada exteriormente por una cubierta plancha 5-V Zincalum, por el interior con una placa de yeso cartón de 10mm adherida a una plancha de poliestireno expandido de e: 150mm.

Detalle:



Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Materiales	Densidad Aparente [Kg/m ³]	Conductividad Térmica [W/mK]	Espesor [m]
Plancha de Zincoalum	7100	112	0,003
Estructura de madera	410	0,104	0,045
Poliestireno Expandido	10	0,043	0,15
Yeso Cartón	700	0,26	0,01

Rt	3,70 [m ² K/W]
U	0,27 [W/m ² K]

Ilustración 5-8: Detalle Solución Techumbre (elaboración propia, 2012)

Los detalles para muro envolvente de la línea base se muestran detalladas en ilustraciones 5-9 y 5-10.

Solución para muro 1: Estructura de madera en pie derecho de 2"x3". Aislación térmica en poliestireno expandido de 70mm en 15 kg/m³. Revestimiento interior en yeso cartón de e: 10 mm y exterior en Smart panel de e: 11 mm con cámara de aire por listoneado de OSB de e: 10mm.

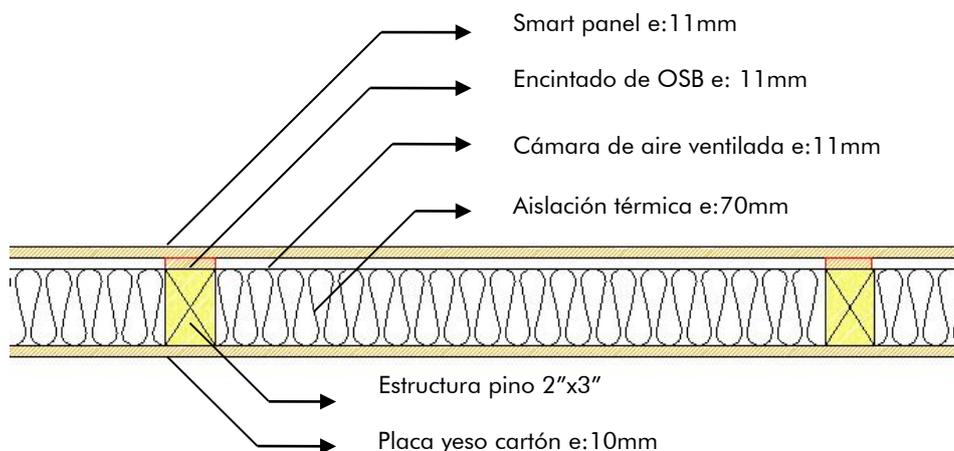


Ilustración 5-9: Detalle Solución muro 2 Línea Base (elaboración propia, 2012)

Solución para muro 2: Estructura de madera en pie derecho de 2x3 pulgadas. Aislación térmica en poliestireno expandido de e: 70mm en 15 kg/m³. Revestimiento interior en yeso cartón de e:10 mm y exterior en OSB de e:11 mm + panel de fibrobitumen (Onduline) de 3mm.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

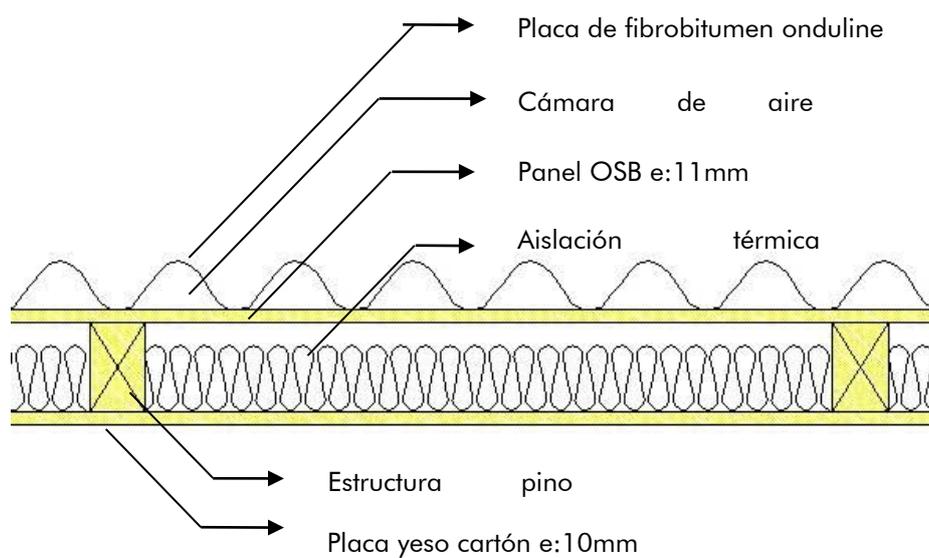


Ilustración 5-10: Detalle Solución muro 2 Línea Base (elaboración propia, 2012)

5.2.3 Herramientas de análisis y aspectos metodológicos

- **Identificación y cuantificación de los consumos energéticos**, se obtuvo previo a modelación de la vivienda en estudio con “TAS Building Designer - 3D Modeller” y la introducción de las variables de cada caso con “TAS Building Designer - Building Simulator”. Desarrollando un total de 96 simulaciones para el *caso estudio*, cuyos cálculos y dimensiones evaluadas se detallan en punto E.1 Anexo E.
- **Demanda energética**, se establecieron parámetros fijos correspondientes a la ventilación y la carga ocupacional. Por otra parte, se estableció una serie de variables tales como la ubicación, orientación y composición de la envolvente, cuyo resumen queda establecido en tabla 5-2.
- **Condiciones Internas**: Basándose en los criterios y supuesto utilizados para la simulación de la línea base, realizado por Citec - UBB. Y como un modo de simplificar el modelo, limitando el número de casos, se establecieron las siguientes condiciones internas para los 96 casos a evaluar (ver tabla 5-2).
 - ✓ Se fijó una temperatura al interior de 20°C entre las 7:00h y las 23:00h; y 17° C entre las 23:00 h y 7:00 h.
 - ✓ Se consideró una infiltración de la vivienda de 1,0 ach como valor de referencia.
 - ✓ Las ganancias de ocupación sensible se fijó 6,7 [W/m²]

Tabla 5-2: Resumen de las variables consideradas para simulación demanda energética (elaboración propia)

Ubicación	Orientación	Muros	Aislación	Ventanas
(Zona térmica y Ciudad)	(grados)	(Solución de muro)	(espesor)	(Tipo de ventanas)
Z4 Concepción	Norte 0°	M1: Hormigón	e1	V1
Z5 Temuco	Este 90°	M2: albañilería	e2	V2
	Sur 180°	M3: Madera		
	Oeste 270°			
2	4	3	2	2

Número de simulaciones: 96

Donde:

e1: espesor correspondiente a cada solución constructiva de muro

e2: espesor correspondiente a cada solución de muros, aumentada en 20 mm

V1: ventana de Aluminio

V2: ventana de PVC

- **Elementos de Construcción**, Se creó una base de datos de acuerdo a los requerimientos de la investigación, se ingresó la totalidad de los materiales para *cada caso estudio*. A cada material se le asignó su densidad y conductividad térmica según NCh 853 Of, 2007, o de acuerdo a la especificación técnica del fabricante. Finalmente a cada material se le asignaron sus valores de emisividad y factor de vapor de difusión de vapor extraído de la base de datos de materiales de EDLS TAS, cuyos registros quedan expresados en tabla A-24 del Anexo del presente documento.

- **Sistemas Constructivos**: Detallados en puntos 5.2.2.

- **Vida útil**: Para el cálculo de la fase de uso (operación) de la vivienda *caso estudio*. Se consideró una vida útil de 40 años, basada en un cálculo promedio del periodo fijado por el Servicios de Impuestos Internos (SII, 2003), para tasación de bienes físico del activo inmovilizado. (Hatt, 2012).

Obtenida la demanda de calefacción por metro cuadrado para las 96 simulaciones, se determinó la huella de carbono, considerando las alternativas de calefacción en base a: leña, gas licuado o kerosene respectivamente, para tal efecto se utilizó la misma metodología expuesta en capítulos tres y cuatro de la tesis.

Cabe destacar que en estricto rigor, para traducir la demanda energética a consumo y emisiones de carbono, es necesario conocer la eficiencia en los sistemas de generación y suministro de la energía demandada (Alonso, 2010). Lo que para esta investigación no ha sido objeto de estudio así como tampoco los parámetros de comportamiento y gestión de uso.

Los elementos constructivos han sido considerados de manera aislada, obviando la influencia de otros componentes y sistemas del edificio y otros parámetros de uso pueden influir en los resultados. Tampoco se han tenido en cuenta otros consumos

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

directamente vinculados a los componentes de fachada, como el de iluminación, que también tendrá una repercusión sobre la demanda energética y las emisiones. Según lo establecido en los límites del sistema estudio, se clasificó el ACV en un Sistema 1: Fase de fabricación de productos de construcción y Sistema 2: Fase de uso de la vivienda, para llevar a cabo la recolección de datos y procedimiento de cálculo respectivamente. No siendo considerado la fase mantención ni fin de vida o desconstrucción.

- **Determinación de la energía contenida y emisión de CO₂.** Para la determinación de la energía contenida y las emisiones de CO₂, se definió y trabajó en primera instancia con un flujo de referencia de un input en [MJ/Kg] equivalente a la Energía por Kilo de material y un Output en [Kg CO₂/Kg] equivalente a los Kg de emisión de CO₂ por Kilo de material.

Obtenida la cantidad de obra de cada material y su densidad [kg/m³], se calculó el peso de todos los elementos que conforman la envolvente y fundaciones del estudio de caso. Finalmente con el peso de los elementos y los flujos de referencia se determinó el total de Energía [MJ] y la Huella de Carbono [Kg CO₂], cuyos resultados se muestran en tabla 5-3.

Tabla 5-3: Identificación del peso, energía contenida y emisiones de los elementos de construcción (elaboración propia, 2012)

Elementos	Materiales	[M ³]	Densidad [kg/m ³]	Peso [Kg]	Energía [MJ/Kg]	Emisiones [Kg CO ₂ /Kg]	Energía Total [MJ]	Emisión Total [Kg CO ₂]
Muros	Solución 1							
	Hormigón Armado	26,52	2400	63648	0,55	0,10	35187,4	6448,4
	Poliestireno Expandido 20mm	1,77	15	26,52	117	17,3	3102,8	458
	Mortero	0,27	2000	530,40	1,33	0,21	705,43	110,3
	Solución 2							
	Ladrillo cerámico	9,30	1276	11861,70	2,36	0,22	27970,10	2550,68
	Poliestireno Expandido 10mm	0,88	20,00	17,68	117,00	17,25	2068,56	304,98
	Mortero de Pega	3,10	2000	6200	1,33	0,21	8246	1289,60
	Placa Aislaforte	1,06	939,00	996,09	0,54	0,07	537,89	68,73
	Solución 3							
	Smart Panel	0,97	700	680,68	5,27	0,40	3584,27	274,13
	Entramado de Madera	3,17	410	1301,34	0,27	0,24	351,81	310,42

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

	Poliestireno Expandido 10mm	0,88	15	13,26	117	17,27	1551,42	229
	Yeso Cartón	0,88	700	618,80	6,75	0,38	4176,90	235,14
Solución 4								
	Hormigón Armado	26,52	2400	63648	0,55	0,10	35187,36	6448,42
	Poliestireno Expandido 40mm	3,54	15	53,04	117	17,27	6205,68	916
	Mortero	0,27	2000	530,40	1,33	0,21	705,43	110,32
Solución 5								
	Ladrillo cerámico	9,30	1276	11861,70	2,36	0,22	27970,10	2550,68
	Mortero de Pega	3,10	2000	6200	1,33	0,21	8246,00	1289,60
	Poliestireno Expandido 30mm	2,65	20	53,04	117,00	17,25	6205,68	914,94
	Placa Aislaforte	1,06	939	996,09	0,54	0,07	537,89	68,73
Solución 6								
	Smart Panel	0,97	700	680,68	5,27	0,40	3584,27	274,13
	Entramado de Madera	3,17	410	1301,34	0,27	0,24	351,81	310,42
	Poliestireno Expandido 30mm	2,65	15	39,78	117	17,27	4654,26	687
	Yeso Cartón	0,88	700	618,80	6,75	0,38	4176,90	235,14

Ventanas de Aluminio Proyectante Tipo Termopanel									
Ventanas	Marco de aluminio	0,06	2700	165,28	190,95	28,09	31559,72	4641,89	
	Vidrio e=5mm	0,06	2500	148,88	15,90	0,94	2367,11	139,94	
	Ventanas de PVC Proyectante Tipo Termopanel								
	Marco de PVC	0,06	1390	85,09	68,37	9,29	5817,64	790,81	
	Vidrio e=5mm	0,06	2500	148,88	15,90	0,94	2367,11	139,94	
Solución 1									
Techumbre	Zinc	0,14	7200	975,24	72,00	3,90	70217,28	3803,44	
	Pino 45x145 mm x 3,2 m	0,40	410	164,88	0,27	0,24	44,57	39,33	
	Pino 45x45 mm x 3,2 m	0,39	410	160,39	0,27	0,24	43,36	38,26	
	Poliestireno Expandido 150mm	4,02	10	40,20	117	17,27	4703,40	694,25	
	Yeso Cartón	0,29	700	203	6,75	0,38	1370,25	77,14	
Piso	Piso en contacto con el terreno								
	Hormigón de radier	2,10	2000	4200	0,54	0,07	2268,00	289,80	

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

	Grava	2,10	1700	3570	0,08	0,00	296,31	17,14
	Cimiento corrido H20 (90)40-06							
Fundaciones	Fundaciones	6,80	2400	16320	0,55	0,10	9022,40	1653,44
	acero estriado 10 mm	0,01	7850	58,88	35,40	2,71	2084,18	159,55
	acero liso 8 mm	0,003	7850	22,77	35,40	2,71	805,88	61,69
	alambre negro # 18	0,0004	7850	2,98	35,40	2,71	105,60	8,08

- **Los límites de Fase 1:**

Fase de fabricación de productos de construcción. Para cada uno de los materiales de construcción que intervienen en la vivienda incluyendo: a) Extracción/ producción de materias primas. b) Transporte desde la extracción/ producción a la fabricación c) Fabricación del material y d) fase de construcción.

- **Límite Fase 2:**

Consumo energético, asociado a la demanda de energía de calefacción para las viviendas, mediante la aplicación de software de simulación energética TAS. Demanda expresada mediante el indicador de energía anual por unidad de superficie requerida para calefacción (MJ/ m2 año).

- **Bases de datos y requisitos de calidad de datos:**

Los datos ingresados a los estudios son de origen primario y secundario. Para los inputs relacionados con la energía contenida y emisiones de CO₂, de aquellos materiales que forman parte de la envolvente se trabajó con los datos obtenidos en capítulo 3, pero todos los otros materiales que no formaron parte de los inventarios señalados son obtenidos de bases de datos validadas y reconocidas internacionalmente, específicamente: ECOINVENT, ICE 2.0 y los datos medioambientales proporcionados en el banco BEDEC PR/PCT del Instituto de la Construcción de Cataluña (ITeC) detallados en tabla A-1 Anexo .

5.2.4 Resultados Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) Caso estudio

5.2.4.1 Fase de Construcción: Fabricación, obtención de materiales de construcción y fase de construcción

Los resultados y análisis correspondiente a la fase de extracción y fabricación de materiales de construcción, que forman parte de la envolvente térmica de la vivienda *caso estudio*, se expresan en tabla 5-3. De acuerdo a las diferentes soluciones constructivas

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

para el acondicionamiento térmico de muros, aprobadas por el MINVU, desarrollado en punto 5.2.2.

A partir de la misma información entregada en tabla 5-3, se tiene la cuantificación de la energía contenida y huella de carbono de cada material de construcción presente, tanto en las envolventes estudiadas, como así mismo, para las fundaciones.

A partir de la información anteriormente señalada, para la fase I, se realiza un análisis gráfico mostrando en forma resumida la relación e implicancia de las variables peso (kg), energía contenida (MJ) y emisiones de CO₂ (KgCO₂), para los resultados de las soluciones constructivas evaluadas (**M1, M2 y M3**), cuyos detalles de cálculo se muestran a continuación en tablas 5-4, 5-5, 5-6 y 5-7.

Tabla 5-4: Distribución porcentual entre el peso, la energía contenida y la huella de carbono correspondiente a Solución M1 muro de hormigón (elaboración propia, 2012)

Elementos	Materiales	Peso [Kg]	Energía [MJ/Kg]	Emisiones [Kg CO ₂ /Kg]	% Participación Total		
					% Participación en peso [Kg]	% Participación de energía contenida [MJ]	% Participación de emisiones [Kg CO ₂]
Muros	Solución 1						
	Hormigón Armado	63648	0,5528	0,1013	99,13%	90,23%	91,90%
	Poliestireno Expandido 20mm	26,52	117	17,27	0,04%	7,96%	6,53%
	Mortero	530,4	1,33	0,208	0,83%	1,81%	1,57%
	Variación porcentual por el aumento del espesor de la aislación en 20 mm						
	Espesor 20mm	---	---	---	100%	100%	100%
	Espesor 40mm	---	---	---	100,04%	107,96%	106,53%

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-5: Distribución porcentual entre el peso, la energía contenida y la huella de carbono correspondiente a Solución M2 muro de albañilería (elaboración propia, 2012)

Elementos	Materiales	Peso [Kg]	Energía [MJ/Kg]	Emisiones [Kg CO ₂ /Kg]	% Participación Total		
					% Participación en peso [Kg]	% Participación de energía contenida [MJ]	% Participación de emisiones [Kg CO ₂]
Muros	Solución 2						
	Ladrillo cerámico	11861,7	2,4	0,22	62,2%	72,05%	60,5%
	Poliestireno Expandido 10mm	17,7	117	17,25	0,09%	5,33%	7,2%
	Mortero de Pega	6200	1,33	0,21	32,5%	21,2%	30,6%
	Placa Aislaforte	996,1	0,54	0,07	5,2%	1,4%	1,6%
	Variación porcentual por el aumento del espesor de la aislación en 20 mm						
	Espesor 20mm	---	---	---	100%	100%	100%
	Espesor 40mm	---	---	---	100,2%	110,7%	114,5%

Tabla 5-6: Distribución porcentual entre el peso, la energía contenida y la huella de carbono correspondiente a Solución M3 muro de madera (elaboración propia, 2012)

Elementos	Materiales	Peso [Kg]	Energía [MJ/Kg]	Emisiones [Kg CO ₂ /Kg]	% Participación Total		
					% Participación en peso [Kg]	% Participación de energía contenida [MJ]	% Participación de emisiones [Kg CO ₂]
Muros	Solución 3						
	Smart Panel	680,68	5,27	0,40	26,04%	37,09%	26,14%
	Entramado de Madera	1301,34	0,27	0,24	49,78%	3,64%	29,60%
	Poliestireno Expandido 10mm	13,26	117,00	17,27	0,51%	16,05%	21,84%
	Yeso Cartón	618,80	6,75	0,38	23,67%	43,22%	22,42%
	Variación porcentual por el aumento del espesor de la aislación en 20 mm						
	Espesor 20mm	---	---	---	100%	100%	100%
	Espesor 40mm	---	---	---	101,01%	132,11%	143,67%

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-7: Distribución porcentual comparativa entre las soluciones M1, M2 y M3 de los muros de la envolvente (elaboración propia, 2012).

	% Participación en peso [Kg]	% Participación de energía contenida [MJ]	% Participación de emisiones [Kg CO ₂]
solución M1	74,75%	44,58%	57,14%
solución M2	22,21%	44,38%	34,32%
solución M3	3,04%	11,05%	8,54%

- Análisis gráfico Soluciones muros (M1, M2 y M3)

En ilustración 5-11 se muestran las distribuciones porcentuales entre el peso, energía contenida y huella de carbono correspondiente a la solución M1, y en ilustración 5-12 la variación porcentual por el aumento de la aislación en 20mm.

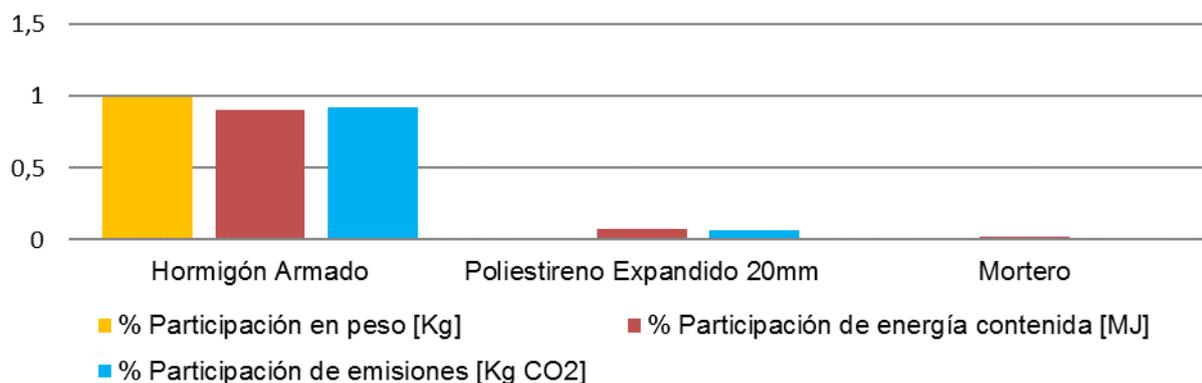


Ilustración 5-11: Distribuciones porcentuales entre peso, energía contenida y huella de carbono correspondiente a la solución M1: Hormigón armado (elaboración propia, 2012)

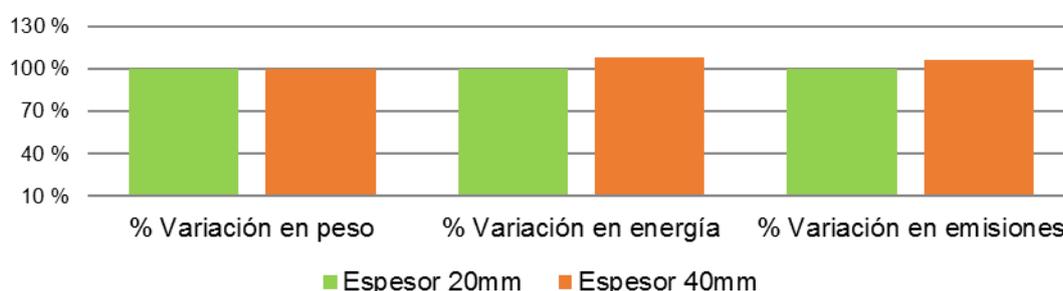


Ilustración 5-12: Variación porcentual aumento de la aislación en 20mm para M1: Hormigón armado (elaboración propia, 2012)

A partir de Ilustración 5-11, solución de muro M1: *Hormigón Armado, Poliestireno Expandido y Mortero*. Puede desprenderse que con respecto al peso, el hormigón armado es el material que tiene mayor incidencia en la composición del muro aportando con el

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

99,1% del peso total por su alta densidad, siguiendo la misma tendencia con un gran aporte energético de 90,2% y de emisiones, con un 91,9% respectivamente contenida en el material. En cuanto al poliestireno expandido que es utilizado como aislación del muro, tiene una gran energía contenida por kilogramo de material en comparación al hormigón armado, pero este al tener baja participación en la composición del muro, el aporte energético y de emisiones de CO₂ sólo es de un 7,9% y 6,5% respectivamente.

Con la finalidad de realizar un análisis energético y medioambiental tanto de la fase de construcción como para la fase de uso de la vivienda, se decidió aumentar en 20 mm el espesor de la aislación para cada solución de muro, incrementándose considerablemente la energía contenida y huella de carbono de la solución, del orden de un 8,4% y 7,2% respectivamente (Ver Ilustración 5-3). Este notable incremento, se debe a que este material necesita una gran energía en su proceso de fabricación, liberando así una gran cantidad de gases de efecto invernadero al medio ambiente, propiedades descritas según se evidencia en tabla de bases de datos (ver Anexo, tablas A-25 y A-26).

La ilustración 5-13, cual muestra la solución de muro M2: Ladrillos cerámicos, Mortero, Poliestireno Expandido y una Placa Aislaforte. Siendo el material predominante el ladrillo cerámico (140x290x71mm), que conforma el muro de albañilería. Al respecto este material sigue la misma tendencia de la solución M1, donde al ser el material más incidente en la solución al igual que el mortero de pega, posee el mayor aporte en peso por su alta densidad. Al respecto, el ladrillo cerámico en comparación al hormigón, posee una mayor energía contenida por kilogramo de material para su fabricación, considerablemente mayor, lo cual se muestra claramente en Ilustración 5-13.

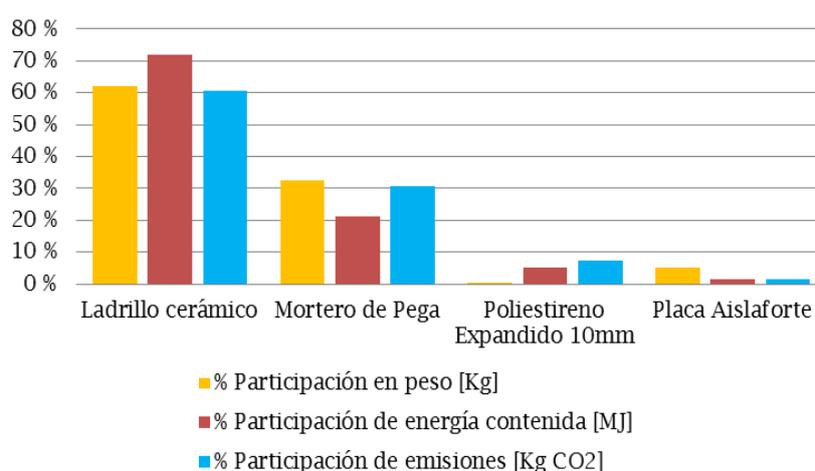


Ilustración 5-13: Distribución porcentual entre el Peso, la Energía contenida y la Huella de carbono correspondiente a la Solución M 2 de Albañilería de ladrillo (elaboración Propia, 2012)

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

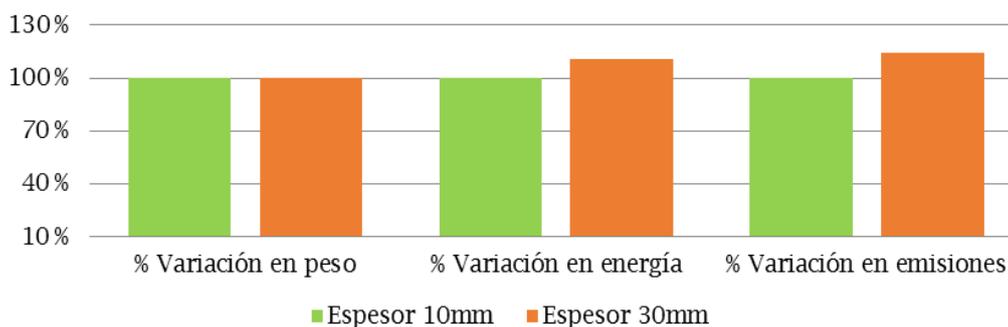


Ilustración 5-14: Variación porcentual aumento de la aislación en 20mm para la Solución M2: albañilería de ladrillo (elaboración propia, 2012)

Esta solución presenta un espesor de 10mm de espesor de aislación, necesaria para alcanzar una transmitancia térmica de 1,3 [W/m2K], al igual que el resto de las soluciones analizadas. En efecto, la composición de esta solución requiere 10 mm menos de espesor de aislación, respecto a la solución *M1* que requiere 20mm de espesor. En otras palabras al aumentar en 20 mm de espesor de aislación, se aumenta tres veces el espesor de esta solución constructiva. En la gráfica 5 - 15, se puede observar que existe un incremento considerable en la energía contenida total y las emisiones de CO₂, en un orden de un 10,7% y 14,5% respectivamente, donde existe muy poca variación en el peso del muro.

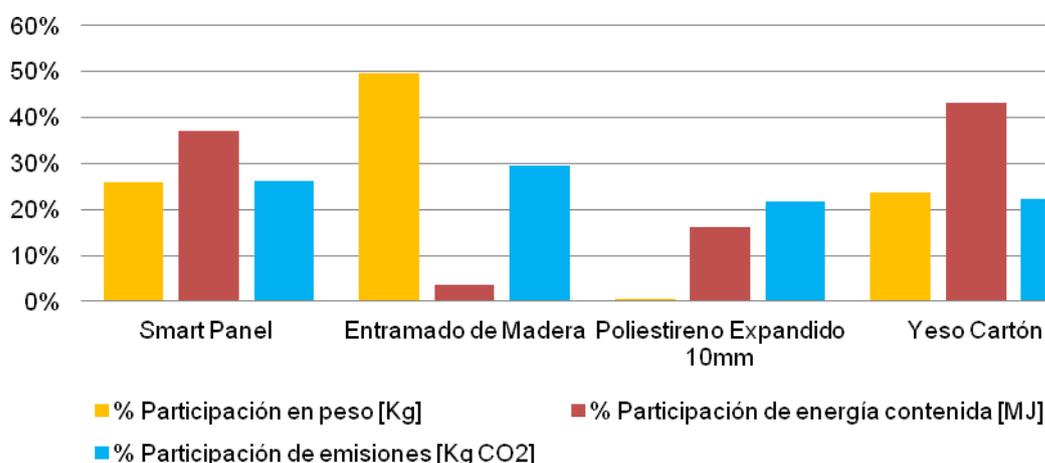


Ilustración 5-15: Distribución porcentual el peso, energía contenida y huella de carbono correspondiente a la Solución M3 de Madera (elaboración propia, 2012)

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

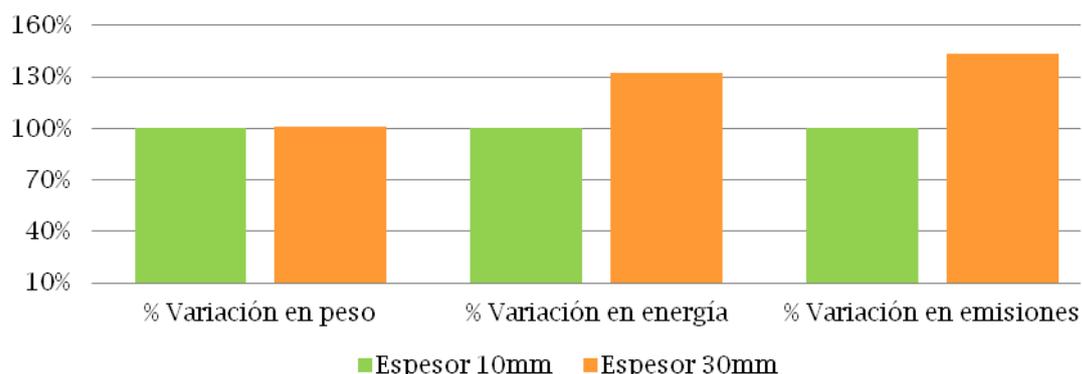


Ilustración 5-16: Variación porcentual aumento de la aislación en 20mm para solución M3 muro de madera (elaboración propia, 2012)

A partir de la Ilustración 5-15, la cual muestra solución de muro M3: tablero de Smart Panel, entablado de madera, poliestireno expandido y una placa de yeso cartón. Puede deducirse que el mayor aporte en peso, corresponde al entramado de madera, sin embargo en este caso, la energía incorporada no es directamente proporcional al peso de la estructura como sucede en el resto de las soluciones analizadas, debido a que la madera tal como se analizó en capítulo tres es un material orgánico, el cual utiliza un bajo consumo energía en la elaboración de piezas y componentes, en comparación con el hormigón armado el cual a su vez, está constituido por más materiales como el cemento y áridos, que a su vez tienen diferentes energías incorporadas (según lo analizado y determinado en capítulo tres).

Del punto de vista de la generación de emisiones de gases de efecto invernadero, la solución de madera y tal como muestra la gráfica 5-16, se evidencia su baja huella de carbono comparativamente con las otras soluciones constructivas.

Por otro lado, el yeso cartón es un material que presenta un alto porcentaje de energía incorporada, pero al igual que la madera, genera reducidas emisiones de gases de efecto invernadero por kilogramo de material.

Finalmente, se destaca que al aumentar en 20mm el espesor de la aislación, este material, pasa a ser el más influyente en términos de energía y de emisiones. El porcentaje de crecimiento, en términos de energía y huella de carbono total, de esta solución corresponde a un 32,1% y 43,7% respectivamente.

Resumidamente, puede indicarse que el poliestireno expandido es un material, cuyo proceso de elaboración tiene un alto impacto ambiental desde el punto de vista del consumo energético y emisiones a la atmósfera, según se registra en tabla A-22 del Anexo de la presente tesis.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

En Ilustración 5-17 se muestra una evaluación comparativa en términos de peso, energía contenida y emisiones de CO₂ para las tres soluciones en estudio, de donde se observa claramente que la solución M1: Hormigón armado, es el material que aporta el mayor porcentaje de peso, debido a su alta densidad en relación a las otras soluciones constructivas. Además el hormigón posee baja energía contenida por kilogramo de material, pero al tener un gran aporte en peso presenta una contribución importante en energía y emisiones.

Por otra parte, la solución M1 Hormigón Armado v/s la solución M2 Albañilería de Ladrillo, tiene alrededor de un 50% más de peso respecto a la segunda solución, pero en ambos casos, se tiene similar energía incorporada en los materiales de fachadas de muro. *Por ende, se verifica que el peso no es directamente proporcional a la energía incorporada.* En la ilustración 5-17 se observa esta similitud, cada solución tiene diferentes valores de emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se debe, básicamente a que se usan diferentes tipos de combustibles para el proceso de fabricación de cada material, siendo el hormigón más contaminante en comparación al ladrillo, al tener una alta densidad por metro lineal en la solución de muro.

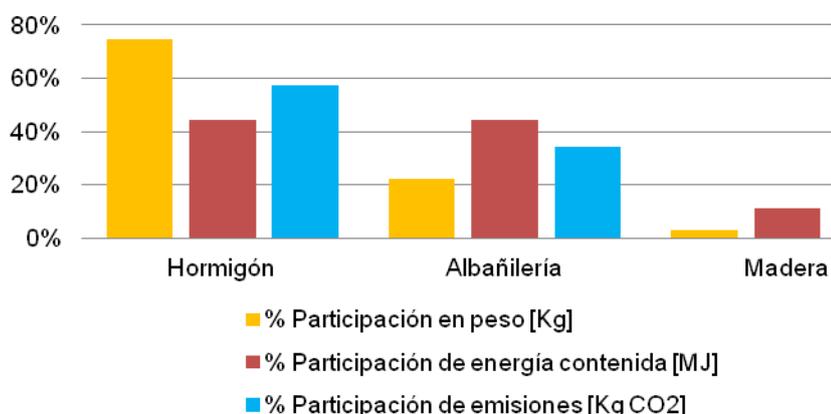


Ilustración 5-17: Evaluación Comparativa de las Soluciones de muro de Hormigón, Albañilería y Madera (elaboración propia, 2012)

- Soluciones material ventana (Aluminio y PVC).

Tal como se indicó tabla 5-2, una de las variables a medir son las materialidades de perfiles de ventanas considerando V1 material Aluminio y V2 material PVC. Con la finalidad de medir el impacto de la materialidad en la energía contenida y emisiones de GEI, se hace un análisis comparativo entre el uso alternativo de cada una de las materialidades, cuyos resultados expresados en tabla 5-8 y su representación gráfica en Ilustración 5-18. Donde se muestra claramente la desventaja ambiental de utilizar

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

ventanas de aluminio, aunque solo existe un 14,6% de variación con respecto al peso, existe una gran variación de energía contenida (80,56% para material Aluminio) y emisiones de CO₂ (83,71% para material PVC)

Recordemos que hasta ahora, sólo se están evaluando los desempeños ambientales para la fase 1 del ciclo de vida, de este modo los resultados de selección de ellos, no sería concluyente ya que habrá que evaluar para el ciclo de vida completo y considerando todos los subsistemas considerados.

Tabla 5-8: Distribución porcentual entre el peso, la energía contenida y la huella de carbono correspondiente a ventanas de Aluminio y PVC (elaboración propia, 2012)

Elementos	Materiales	% Participación en peso [Kg]	% Participación de energía contenida [MJ]	% Participación de emisiones [Kg CO ₂]
Ventanas	Ventana de Aluminio	57,32%	80,56%	83,71%
	Ventana de PVC	42,68%	19,44%	16,29%

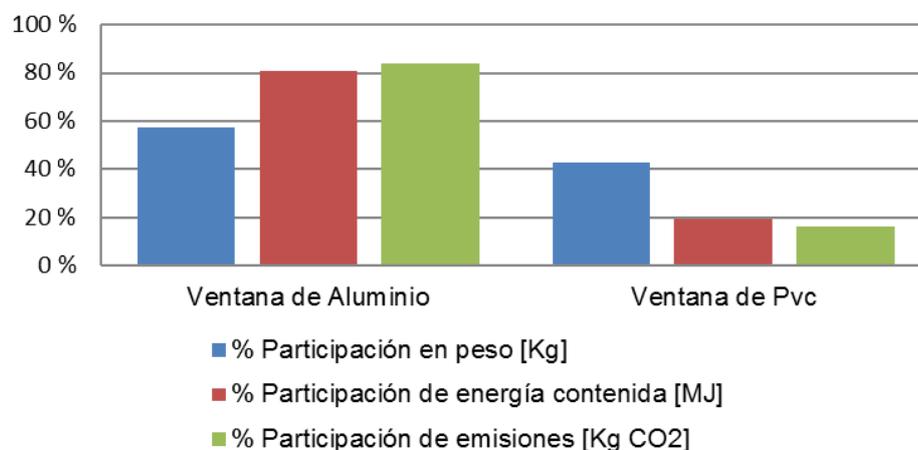


Ilustración 5-18: Distribución Comparativa entre la Ventana de PVC v/s Ventana de Aluminio (Elaboración Propia, 2012)

Consolidando toda la información cuantificada hasta el momento, es decir incorporando los elementos (*subsistemas*) que forma parte de la envolvente sujeta a evaluación (*Sistema*), en tabla 5-9, se muestra el detalle de los valores obtenidos para las tres soluciones (M1, M2 y M3) incorporando la estructura de techumbre y fundaciones (con la finalidad de analizar el aporte de este subsistema desde el punto de vista del peso que representa en la estructura estudiada).

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-9: Comparación de casos en cuanto a su participación en peso, energía y huella de carbono, correspondiente a los elementos de su envolvente y fundaciones (elaboración propia, 2012)

Elemento	Peso [kg]	Energía [MJ]	Emisiones [Kg CO ₂]
M1 V1 E1			
Muro 1	64204,92	38995,63	7016,74
Ventana 1	314,15	33926,83	4781,83
Techumbre	1543,71	76378,86	4652,42
Fundaciones	24174,62	14582,36	2189,70
M2 V1 E1			
Muro 2	19075,47	38822,55	4213,99
Ventana 1	314,15	33926,83	4781,83
Techumbre	1543,71	76378,86	4652,42
Fundaciones	24174,62	14582,36	2189,70
M3 V1 E1			
Muro 3	2614,08	9664,39	1048,69
Ventana 1	314,15	33926,83	4781,83
Techumbre	1543,71	76378,86	4652,42
Fundaciones	24174,62	14582,36	2189,70

Los resultados señalados a través de la Ilustraciones 5-19, 5-20 y 5-21 muestran la incidencia de los diferentes elementos en estudio respecto a su energía incorporada y emisiones asociadas. Por consiguiente, se puede mencionar que la estructura de techumbre en los tres casos de estudios, presenta el mayor aporte de energía incorporada. Esto se debe básicamente a que para alcanzar una transmitancia térmica de 0,27(W/m²K), se considera un mayor espesor de aislación, aumentando considerablemente la energía incorporada.

Por otra parte, las ventanas de aluminio, son los elementos que tienen menor aporte en peso en comparación a los otros elemento de estudio, tal cual como se ve reflejado en las gráficas anteriores, pero poseen una gran cantidad de energía incorporada y sus emisiones de CO₂ asociadas. Por tanto, como se mencionó anteriormente es recomendable cambiar la materialidad de las ventanas por PVC, reduciendo considerablemente el impacto ambiental asociado.

Finalmente, las fundaciones tienen una baja incidencia desde el punto de vista energético y ambiental respecto a los otros elementos de la envolvente, donde claramente se puede apreciar que la selección y especificación de los materiales de construcción influyen directamente desde el punto de vista energético y ambiental.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

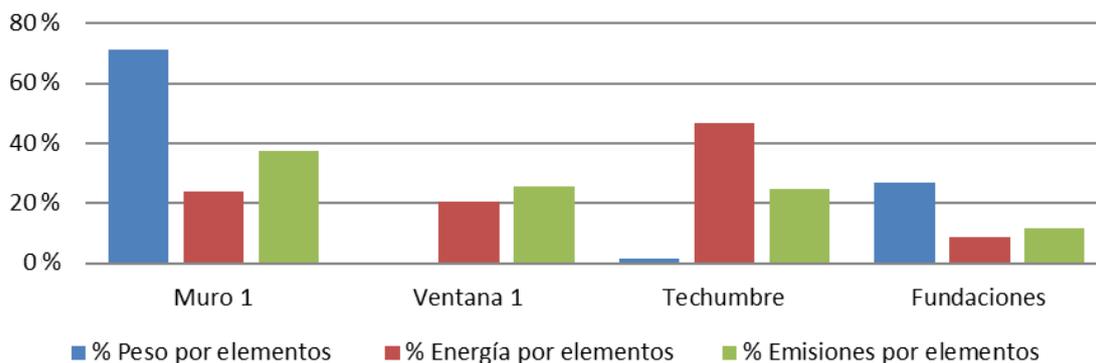


Ilustración 5-19: Participación en peso, energía y huella de carbono, correspondiente a los elementos de la envolvente y fundaciones del Estudio de Caso: M1V1E1 (elaboración propia, 2012)

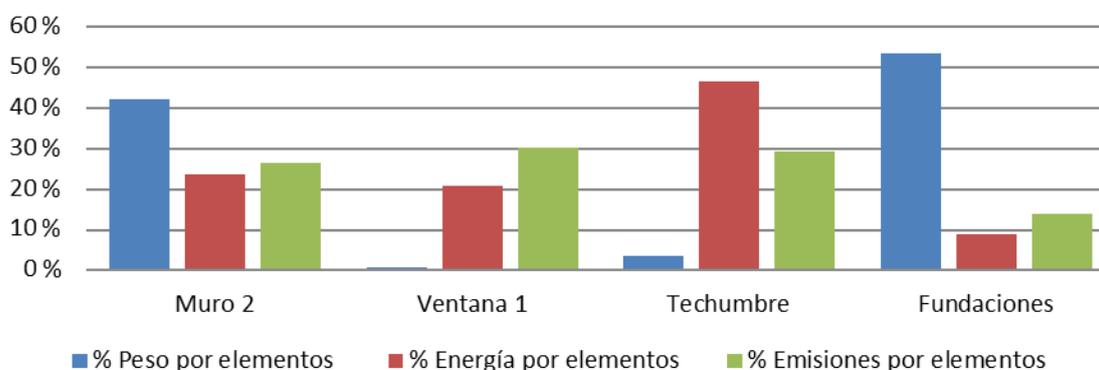


Ilustración 5-20: Participación en peso, energía y huella de carbono, correspondiente a los elementos de la envolvente y fundaciones del Estudio de Caso: M2V1E1 (Elaboración propia, 2012)

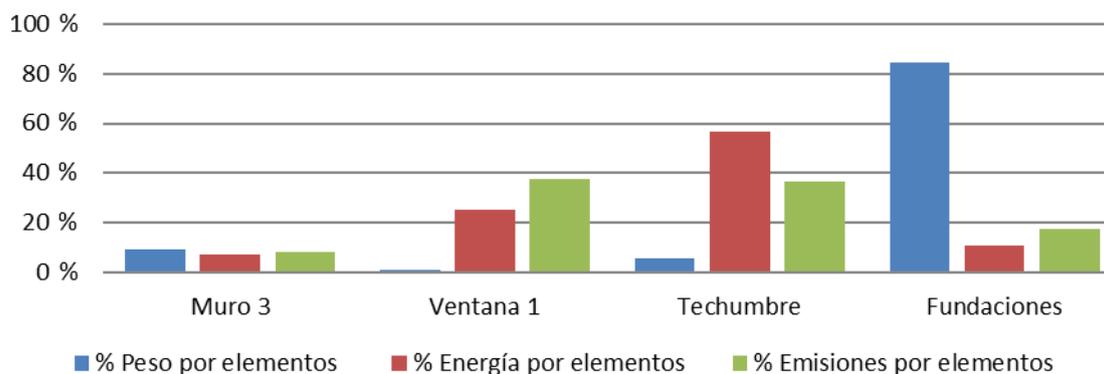


Ilustración 5-21: Participación en peso, energía y huella de carbono, correspondiente a los elementos de la envolvente y fundaciones del Estudio de Caso: M3V1E1 (elaboración propia)

En resumen, se debe mencionar que existen una gran cantidad de combinaciones de materiales de construcción, asociados a la envolvente de un edificio, las cuales permitirían reducir el costo energético y ambiental. Se debe mencionar además que solo a los elementos de la envolvente son aplicables las exigencias de la reglamentación térmica, por ende es importante conocer el ahorro energético y la mejora ambiental que se puede alcanzar en esta primera fase en estudio.

5.2.4.2 Fase de Uso

Para concluir la evaluación del ciclo de vida del caso estudio, se hace necesario incorporar los antecedentes asociados tanto a la demanda de energía para la unidad habitacional (*línea base*), como así mismo simulaciones con la variación de materialidad de la envolvente, de acuerdo a las tres soluciones propuesta en punto 5.2.2 (M1, M2 Y M2). Con la finalidad de ampliar la cobertura de los resultados obtenidos, se amplía dicha parametrización, considerando: diferentes materialidades de ventanas, orientaciones, zona climática, espesores de aislaciones, detalladas en tabla 5-2.

Tal como se había señalado anteriormente, la demanda de energía de calefacción anual se determinó a partir de la utilización del software de simulación dinámica "EDLS Tas", con un total de 96 simulaciones (48 para la ciudad de Temuco y 48 para la ciudad de Concepción). En tablas en tablas 5-10 y 5-11, se muestran los resultados obtenidos considerando la parametrización mencionada para la determinación de la demanda energética anual de calefacción, expresada en kWh/m² y su huella asociada en Kg CO₂/m² para cada estudio de caso.

Finalmente para incluir en la evaluación de ciclo de vida, la fase de uso de acuerdo a los resultados obtenidos para cada simulación, se consideró una vida útil de la vivienda (o de uso) de 40 años, según se ha justificado en punto 5.2.2. La evaluación para la fase uso, considera además tres tipos de combustibles como alternativa de calefacción (leña, gas licuado, parafina).

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-10: Resumen resultados demanda de calefacción fase de uso zona 4 (elaboración propia, 2012)

CONCEPCION					Demanda Total Anual [kW x h]/m2	Demanda Total Anual [MJ]/m2	Emisión Total Anual [KgCO2/M2]		
							Leña	Gas Licuado	Keroseno
CONCEPCION	ESTE	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 C E M1 V1 E1	45,25	162,89	70,04	37,14	42,35
				ESPESOR 2 C E M1 V1 E2	35,96	129,45	55,66	29,51	33,66
		VENTANA 2	ESPESOR 1 C E M1 V2 E1	44,71	160,94	69,21	36,69	41,85	
			ESPESOR 2 C E M1 V2 E2	35,43	127,55	54,85	29,08	33,16	
		MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 C E M2 V1 E1	46,21	166,37	71,54	37,93	43,26
				ESPESOR 2 C E M2 V1 E2	36,36	130,90	56,29	29,85	34,03
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C E M2 V2 E1	45,62	164,23	70,62	37,44	42,70
				ESPESOR 2 C E M2 V2 E2	35,77	128,78	55,38	29,36	33,48
		MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 C E M3 V1 E1	63,19	227,49	97,82	51,87	59,15
				ESPESOR 2 C E M3 V1 E2	49,10	176,75	76,00	40,30	45,96
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C E M3 V2 E1	62,48	224,93	96,72	51,28	58,48
				ESPESOR 2 C E M3 V2 E2	48,38	174,19	74,90	39,71	45,29
	NORTE	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 C N M1 V1 E1	47,51	171,05	73,55	39,00	44,47
				ESPESOR 2 C N M1 V1 E2	38,43	138,35	59,49	31,54	35,97
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C N M1 V2 E1	46,95	169,03	72,69	38,54	43,95
				ESPESOR 2 C N M1 V2 E2	37,89	136,39	58,65	31,10	35,46
		MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 C N M2 V1 E1	47,98	172,72	74,27	39,38	44,91
				ESPESOR 2 C N M2 V1 E2	38,47	138,51	59,56	31,58	36,01
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C N M2 V2 E1	47,37	170,54	73,33	38,88	44,34
				ESPESOR 2 C N M2 V2 E2	37,89	136,41	58,66	31,10	35,47
		MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 C N M3 V1 E1	64,09	230,71	99,20	52,60	59,98
				ESPESOR 2 C N M3 V1 E2	50,17	180,61	77,66	41,18	46,96
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C N M3 V2 E1	63,38	228,16	98,11	52,02	59,32
				ESPESOR 2 C N M3 V2 E2	49,46	178,06	76,56	40,60	46,29
	OESTE	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 C O M1 V1 E1	44,85	161,46	69,43	36,81	41,98
				ESPESOR 2 C O M1 V1 E2	35,96	129,45	55,66	29,51	33,66
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C O M1 V2 E1	44,30	159,49	68,58	36,36	41,47
				ESPESOR 2 C O M1 V2 E2	34,96	125,86	54,12	28,70	32,72
		MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 C O M2 V1 E1	45,58	164,10	70,56	37,41	42,67
				ESPESOR 2 C O M2 V1 E2	35,70	128,51	55,26	29,30	33,41
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C O M2 V2 E1	44,99	161,95	69,64	36,92	42,11
				ESPESOR 2 C O M2 V2 E2	35,13	126,46	54,38	28,83	32,88
		MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 C O M3 V1 E1	62,50	225,00	96,75	51,30	58,50
				ESPESOR 2 C O M3 V1 E2	48,33	173,97	74,81	39,67	45,23
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C O M3 V2 E1	61,78	222,40	95,63	50,71	57,82
				ESPESOR 2 C O M3 V2 E2	47,61	171,38	73,69	39,07	44,56
SUR	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 C S M1 V1 E1	43,23	155,63	66,92	35,48	40,46	
			ESPESOR 2 C S M1 V1 E2	33,63	121,06	52,06	27,60	31,48	
		VENTANA 2	ESPESOR 1 C S M1 V2 E1	42,69	153,68	66,08	35,04	39,96	
			ESPESOR 2 C S M1 V2 E2	33,10	119,16	51,24	27,17	30,98	
	MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 C S M2 V1 E1	44,46	160,07	68,83	36,50	41,62	
			ESPESOR 2 C S M2 V1 E2	34,29	123,46	53,09	28,15	32,10	
		VENTANA 2	ESPESOR 1 C S M2 V2 E1	43,87	157,93	67,91	36,01	41,06	
			ESPESOR 2 C S M2 V2 E2	33,72	121,40	52,20	27,68	31,56	
	MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 C S M3 V1 E1	62,31	224,32	96,46	51,15	58,32	
			ESPESOR 2 C S M3 V1 E2	48,10	173,16	74,46	39,48	45,02	
		VENTANA 2	ESPESOR 1 C S M3 V2 E1	61,59	221,71	95,34	50,55	57,65	
			ESPESOR 2 C S M3 V2 E2	47,37	170,54	73,33	38,88	44,34	

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-11: Resumen resultados demanda de calefacción fase de uso Zona 5 (elaboración propia, 2012)

TEMUCO						Demanda Total Anual [kW x h]/m2	Demanda Total Anual [MJ]/m2	Emisión Total Anual [KgCO2/M2]		
								Leña	Gas Licuado	Keroseno
	ESTE	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 T E M1 V1 E1		54,83	197,37	84,87	45,00	51,32
				ESPESOR 2 T E M1 V1 E2		43,70	157,34	67,65	35,87	40,91
		VENTANA 2	ESPESOR 1 T E M1 V2 E1		54,23	195,24	83,96	44,52	50,76	
			ESPESOR 2 T E M1 V2 E2		43,13	155,28	66,77	35,40	40,37	
		MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 T E M2 V1 E1		56,14	202,09	86,90	46,08	52,54
				ESPESOR 2 T E M2 V1 E2		44,34	159,62	68,64	36,39	41,50
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T E M2 V2 E1		55,48	199,73	85,88	45,54	51,93
				ESPESOR 2 T E M2 V2 E2		43,71	157,36	67,66	35,88	40,91
		MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 T E M3 V1 E1		76,45	275,21	118,34	62,75	71,56
				ESPESOR 2 T E M3 V1 E2		59,57	214,44	92,21	48,89	55,76
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T E M3 V2 E1		75,63	272,26	117,07	62,07	70,79
				ESPESOR 2 T E M3 V2 E2		58,75	211,49	90,94	48,22	54,99
	NORTE	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 T N M1 V1 E1		57,72	207,80	89,35	47,38	54,03
				ESPESOR 2 T N M1 V1 E2		46,85	168,67	72,53	38,46	43,85
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T N M1 V2 E1		57,10	205,55	88,39	46,87	53,44
				ESPESOR 2 T N M1 V2 E2		46,24	166,47	71,58	37,95	43,28
		MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 T N M2 V1 E1		58,37	210,12	90,35	47,91	54,63
				ESPESOR 2 T N M2 V1 E2		46,99	169,16	72,74	38,57	43,98
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T N M2 V2 E1		57,69	207,69	89,31	47,35	54,00
				ESPESOR 2 T N M2 V2 E2		46,33	166,80	71,72	38,03	43,37
		MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 T N M3 V1 E1		77,52	279,09	120,01	63,63	72,56
				ESPESOR 2 T N M3 V1 E2		60,85	219,07	94,20	49,95	56,96
			VENTANA 2	ESPESOR 1 C N M3 V2 E1		76,71	276,15	118,75	62,96	71,80
				ESPESOR 2 T N M3 V2 E2		60,04	216,13	92,94	49,28	56,20
	OESTE	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 T O M1 V1 E1		54,62	196,62	84,55	44,83	51,12
				ESPESOR 2 T O M1 V1 E2		43,35	156,06	67,10	35,58	40,57
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T O M1 V2 E1		54,01	194,44	83,61	44,33	50,55
				ESPESOR 2 T O M1 V2 E2		42,76	153,95	66,20	35,10	40,03
		MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 T O M2 V1 E1		55,67	200,41	86,18	45,69	52,11
				ESPESOR 2 T O M2 V1 E2		43,75	157,49	67,72	35,91	40,95
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T O M2 V2 E1		55,00	198,01	85,14	45,15	51,48
				ESPESOR 2 T O M2 V2 E2		43,11	155,20	66,73	35,39	40,35
		MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 T O M3 V1 E1		75,78	272,80	117,30	62,20	70,93
				ESPESOR 2 T O M3 V1 E2		58,81	211,72	91,04	48,27	55,05
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T O M3 V2 E1		74,94	269,80	116,01	61,51	70,15
				ESPESOR 2 T O M3 V2 E2		57,98	208,72	89,75	47,59	54,27
	SUR	MURO 1	VENTANA 1	ESPESOR 1 T S M1 V1 E1		52,35	188,48	81,04	42,97	49,00
				ESPESOR 2 T S M1 V1 E2		40,85	147,04	63,23	33,53	38,23
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T S M1 V2 E1		51,78	186,40	80,15	42,50	48,46
				ESPESOR 2 T S M1 V2 E2		40,28	145,02	62,36	33,06	37,70
		MURO 2	VENTANA 1	ESPESOR 1 T S M2 V1 E1		53,97	194,28	83,54	44,30	50,51
				ESPESOR 2 T S M2 V1 E2		41,77	150,39	64,67	34,29	39,10
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T S M2 V2 E1		53,32	191,94	82,54	43,76	49,91
				ESPESOR 2 T S M2 V2 E2		41,15	148,13	63,70	33,77	38,51
		MURO 3	VENTANA 1	ESPESOR 1 T S M3 V1 E1		75,36	271,29	116,65	61,85	70,53
				ESPESOR 2 T S M3 V1 E2		58,35	210,06	90,33	47,89	54,62
			VENTANA 2	ESPESOR 1 T S M3 V2 E1		74,52	268,27	115,35	61,16	69,75
				ESPESOR 2 T S M3 V2 E2		57,51	207,03	89,02	47,20	53,83

5.2.4.3 Interpretación de Resultados

Los objetivos de esta investigación no buscan profundizar en los criterios de estrategias para el diseño de envolventes térmicas, pero dada la alta influencia del diseño de estos elementos en el acondicionamiento térmico de una solución habitacional y las determinantes relaciones existentes entre la energía contenida de los materiales de construcción que la componen y las emisiones de CO₂ durante todo el ciclo de vida, se hace necesario reflexionar sobre algunas de las variables consideradas en los criterios de diseños y la incidencia para los aspectos ambientales estudiados:

-Variación de la demanda de energía de calefacción respecto a la zona climática.

Para la aplicación de la reglamentación térmica (R.T) en las distintas localidades del país, el territorio nacional se ha dividido en siete zonas térmicas (Bustamante, 2009). La zonificación climática definida en la NCh 1079 Of 2008 se basa en las características del clima; temperatura, humedad, continentalidad, etc. (Trebilcock y Díaz, 2012).

Para la evaluación de la variable “zona climática”, se compararon 48 casos de estudio, para la zona térmica 4 correspondiente a la ciudad de Concepción y 48 casos para la zona térmica 5 correspondiente a la ciudad de Temuco, cuyos resultados se muestran en tabla 5-10 y 5-11.

El criterio para la selección de las zona climáticas se relaciona con las consideraciones para el diseño de la “vivienda línea base”, la cual fue estudiada para la zona térmica 5. La cual según la NCh 1079 Of.2008, corresponde a ciudad de Temuco. Entregando como resultado una demanda energética de 49,7 kWh/m² año, un resultado con un alto estándar de eficiencia energética, considerado que el valor se encuentra muy por debajo del estándar mínimo exigible (60 kWh/m² año), según lo señalado en tabla 5-1.

De este modo y con la finalidad de mostrar el efecto en la demanda total anual de energía de calefacción al modificar la zona climática, se toma un ejemplo de los 96 resultados. En ilustración 5-22 muestra un análisis comparativo, considerado zona térmica 5 (Concepción) para solución de muro M1(Hormigón Armado), solución de ventanas V1(Aluminio) y espesor e1 (20mm) denominado C FD M1 V1 E1 v/s *caso de estudio, zona térmica 4* (Temuco) para solución de muro M1(Hormigón Armado), solución de ventanas V1(Aluminio) y espesor e1 (20mm) denominado M1 -CE M1 V1 E1 denominado T FD M1 V1 E1.

Las evidentes diferencias en la demanda energética de calefacción, se originan principalmente porque se está trabajando con zonas climáticas diferentes, lo que implica

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

diferentes condiciones ambientales como: la temperatura, velocidad de viento, humedad, radiación solar, precipitaciones y otras que definen el clima de cada territorio.

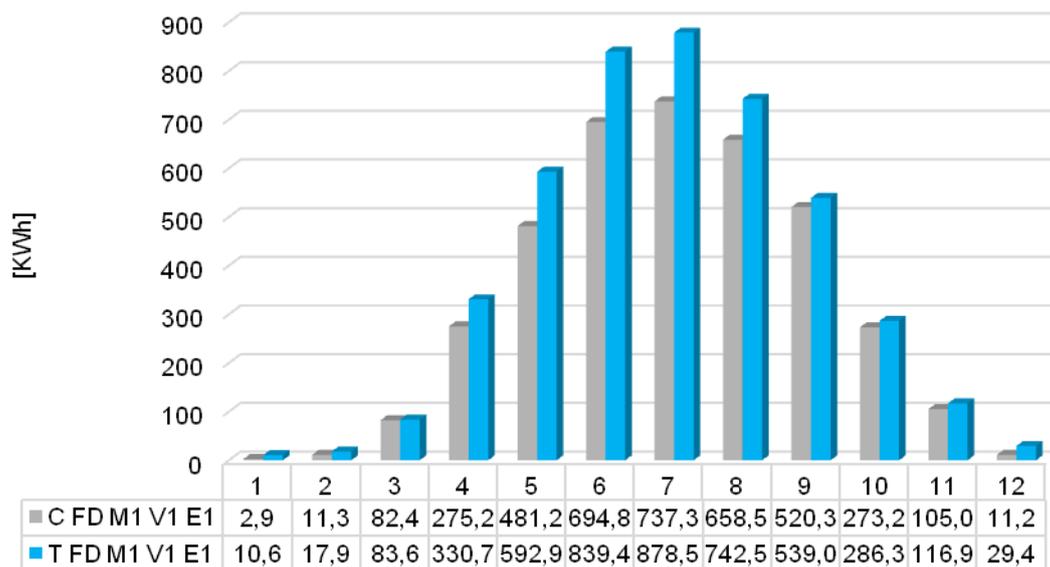


Ilustración 5-22: Demanda anual calefacción Caso Estudio C F D M1 V1 E1 v/s T F D M1 V1 E1 (Elaboración propia, 2012)

El análisis para cada caso, muestra que la demanda de energía de calefacción, aumentó en el orden de un 16% en Temuco, en relación a Concepción. Variación elevada, considerando que todos los elementos constructivos de la envolvente cumplen con las exigencias de transmitancia térmica, en ambas zonas térmicas. De este modo, puede indicarse que la demanda de energía de calefacción, aumenta hacia el sur del país, en cambio hacia el norte la demanda va disminuyendo. Así y de acuerdo a los resultados obtenidos, se advierte, que se debiera establecerse un límite máximo en demanda de energía de calefacción anual por cada zona térmica, permitiendo controlar aún más la demanda de energía, logrando disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.

Además debe mencionarse que, para el caso del norte del país, habría que evaluar una nueva variable, la cual no fue considerada en esta investigación, referida específicamente a la demanda de energía por concepto de refrigeración, variable la cual sin duda es relevante y debe ser considerada en otros estudios de ECV en edificios (Alías and Jacobo, 2004; Zabalza, 2009; Alonso, 2010).

-Orientación.

La orientación de los edificios es determinante en gran parte de la demanda energética de calefacción y de refrigeración del mismo. Una buena orientación podría minimizar en forma importante las demandas energéticas a través del control de las ganancias solares (Trebilcock y Díaz, 2012). De este modo y con la finalidad de evaluar esta variable en los resultados vinculados tanto a la demanda energética como a su efecto en las emisiones de GEI, la vivienda caso estudio se somete a una simulación modificando las orientaciones de las respectivas fachadas de esta, de acuerdo a lo establecido en tabla 5.2 Para el caso estudio (línea base), la vivienda se consideró orientada con el acceso hacia el oeste (fachada B), tal como se ilustra en la ilustración 5-23, como suele ocurrir en loteos donde una misma vivienda se repite con distintas orientaciones.

Se consideraron 4 orientaciones; Norte (0°), Este (90°), Sur (180°) y Oeste (270°), para el total de casos de estudio. De este modo y de acuerdo a los resultados mostrados en tabla 5-11, la simulación más favorable al rotar las respectivas fachadas de la vivienda corresponde a la fachada A (180°) mayor superficie de vanos, seguida por la orientación Este-Oeste (90° - 270°). Finalmente la orientación más desfavorable correspondió a la del C (0°) (fachada C).

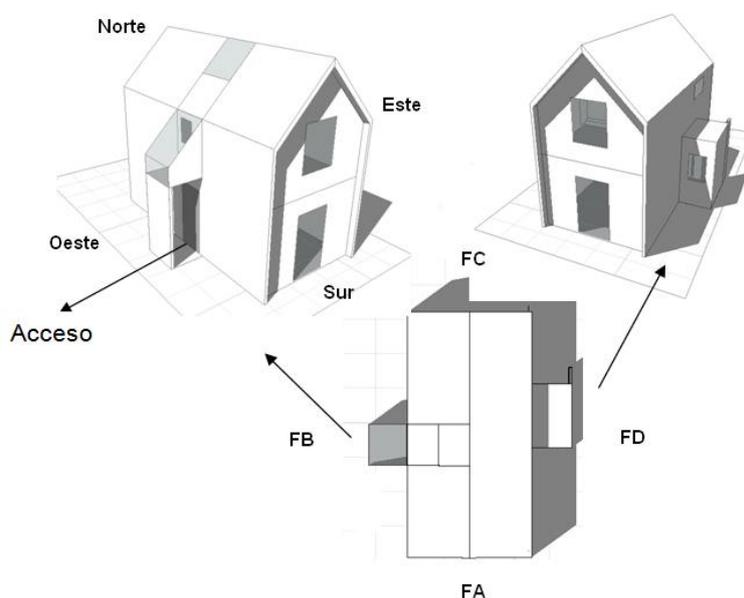


Ilustración 5-23: Orientación Vivienda Caso Estudio (elaboración Propia, 2012)

Podría señalarse entonces que de acuerdo a los resultados obtenidos, la orientación es otra de las variables que puede ser determinante desde el punto de vista energético, de acuerdo a las diferentes estrategias de diseño. De este modo a la luz de los resultados, la demanda de energía de calefacción se logró disminuir entre un 5% a un 12% para la

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

orientación norte respecto a la del sur. La variación de demanda de energía que existió en la orientación del norte respecto al sur, se produjo al diseñarse ventanas de mayor dimensión en la fachada A, lo cual permitió una mayor captación de energía del sol hacia el interior.

Para la solución de envolvente M3 (madera), el cambio de orientación (norte - sur) produjo una variación sólo de un 5% en la demanda de energía. En cambio para la solución de envolvente M1 (hormigón) existió una mayor diferencia de demanda energética (12%) considerando el mismo cambio de orientación. En otras palabras, la materialidad de la envolvente tiene una alta incidencia en la demanda de calefacción, variable que será analizada en el siguiente punto.

-Demanda de energía de calefacción asociada a las diferentes soluciones de muros de la envolvente (materialidades) térmica de la vivienda

La masa térmica es una propiedad de los materiales y dice relación con la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que lo cede o absorbe del entorno. Depende del calor específico y de la conductividad de los materiales. Esta propiedad es utilizada para hacer más estable la temperatura dentro de los edificios y en particular cuando existe una oscilación térmica considerable en el exterior (Trebilcock y Díaz, 2012).

De acuerdo a lo establecido en la metodología, se compararon tres tipos de soluciones de muro para la envolvente térmica (M1, M2 y M3) con diferentes materialidades e igual transmitancia térmica para todos los casos, cuyos resultados se muestran en tablas 5-10 y 5-11.

A priori puede señalarse que al comparar las tres soluciones constructivas de muro bajo los mismos parámetros de estudio, se observaron importantes variaciones en la demanda de energía, lo que a modo de ejemplo se resume en tabla 5-12, dejando de manifiesto que existe una tendencia similar con el resto de los resultados, según muestran los resultado expuestos en tablas 5-10 y 5-11.

Tabla 5-12: Comparación demanda total energía anual para diferentes materialidades (envolvente, elaboración propia, 2012)

Solución Constructiva Caso I	Demanda total energía (kWh/m2 año)	Solución Constructiva Caso II	Demanda total energía (kWh/m2 año)
C FC M1 V1 E1	47,51	C FA M1 V1 E1	43,23
C FC M2 V1 E1	47,98	C FA M2 V1 E1	44,46
C FC M3 V1 E1	64,09	C FA M3 V1 E1	62,31

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Los casos analizados, consideran la misma zona climática 5 - Concepción, el primer caso considera la orientación sur y orientación segundo orientación norte (FC y FA respectivamente según Ilustración 5-14). De este modo se busca hacer una comparación modificando la variable de materialidades para las diferentes soluciones constructivas de la envolvente térmica (M1, M2 y M3).

A partir de los resultados mostrados en tabla 5-12, se observa que las soluciones de muro al tener la misma transmitancia térmica, presentan diferentes valores de demanda de energía de calefacción. Por consiguiente, esta variación se debe fundamentalmente a que cada solución constructiva analizada, tiene diferente *masa térmica* produciéndose una disminución considerable en las demandas de calefacción, en la medida que aumente la densidad del muro. De este modo, puede indicarse, que el elemento con mayor *masa térmica* corresponde a la solución M1: *Hormigón Armado con 22,2 [cm] de espesor*, de ahí que la demanda disminuyo entre un 26% y un 31% respecto a la solución M3 de madera con 10,4 cm de espesor. La variación de los porcentajes, se debe a las diferentes orientaciones de los casos de estudio, el resto de los resultados siguieron una tendencia similar.

En resumen, la solución M1 (hormigón), ofrece una solución muy efectiva en cuanto a la eficiencia energética, con las consideraciones realizadas para este estudio. Este resultado se asocia a las propiedades de la masa térmica de los materiales. En este caso una elevada masa térmica del hormigón, conduce a una estabilidad térmica.

- Materialidad Ventanas:

De acuerdo al análisis de los resultados, referido a la materialidad de las ventanas desde el punto de vista de la demanda energética, no es influyente (ver tablas 5-10 y 5-11). Al comparar las ventanas de material PVC respecto a las ventanas con material de Aluminio, existió una variación de demanda energía de calefacción de 1,3% promedio del total de casos en estudio, mayor para la materialidad Aluminio. Esta variación se debe fundamentalmente, por la densidad y transmitancia térmica de cada material.

Los valores de infiltración de las ventanas se consideraron constantes debido a que incorporar la infiltración como parámetro a evaluar pudiera aumentar considerablemente la demanda de calefacción, de acuerdo a estudios del Centro de Investigación CITEC-UBB, ampliando los alcances de esta investigación, tiene que ser abordado en estudios complementarios.

Finalmente, se debe mencionar que de acuerdo a los resultados, y tal como se analizó en la fase de extracción y fabricación de materiales de construcción, desde el punto de vista

ambiental y demanda energética, es más recomendable utilizar las ventanas de materialidad PVC. Esto dado, por su baja energía incorporada y menor generación de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación al Aluminio con enfoque ACV.

- Espesor aislación:

Importantes autores destacan la importancia del aislamiento térmico para conseguir una reducción de las emisiones de CO₂, en los edificios (Ziegler and Bättig., 2009; Egenhofer C., et al, 2006). Las pérdidas de calor a través de la envolvente de los edificios conllevan más de las dos terceras partes de las pérdidas totales de los edificios (Ibañez et al., 2005). El aumentar el espesor aislante utilizado en cada envolvente de los edificios, disminuye la demanda energética y, por tanto, el consumo de climatización (Zabalza, 2010).

El objetivo principal de esta investigación no busca profundizar en cada una de las variables hasta aquí señaladas, sino más bien realizar la valoración de ellas con respecto a su efecto en la energía contenida y emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del caso estudio. No obstante, dada la relevancia que la aislación tiene en la mejora de la eficiencia energética se complementa la información hasta aquí desarrollada, la cual tendrá una alta injerencia en los resultados de esta tesis.

De acuerdo a estudios del (Ciemat, 2012), sobre el potencial de ahorro en energía y reducción de emisiones de CO₂ en viviendas mediante incremento de aislaciones, un “espesor matemáticamente óptimo” es aquel en el cual los beneficios económicos son los máximos. Sin embargo, con más aislamiento los ahorros de energía siguen incrementándose, aunque los beneficios económicos comienzan a disminuir. Desde el punto de vista de ahorro energético y de emisiones de CO₂, el aislamiento ideal teórico sería aquel en que se produzcan los máximos ahorros sin ningún costo económico, lo cual queda muy bien representado en ilustración 5-24.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

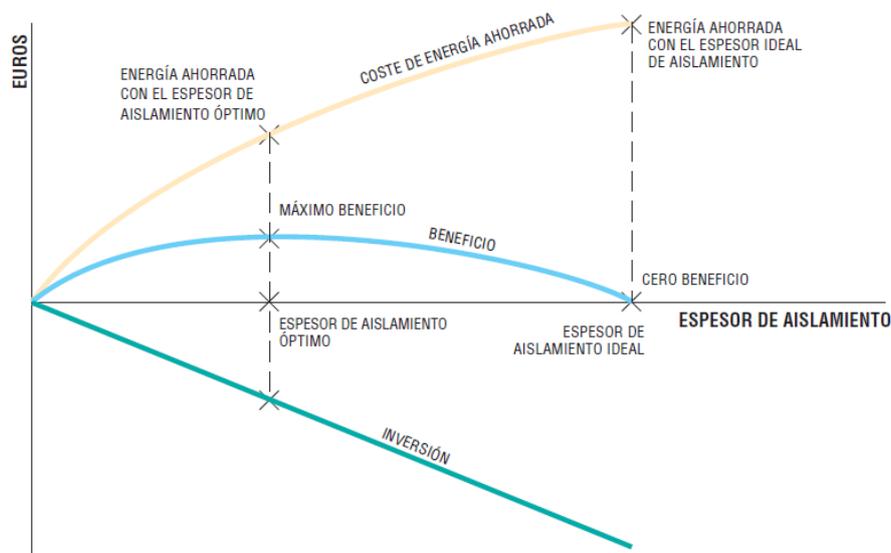


Ilustración 5-24: Ideal y óptimo espesor de aislamiento (Ciemat, 2012)

De la ilustración se desprende la relevancia establecer los límites de aumento de espesores de aislación, en términos que existe un punto de *espesor de aislamiento óptimo* donde se obtiene un máximo beneficio (en término de reducción de ahorro energético y por ende menor generación de emisiones de CO₂), no obstante si se sigue incrementando dicho espesor llega un punto de *espesor de aislamiento ideal* (curva que corta el eje de la abscisas) desde donde de ahí en adelante se eliminan los beneficios entre el equilibrio de inversión económica y ahorro energético.

Nótese que este análisis no considera enfoque de ciclo de vida, ya que cuando se habla de reducción de emisiones de CO₂, se plantea pensando en la fase de uso del edificio y no en la energía incorporada en las emisiones asociadas al material que compone dicha solución de aislación. Dato no menor si se considera que por ejemplo para el caso del aislante en base a poliestireno expandido, el costo energético en energía incorporada es elevadísimo del orden de 117 MJ/kg con emisiones de CO₂ aprox. de 17,3 kg CO₂/kg (BEDEC, 2011), un valor importante por ejemplo si se compara con otro material con importante participación en peso en la solución envolvente M3, por ejemplo el yeso cartón con una energía contenida del orden de 6,75 MJ/kg y emisiones de CO₂ del orden de 0,38 kg CO₂/kg (BEDEC, 2011).

En Ilustración 5-25 se muestra para la solución constructiva envolvente térmica “línea base”, la relación existente entre la energía incorporada de los materiales que la componen y las emisiones de CO₂ respectivas. Desde el punto de vista de la energía incorporada, claramente las materialidades que forman parte de la aislación son las más

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

contributivas; fibrobítemen en primer lugar, seguido por el poliestireno expandido material (considerado con espesor de 70 mm).

Con respecto a las emisiones de CO₂, la tributación no sigue la misma tendencia, ya que el material que mayor tributa al respecto es precisamente el aislante poliestireno expandido seguido por las placas de OSB. Por lo que no se podría afirmar que un material con alta energía incorporada necesariamente tenga elevadas emisiones de CO₂.

Dada la alta importancia de la aislación (específicamente poliestireno expandido) en para las soluciones de envolventes térmicas muros analizadas (línea base, M1, M2 y M3), tanto del punto de vista de la demanda energética como en la aportación en energía contenida y emisiones de CO₂, se analiza la implicancia de aumentar el espesor y evaluar las variables anteriormente señaladas.

De este modo, se consideró aumentar en 20 mm el espesor de aislación poliestireno expandido para cada solución de envolvente estudiada. A partir de los resultados expresados en tablas 5-10 y 5-11, se observa que la demanda de calefacción se reduce considerablemente en un 30% aproximadamente para el total de los casos de estudio, reduciendo por este efecto las emisiones de CO₂ para *la fase de uso u operación*, siendo esta variable la que tiene mayor incidencia respecto al resto de los materiales utilizados en la envolvente térmica de edificios. No obstante y tal como se había anticipado anteriormente, con un enfoque de ciclo de vida, al aumentar el espesor de la aislación se aumentaría considerablemente la energía incorporada y su huella de carbono respectiva. Tema que se seguirá complementado y concluyendo a partir de los resultados de la evaluación del ciclo de vida completo del caso estudio.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

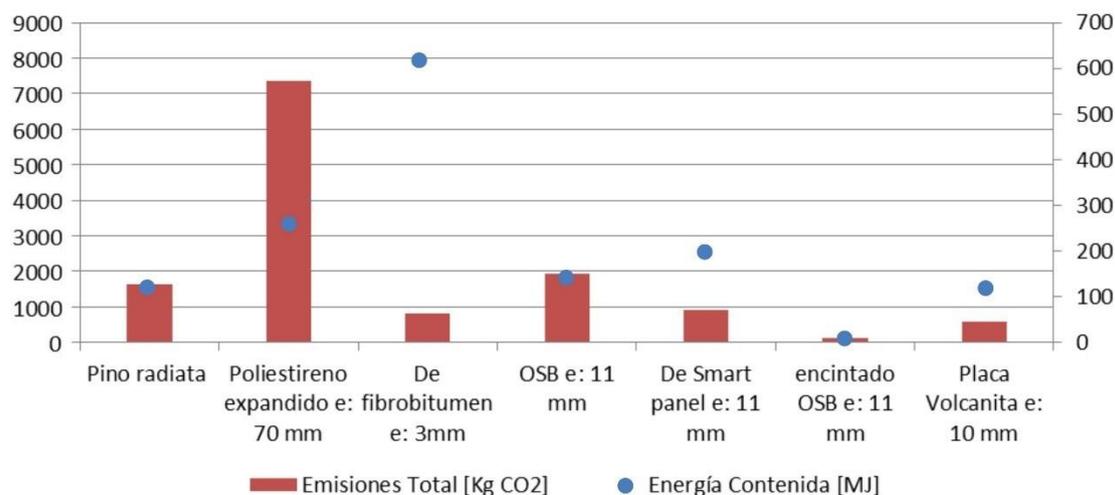


Ilustración 5-25: Relación energía contenida v/s emisiones de CO₂ - envolvente línea base (elaboración propia, 2012)

Otro análisis relevante es la relación entre la energía contenida y las emisiones de CO₂, comparando las tres soluciones de envolvente térmica evaluadas (M1, M2 y M3) con la solución línea base (LB), lo cual es representado en ilustración 5-26.

A partir de este análisis gráfico se desprende que desde el punto de vista de la energía contenida, la solución de envolvente M1 (Hormigón armado) es la que alcanza mayor valor por m² seguida de la solución M2 (albañilería de ladrillo) y solución M3 (Madera). Con respecto la solución M3 comparada con la línea base (igualmente envolvente madera) se observa una diferencia menor en la energía contenida, generada principalmente por el menor espesor de poliestireno expandido como material aislante. Con respecto a las emisiones de CO₂ la tendencia es similar para todos los casos, los valores en orden decreciente son solución M1, solución M2, solución M3 y finalmente línea base, cuyos valores además se detallan en tabla 5-13.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

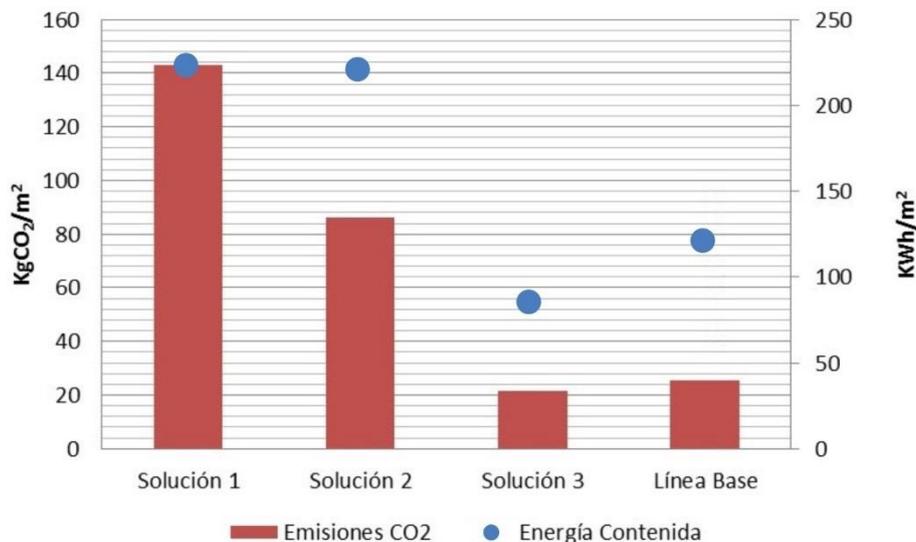


Ilustración 5-26: Energía contenida v/s Emisiones CO₂ - soluciones envolvente térmica (elaboración propia, 2012)

Tabla 5-13: Relación Energía contenida v/s Emisiones CO₂ - soluciones envolvente térmica (elaboración propia, 2012)

	Energía KWh/m2	Emisiones KgCO ₂ /m2
Solución M1	221,1	143,2
Solución M2	220,1	85,9
Solución m3	74,9	21,4
Línea Base	117,8	25,7

- Emisión de CO₂ total anual:

La emisión total de CO₂ anual correspondiente a la huella de carbono de la fase de operación, depende directamente de la demanda de energía de calefacción, por tanto al disminuir la demanda de calefacción se lograría disminuir en la misma proporción las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para el cálculo de emisiones de CO₂ totales anuales se consideró el consumo anual de energía por concepto de calefacción, asociada al tipo de combustibles utilizados en dicha etapa, de acuerdo a lo planteado por (Fissore and Colonelli, 2009), quienes señalan que las emisiones varían respecto al tipo de combustible necesario para abastecer el consumo domiciliario.

Como una manera de visualizar el efecto de la concomitancia de las variables consideradas, tanto para la determinación de la demanda energética como para las emisiones de CO₂, se entrega un completo análisis gráfico para el caso estudio,

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

vinculando; zonas térmicas, orientaciones, espesores de aislación y tipos de combustibles (leña, gas licuado, keroseno y electricidad), cuyos detalles de resultados de cálculos se encuentran en tabla 5-10 y 5-11.

En ilustraciones 5-27 y 5-28 se muestra un análisis comparativo para las zonas climáticas 4 (Concepción) y 5 (Temuco), respectivamente. Para tal efecto se consideran las soluciones de muros M1, M2 Y M3 (hormigón, albañilería y madera respectivamente), ventanas de PVC y los dos tipos de espesores simulados.

Analizando la implicancia de los espesores de la aislación térmica, el análisis gráfico muestra que para un total de 12 casos simulados con espesor 1 (20mm) sólo 8 cumplen el estándar mínimo exigible asociado a la demanda energética 60 KWh/m² (según tabla 5-2). Los 4 casos que no cumplen con el estándar mínimo exigible, corresponden a la solución M3 de madera la cual a su vez fue simulada para las cuatro orientaciones de la vivienda, siendo la orientación norte la más favorable.

El principal factor del incumplimiento de la demanda energética para este tipo de solución constructiva, obedece a la influencia del bajo espesor de la aislación térmica (10 mm, Aislapol densidad de 15 Kg/m³). Esto queda demostrado, ya que al aumentar en 20 mm el espesor de la aislación térmica, se reduce la demanda energética del orden del 21%. De este modo de los 12 casos simulados con aumento de espesor, todos cumplen con el estándar energético exigible de 60 KWh, lo que significa que hay una mejora significativa en la reducción de consumo energético y por ende una disminución de las emisiones de CO₂, las cuales fueron calculadas para el mejor desempeño energético, es decir espesor dos.

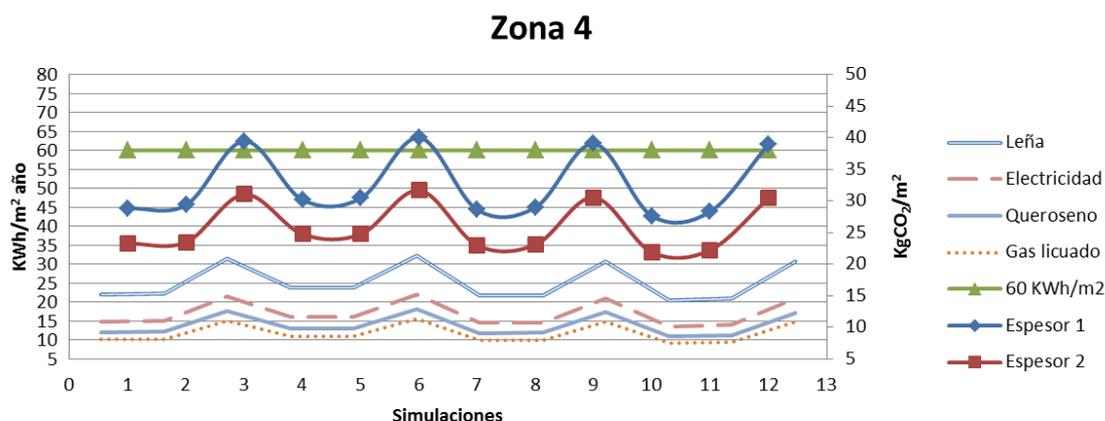


Ilustración 5-27: Demanda energética v/s emisiones CO₂ - Zona 4 (Elaboración propia, 2012)

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

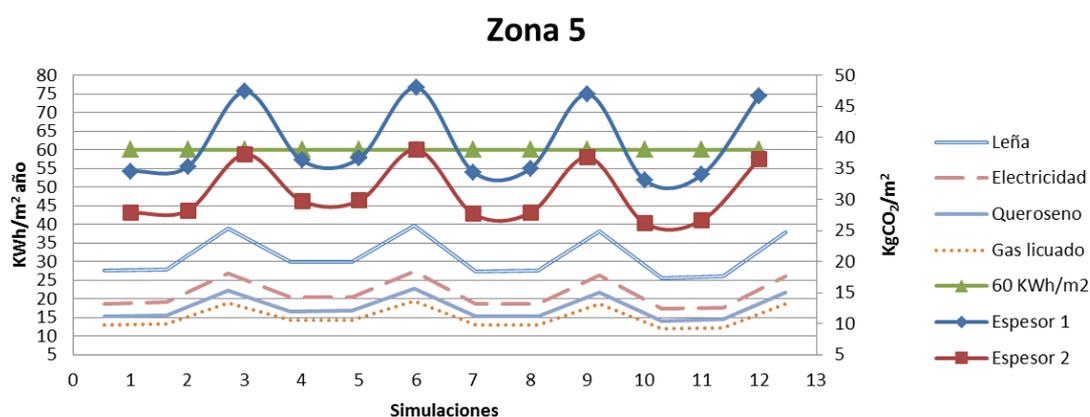


Ilustración 5-28: Demanda energética v/s emisiones CO₂ - Zona 5 (Elaboración propia, 2012)

Desde el punto de vista de la emisión total anual de CO₂, a partir del análisis gráfico se comprueba que el tipo de combustible utilizado en calefacción es gravitante en la totalización de emisiones. Se muestra que al considerar diferentes tipos de combustibles para el consumo energético (leña, electricidad, gas licuado y keroseno), la menor emisión está dada por el uso del combustible gas licuado con 9,1 KgCO₂/m² como promedio para los 12 casos simulados para estos parámetros, en contraposición con la leña la cual en promedio arroja una como promedio una emisión de 17,1 KgCO₂/m².

El mismo análisis realizado para zona 5, muestra que desde el punto de vista de la demanda energética los valores en términos de orden de magnitud son mayores, tal como puede verse en tabla 5-12, y es de esperar ya la que zona climática 5 corresponde a una zona con diferentes características climáticas y condiciones ambientales más exigentes.

No obstante la tendencia del comportamiento de los resultados es muy similar a lo sucedido para la zona climática 4. De hecho para un total de doce casos evaluados considerando espesor 1, al igual que en zona climática 5, cuatro resultados quedaron bajo el desempeño exigido (60 kWh/m² año) y al aumentar el espesor en 20 mm (espesor dos), todos cumplen.

Con respecto a las emisiones de CO₂ y como es lógico de esperar, los resultados para la zona climática 5, en término de orden de magnitud se ven aumentadas ya que las exigencias de la demanda energética son mayores. Con respecto a las emisiones asociadas a los combustibles para la zona climática cinco (ciudad de Temuco), el tema es singularmente sensible ya que actualmente los niveles de contaminación por emisión de material particulado son severos, especialmente el MP_{2,5} (2,5µ) donde la combustión de leña es uno de los principales responsables en su generación (MMA, 2013). De este modo y más allá de los objetivos de esta investigación, la cual centra su atención en las emisiones de CO₂ como GEI. Desde el punto de la calidad del aire y salud de las personas,

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

se hace doblemente necesario evaluar otras alternativas de combustible teniendo en cuenta este tipo de impacto.

En ilustración 5-28, para zona climática cinco, para la evaluación de la emisiones de CO₂ se consideran cuatro combustibles, donde a partir de los resultados (mostrados en tabla 5-15), se muestra la leña con combustible con mayores emisiones de CO₂ lo que sumado a las condiciones anteriormente mencionadas, lo convierten en la alternativa menos recomendada. El mejor resultado obtenido se asocia al combustible de gas licuado, permitiendo disminuir alrededor de un 52% las emisiones generadas por dicho combustible en comparación a la utilización de la leña como medio de calefacción.

Antes de concluir sobre los resultados obtenidos, es importante recordar que a través de este estudio de caso, se busca principalmente medir los efectos de la energía contenida y emisiones de CO₂ para las distintas soluciones de muros de envolvente térmica con un *enfoque de ciclo de vida*. De este modo al considerar la vida útil y todas las etapas de ciclo de vida valoradas, eventualmente pudiera modificar o confirmar los resultados y conclusiones hasta aquí señaladas. De esta manera, de acuerdo a los alcances y consideraciones establecidas en punto 5.2.2 se muestra un resumen de los resultados de la ECV completo para este caso estudio.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-14: Demanda total anual v/s emisión total anual Zona - 4 (elaboración propia, 2012)

Demanda Total Anual kWh/m2 año				Desempeño Exigido	Emisión Total Anual [KgCO ₂ /M2]			
					Leña	Gas Licuado	Queroseno	Electricidad
Espesor 1		Espesor 2		Espesor 2 Ventana 2				
C FD M1 V2 E1	44,7	C FD M1 V2 E2	35,4	60,0	15,2	8,1	9,2	10,9
C FD M2 V2 E1	45,6	C FD M2 V2 E2	35,8	60,0	15,4	8,2	9,3	11,0
C FD M3 V2 E1	62,5	C FD M3 V2 E2	48,4	60,0	20,8	11,0	12,6	14,9
C FC M1 V2 E1	47,0	C FC M1 V2 E2	37,9	60,0	16,3	8,6	9,9	11,6
C FC M2 V2 E1	47,4	C FC M2 V2 E2	37,9	60,0	16,3	8,6	9,9	11,6
C FC M3 V2 E1	63,4	C FC M3 V2 E2	49,5	60,0	21,3	11,3	12,9	15,2
C FB M1 V2 E1	44,3	C FB M1 V2 E2	35,0	60,0	15,0	8,0	9,1	10,7
C FB M2 V2 E1	45,0	C FB M2 V2 E2	35,1	60,0	15,1	8,0	9,1	10,8
C FB M3 V2 E1	61,8	C FB M3 V2 E2	47,6	60,0	20,5	10,9	12,4	14,6
C FA M1 V2 E1	42,7	C FA M1 V2 E2	33,1	60,0	14,2	7,5	8,6	10,2
C FA M2 V2 E1	43,9	C FA M2 V2 E2	33,7	60,0	14,5	7,7	8,8	10,4
C FA M3 V2 E1	61,6	C FA M3 V2 E2	47,4	60,0	20,4	10,8	12,3	14,5

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-15: Demanda total anual v/s emisión total anual – Zona 5 (elaboración propia, 2012)

Demanda Total Anual kWh/m2 año				Desempeño Exigido	Emisión Total Anual [KgCO ₂ /M2]			
					Leña	Gas Licuado	Queroseno	Electricidad
Espesor 1		Espesor 2			Espesor 2 Ventana 2			
T FD M1 V2 E1	54,2	T FD M1 V2 E2	43,1	60,0	18,5	9,8	11,2	13,2
T FD M2 V2 E1	55,5	T FD M2 V2 E2	43,7	60,0	18,8	10,0	11,4	13,4
T FD M3 V2 E1	75,6	T FD M3 V2 E2	58,7	60,0	25,3	13,4	15,3	18,0
T FC M1 V2 E1	57,1	T N M1 V2 E2	46,2	60,0	19,9	10,5	12,0	14,2
T FC M2 V2 E1	57,7	T N M2 V2 E2	46,3	60,0	19,9	10,6	12,0	14,2
T FC M3 V2 E1	76,7	T N M3 V2 E2	60,0	60,0	25,8	13,7	15,6	18,4
T FB M1 V2 E1	54,0	T FB M1 V2 E2	42,8	60,0	18,4	9,8	11,1	13,1
T FB M2 V2 E1	55,0	T FB M2 V2 E2	43,1	60,0	18,5	9,8	11,2	13,2
T FB M3 V2 E1	74,9	T FB M3 V2 E2	58,0	60,0	24,9	13,2	15,1	17,8
T FA M1 V2 E1	51,8	T FA M1 V2 E2	40,3	60,0	17,3	9,2	10,5	12,4
T FA M2 V2 E1	53,3	T FA M2 V2 E2	41,1	60,0	17,7	9,4	10,7	12,6
T FA M3 V2 E1	74,5	T FA M3 V2 E2	57,5	60,0	24,7	13,1	15,0	17,7

5.2.4.4 Resumen general de la Evaluación del ciclo vida del Estudio Caso

Con el fin de valorar el efecto de la energía incorporada en el ciclo de vida de la vivienda caso estudio, considerando todos los derivados del acondicionamiento térmico aquí mencionados y su implicancia en las emisiones de CO₂. Se muestran las principales resultados (ver tabla 5-16) y análisis gráfico del ACV realizado con dicho fin.

Dichos resultados han sido analizados y comparados con un enfoque de ciclo de vida, considerando una vida útil de 40 años (alcances del estudio, punto 5.2.2), lo que permitió

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

conocer la participación de la energía incorporada en los materiales y la demanda de calefacción desde el punto de vista energético y de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para sintetizar y visualizar los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativos con respecto a la línea base. Se decidió trabajar para las tres soluciones de muros (M1, M2 y M3), con los resultados correspondientes a la zona térmica 5 (Temuco) para ello se consideraron las orientaciones más favorables y desfavorables (Norte y Sur) con la finalidad de sensibilizar el valor de la demanda energética, como así mismo se simuló considerando los dos espesores de aislación (e1 y e2) y como combustible para calefacción, el más favorable y desfavorable desde el punto de vista de la generación de emisiones de GEI, leña y gas respectivamente. En tablas 5-16, 5-17 y 5-18, se entrega el detalle de cada uno de los resultados obtenido para el ACV mencionado.

Tal como se señaló en punto 5.2.2. Los límites de la Evaluación del Ciclo de vida considera las etapas de construcción, etapa fabricación de materiales y etapa operación ó uso de la vivienda. De este modo y consolidando el trabajo desarrollado en esta tesis, todos los resultados obtenidos tanto en los inventarios de materiales como para la fase de construcción son incorporados en el resultado final del ECV.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-16: ACV Línea Base (elaboración propia, 2012)

LINEA BASE (LEÑA)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J/m ²]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación de M ateriales	1174,26	114,45	57538,64	5608,21	29,36	2,86
Construcción (1%) (*)	1,17	0,11	57,54	5,61	0,03	0,003
Operación (calefacción)	178,88	21,37	8764,92	1046,92	178,88	21,37
Total					208,26	24,23
LINEA BASE (GAS LICUADO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación de M ateriales	1174,26	114,45	57538,64	5608,21	29,36	2,86
Construcción (1%) (*)	1,17	0,11	57,54	5,61	0,03	0,00
Operación (calefacción)	178,88	11,33	8764,92	555,11	178,88	11,33
Total					208,26	14,19
LINEA BASE (QUEROSENO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación de M ateriales	1174,26	114,45	57538,64	5608,21	29,36	2,86
Construcción (0,5%) (*)	1,17	0,11	57,54	5,61	0,03	0,00
Operación (calefacción)	178,88	12,92	8764,92	633,02	178,88	12,92
Total					208,26	15,78
LINEA BASE (ELECTRICIDAD)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación de M ateriales	1174,26	114,45	57538,64	5608,21	29,36	2,86
Construcción (0,5%) (*)	1,17	0,11	57,54	5,61	0,03	0,00
Operación (calefacción)	178,88	15,25	8764,92	747,45	178,88	15,25
Total					208,26	18,12

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-17: ACV - Temuco Fachada A (Elaboración propia, 2012)

FACHADA SUR (A)						
T S M 1 V2 E1 (LEÑA)					40 años	
Etapas	Consumo energético [MJ/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [MJ]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [MJ/m ²]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1547,63	231,97	75833,94	11366,52	38,69	5,80
Construcción (1%)	1,55	0,23	75,83	11,37	0,04	0,01
Operación (calefacción)	186,40	22,26	9133,76	1090,98	186,40	22,26
Total					225,13	28,07
T S M 2 V2 E1 (LEÑA)					40 años	
Etapas	Consumo energético [MJ/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [MJ]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [MJ]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1544,10	174,77	75660,86	8563,78	38,60	4,37
Construcción (1%)	1,54	0,17	75,66	8,56	0,04	0,00
Operación (calefacción)	191,94	22,93	9405,26	1123,41	191,94	22,93
Total					230,59	27,30
T S M 3 V2 E1 (LEÑA)					40 años	
Etapas	Consumo energético [MJ/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [MJ]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [MJ]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1021,53	110,17	50054,91	5398,47	25,54	2,75
Construcción (0,5%)	1,02	0,11	50,05	5,40	0,03	0,00
Operación (calefacción)	268,27	32,04	13145,07	1570,11	268,27	32,04
Total					293,83	34,80
FACHADA SUR						
T S M 1 V2 E1 (GAS LICUADO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [MJ/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [MJ]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [MJ/m ²]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1547,63	231,97	75833,94	11366,52	38,69	5,80
Construcción (1%)	1,55	0,23	75,83	11,37	0,04	0,01
Operación (calefacción)	186,40	11,81	9133,76	578,47	186,40	11,81
Total					225,13	17,61
T S M 2 V2 E1 (GAS LICUADO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [MJ/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [MJ]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [MJ]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1544,10	174,77	75660,86	8563,78	38,60	4,37
Construcción (1%)	1,54	0,17	75,66	8,56	0,04	0,00
Operación (calefacción)	191,94	12,16	9405,26	595,67	191,94	12,16
Total					230,59	16,53
T S M 3 V2 E1 (GAS LICUADO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [MJ/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [MJ]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [MJ]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1021,53	110,17	50054,91	5398,47	25,54	2,75
Construcción (0,5%)	1,02	0,11	50,05	5,40	0,03	0,00
Operación (calefacción)	268,27	16,99	13145,07	832,52	268,27	16,99
Total					293,83	19,75

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-18: ACV - Temuco Fachada C (Elaboración propia, 2012)

FACHADA NORTE (C)						
T N M 1 V2 E1 (LEÑA)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J/m ²]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1547,63	231,97	75833,94	11366,52	38,69	5,80
Construcción (1%)	1,55	0,23	75,83	11,37	0,04	0,01
Operación (calefacción)	205,55	24,55	10072,14	1203,06	205,55	24,55
Total					244,28	30,36
T N M 2 V2 E1 (LEÑA)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1544,10	174,77	75660,86	8563,78	38,60	4,37
Construcción (1%)	1,54	0,17	75,66	8,56	0,04	0,00
Operación (calefacción)	207,69	24,81	10177,01	1215,59	207,69	24,81
Total					246,34	29,18
T N M 3 V2 E1 (LEÑA)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1021,53	110,17	50054,91	5398,47	25,54	2,75
Construcción (0,5%)	1,02	0,11	50,05	5,40	0,03	0,00
Operación (calefacción)	276,15	32,98	135314,2	1616,25	276,15	32,98
Total					301,72	35,74
FACHADA NORTE						
T N M 1 V2 E1 (GAS LICUADO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J/m ²]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1547,63	231,97	75833,94	11366,52	38,69	5,80
Construcción (1%)	1,55	0,23	75,83	11,37	0,04	0,01
Operación (calefacción)	205,55	13,02	10072,14	637,90	205,55	13,02
Total					244,28	19,82
T N M 2 V2 E1 (GAS LICUADO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1544,10	174,77	75660,86	8563,78	38,60	4,37
Construcción (1%)	1,54	0,17	75,66	8,56	0,04	0,00
Operación (calefacción)	207,69	13,15	10177,01	644,54	207,69	13,15
Total					246,34	17,53
T N M 3 V2 E1 (GAS LICUADO)					40 años	
Etapas	Consumo energético [M J/m ²]	Emisiones [KgCO ₂ /M ²]	Energía Total [M J]	Emisiones Totales [Kg CO ₂]	Consumo energético Total Vida Útil (40 años) [M J]	Emisiones de CO ₂ Total Vida Útil (40 años) [KgCO ₂ /M ²]
Extracción y Fabricación	1021,53	110,17	50054,91	5398,47	25,54	2,75
Construcción (0,5%)	1,02	0,11	50,05	5,40	0,03	0,00
Operación (calefacción)	276,15	17,49	135314,2	856,99	276,15	17,49
Total					301,72	20,25

En Ilustración 5-29 y tabla 5-19 se muestran un análisis comparativo entre el ECV de la línea base y las tres soluciones de materialidades para la envolvente térmica del caso estudio, modificando solamente la variable espesor correspondiente al aislamiento térmico (el cual se aumenta en 20 mm).

A partir del análisis gráfico se desprende:

- Para fase de fabricación de materiales, el cambio de espesor no es mayormente influyente desde el punto de vista de la energía contenida en MJ/m², se calculan diferencias del orden del 2%.
- Para la fase de construcción, el aumento de espesor no es incidente ya que el porcentaje de participación de la energía contenida es casi despreciable con respecto a las fases de fabricación de materiales y fase de uso.
- Para la fase de operación ó uso, el impacto del cambio de espesor de la aislación es gravitante en el consumo energético considerando el enfoque de ciclo de vida (vida útil de 40 años), donde para cada solución de materialidad de envolvente (M1, M2 y M3) se producen reducciones energéticas del orden de un 23%. Lo que tal como se verá posteriormente tiene una importante incidencia en las reducciones de CO₂.
- La energía incorporada total, la cual considera las tres fases del ECV (fabricación de materiales, construcción y uso), para cada una de las soluciones evaluadas evidentemente se ve reducida al considerar un aumento en el espesor de la aislación, lo que se reduce a una reducción del orden del 16% para las soluciones M1 y M2 y del orden de un 18% para la solución M3.

La participación de cada una de las fases del ciclo de vida evaluadas con respecto a la energía incorporada total, para los casos evaluados, muestran que la fase de construcción es la que tiene menor porcentaje de participación (tal como se había concluido en capítulo cuatro), hablamos del orden de 0, 25% de la energía total, la fase del ciclo de vida referida fabricación de materiales tiene mayor participación en la incorporación de energía, alcanzado un promedio de 24% para las soluciones M1, M2 y M3 con espesor 1 y un promedio 30% para las mismas soluciones, pero considerando el espesor dos (aumento de 20 mm) lo que da a entender que a medida que mejora el desempeño energético de la envolvente la fase de fabricación de materiales alcanza mayor participación en el ciclo de vida. Finalmente y de acuerdo a lo que ya se ha venido planteando durante el desarrollo de la tesis, la fase de operación o uso, es la que cobra mayor participación en el ciclo de vida de la vivienda, alcanzando un porcentaje

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

promedio de participación de 73% para las soluciones M1, M2 y M3 con espesor 1 y un promedio de 70 % para soluciones, pero considerando el espesor dos (aumento de 20 mm). Lo que evidencia una vez más el impacto asociado al consumo energético y emisiones de CO₂ de esta etapa del ciclo de vida.

Tabla 5-19: Resultado ECV energía contenida línea base v/s soluciones envolventes térmicas Zona 5 (elaboración propia, 2012)

	LINEA BASE (MJ/m ²)	T FA M1 V2E1 (MJ/m ²)	T FA M2 V2E1 (MJ/m ²)	T FA M3 V2E1 (MJ/m ²)		LINEA BASE (MJ/m ²)	T FA M1 V2E2 (MJ/m ²)	T FA M2 V2E2 (MJ/m ²)	T FA M3 V2E2 (MJ/m ²)
Construcción	0,06	0,07	0,07	0,06	Construcción	0,06	0,07	0,07	0,06
Fab. Materiales	60,4	70,5	70,4	57,3	Fab. Materiales	60,4	72,1	72,5	58,9
Operación	178,9	186,4	191,9	268,3	Operación	178,9	145	148,1	207
Energía Total	239,3	257	262,4	325,7	Energía Total	239,3	217,2	220,7	266

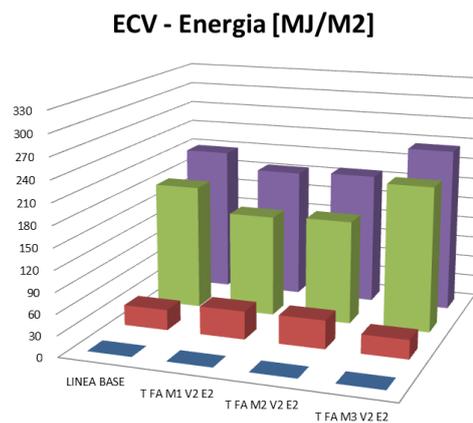
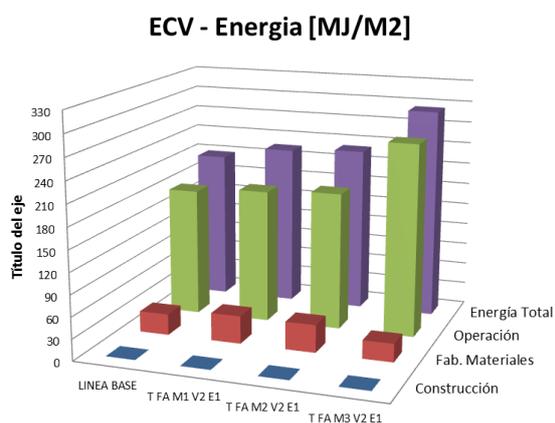


Ilustración 5-29: Análisis comparativo Energía contenida ECV línea base v/s envolventes térmicas (elaboración propia, 2012)

El ACV con respecto a las emisiones de GEI, al igual que para la energía contenida muestra resultados, los cuales no podrían ser concluyentes sin un enfoque de ciclo de vida. Al respecto en Ilustración 5-30 y tabla 5-20 se muestran los resultados de las

emisiones de CO₂ obtenidas a partir del ECV comparativo entre la línea base y las tres soluciones de materialidades para la envolvente térmica del caso estudio, modificando la variable espesor correspondiente al aislamiento térmico (el cual se aumenta en 20 mm) y evaluando para dos tipos de combustibles (leña y gas licuado).

A partir de dicha información, puede señalarse que:

- Las emisiones de GEI asociadas a la fase de construcción, al igual que lo ocurrido con la energía incorporada, tiene una baja participación con respecto a las emisiones totales cuyo porcentaje no alcanza el 0,01% del ACV completo. Por otro lado, el cambio de espesor de la aislación considerado no tiene ninguna significancia para esta fase. Esta etapa del ciclo de vida desde el punto de vista de las emisiones no tributa en forma importante, considerando las condiciones de evaluación del estudio. Sería interesante evaluar el fenómeno, para otros sistemas constructivos como prefabricados y montajes, en los cuales los impactos asociados pudieran hacer aumentar la participación de esta fase del ciclo de vida.
- Con respecto a la fase de fabricación de materiales, la participación de emisiones de CO₂ con enfoque de ciclo de vida, se hace más relevante alcanzado porcentajes de participación promedio del orden de un 19 % del ACV total considerando las tres soluciones de muros y espesor 1. Si este valor se compara considerando el aumento de espesor en 20 mm, se observa que dicho porcentaje de participación aumenta a un 31%. Esto se justifica ya que al mejorar al mejorar el desempeño energético de la envolvente, implica que habrá un aumento en el costo energético de la fase de fabricación de materiales, por ende en la generación de emisiones de GEI.
- El porcentaje de participación de la etapa de fabricación de materiales en el ciclo de vida, tanto para la energía contenida como para las emisiones de GEI van a estar determinadas precisamente por los tipos y cantidades de materialidades presentes en las soluciones constructivas y directamente asociados a los procesos de fabricación de ellos. En tabla 5-20, se observa que para cada solución de envolvente M1, M2 y M3 se obtienen diferentes valores asociadas a las emisiones de CO₂, para la fase del ciclo de vida, fabricación de materiales.
- La fase de operación o uso, definitivamente sigue siendo la fase más contributiva del ciclo de vida, no solo desde el punto de vista de la energía incorporada sino en lo que a emisiones de CO₂ se refiere. Si consideramos el análisis para las tres soluciones de envolvente M1, M2 y M3 con espesor 1 y combustible para calefacción leña, dicha participación alcanza un porcentaje promedio de un 81%

resultando gravitante para el análisis con enfoque de ciclo de vida, ahora si el mismo análisis se hace considerando combustible gas licuado, vemos que dicho porcentaje se reduce a un 69%. Este resultado se justifica porque al considerar todo el ciclo de vida y sensibilizar con respecto al tipo de combustible, el valor total de la emisiones se ve afectado. En el caso del gas licuado cuyo su factor de emisión es inferior al de la leña (indicados en A-27 del Anexo), provoca que las emisiones totales del ciclo de vida disminuyan, haciendo que el porcentaje de participación de emisiones de CO₂ se vean disminuidas para la fase de uso.

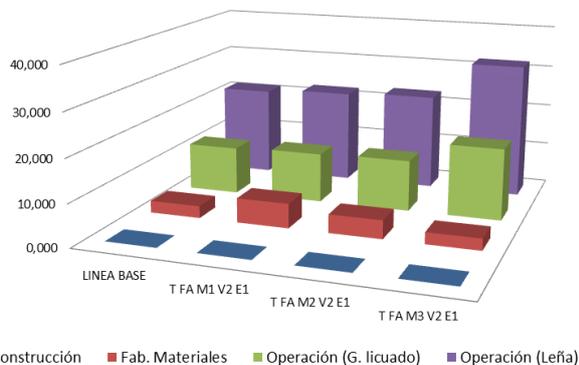
- Otro resultado importante a analizar, es el referido a las emisiones de CO₂ asociadas al cambio de espesor, donde como ya se había indicado para el caso de la energía incorporada al aumentar el espesor de la aislación se incrementa una mejora en el desempeño térmico de la envolvente por tanto la energía total se ve disminuida, tal como lo muestra en Ilustración 5-30 y tabla 5-20 donde además se aprecia la importante reducción de emisiones de CO₂, especialmente para la fase de uso considerando un aumento de 20mm en la aislación térmica.
- Al observar el análisis comparativo en Ilustración 5-30, se aprecia que el cambio de espesor genera una considerable reducción de emisiones de CO₂ para todas las soluciones de envolvente, pero en mayor proporción a la solución M3, la cual frente al aumento de espesor de aislación térmica alcanza valores cercanos a la solución considerada en la envolvente de la línea base 11,3kg CO₂/m² y 13kg CO₂/m² respectivamente.
- Con respecto a las comparaciones del ACV de las soluciones de envolventes M1, M2 y M3 con la solución de envolvente de la línea base, se desprende que desde el punto de vista de las emisiones de CO₂, dicha solución es la que alcanza el menor valor 15,8 kg CO₂/m² considerando como solución combustible el gas licuado, pero si se decidiera cambiar el tipo de combustible por leña, las emisiones se ven aumentadas a 25,9 kg CO₂/m². Claramente para la fase de uso u operación, el tipo de combustible utilizado será determinante en la generación o reducción de emisiones de CO₂. Para complementar la información anteriormente señalada en Ilustración 5-31, se muestra un análisis gráfico que sintetiza el comportamiento de la emisiones de CO₂, el cual fue realizado considerando la zona climática cinco (Temuco) fachada norte y sur, espesor 2 (40 mm), ventana 2 (PVC) y combustibles gas licuado y leña.

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

Tabla 5-20: Resultado ECV Línea Base emisiones de CO₂ v/s soluciones envolventes térmicas Zona térmica 5 (elaboración propia, 2012)

	LINEA BASE (kg CO ₂ /m ²)	T FA M1 V2E1 (kg CO ₂ /m ²)	T FA M2 V2E1 (kg CO ₂ /m ²)	T FA M3 V2E1 (kg CO ₂ /m ²)		LINEA BASE (kg CO ₂ /m ²)	T FA M1 V2E2 (kg CO ₂ /m ²)	T FA M2 V2E2 (kg CO ₂ /m ²)	T FA M3 V2E2 (kg CO ₂ /m ²)
Construcción	0,004	0,008	0,006	0,005	Construcción	0,004	0,008	0,006	0,005
Fab. Materiales	4,5	7,5	6,1	4,5	Fab. Materiales	4,5	7,8	6,4	4,7
Operación (G.lic.)	11,3	11,8	12,2	17,0	Operación (G.lic.)	11,3	9,2	9,4	13,1
Operación Leña	21,4	22,3	22,9	32,0	Operación (Leña)	21,4	17,3	17,7	24,7

ECV - Emisiones



ECV - Emisiones

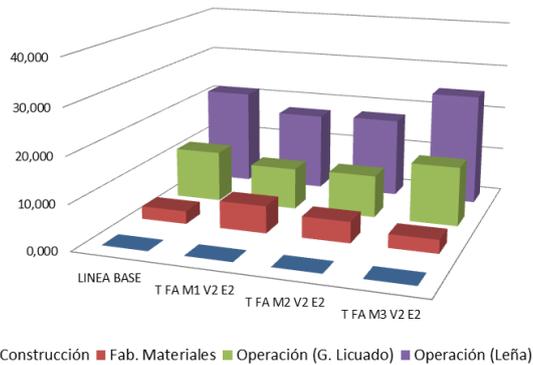


Ilustración 5-30: Análisis comparativo emisiones de CO₂ ECV línea base v/s envolventes térmicas (elaboración propia, 2012)

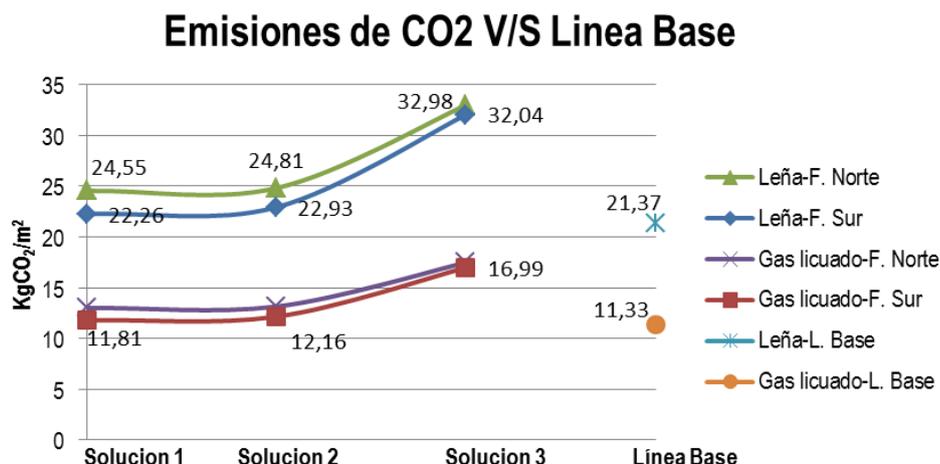


Ilustración 5-31: Emisiones de CO₂ v/s línea base (elaboración propia, 2012)

Finalmente para las soluciones de envolventes térmicas estudiadas, se observó que a menor transmitancia térmica menor es la demanda de energía para calefacción, esta disminución desde un enfoque de ciclo de vida genera una evidente reducción en las emisiones de CO₂.

Con el objetivo de precisar aún más dicha conclusión, se analizaron los valores de transmitancia térmica y emisiones de CO₂, comparando la solución M3 con espesor 1 (10 mm) y espesor 2 (con aumento de espesor de 20 mm) y solución envolvente térmica línea base (espesor 70 mm), según detalle tabla.

En tabla 5-21 se muestran valores de transmitancia para dichas soluciones envolventes, y en Ilustración 5-32 se muestra la relación que se produce entra la transmitancia y las emisiones de CO₂.

Tabla 5-21: Transmitancia térmicas soluciones envolvente térmica (elaboración propia, 2012)

Envolvente Térmica	Espesor aislación térmica (mm)	Transmitancia Térmica
		(W/m ² K)
Solución M3	10	1,3
Solución M3	30	0,8
Línea Base	70	0,53

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

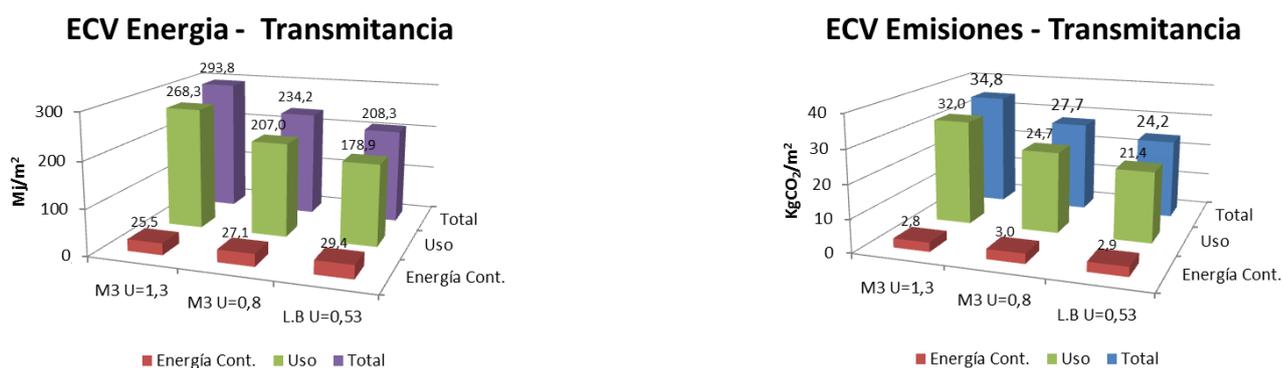


Ilustración 5-32: Transmitancia térmica envolvente v/s emisiones de CO₂ (elaboración propia, 2012)

A partir de los resultados mostrados en tabla 5-21 se concluye que al aumentar el espesor de la aislación térmica la transmitancia térmica va disminuyendo, y por ende la demanda de energía se vería también disminuida.

En Ilustración 5-32, se muestra que a medida que la transmitancia térmica va disminuyendo en valor, la energía contenida para todo el ciclo de vida total va disminuyendo, observándose la misma tendencia para las emisiones de CO₂. Cabe recordar que este tipo de observaciones cobran validez cuando se hace considerando el ciclo de vida de la vivienda, ya que tal como se vio en punto 5.2.4.3 donde se analizó la energía contenida de la aislación, se vio que al aumentar el espesor se aumentó considerablemente las emisiones de CO₂, sin considerar aún la fase de uso u operación.

Existen más aportes y observaciones del análisis y resultados entregados, los cuales serán complementados y sintetizados en las conclusiones del presente capítulo.

5.3 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha dimensionado y cuantificado, la energía incorporada en el ciclo de vida de una vivienda. Además se han evaluado las implicancias del consumo energético y emisiones de CO₂ durante todo el ciclo de vida, vinculadas a la envolvente térmica de esta.

Las conclusiones más relevantes al respecto, apuntan en primer lugar a destacar el uso de la herramienta ACV en el estudio de los aspectos e impactos ambientales vinculados al consumo energético y emisiones de GEI en el flujo energético de viviendas, esto en términos que tal como se ha demostrado en el desarrollo de este capítulo, permite visualizar las sinergias en cada una de las etapas del ciclo de vida estudiado y la implicancias de las decisiones por parte de los diseñadores en incorporar criterios y

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

estrategias en forma temprana en pro de disminuir el uso de energía primaria y sus respectivas emisiones de GEI, mejorando no solo el desempeño ambiental de los proyectos sino también su desempeño técnico y energético (eco-eficientes).

Se ha demostrado para este estudio, con las condiciones de evaluación, que tal como lo señalan diversos autores (Cuchí, 2003; Alías, Hand Jacobo, 2004; Bustamante, 2009; Zabalza, 2009; Pulselli, et al., 2009; Roche, 2010; Wadel et al., 2010; Alonso, 2010; Verbeeck and H. Hens, 2010; Gustavsson and Joelsson, 2010), la fase más impactante del ciclo de vida, respecto al consumo energético y emisiones de GEI es la fase de operación o uso la cual para este estudio alcanzó porcentajes de participación del orden de un 75 y 80%.

De este modo y tal como ha quedado demostrado en este estudio, cualquier mejoramiento en la envolvente térmica genera oportunidades importantes en la reducción del consumo energético y en la generación de emisiones de CO₂, tanto en la selección de materiales como durante en la fase de uso de la vivienda, pero dicha mejora para evaluarla con criterios de sostenibilidad, debe considerar un enfoque de ciclo de vida.

Con respecto a la selección de materiales, se concluye que la materialidad de los muros de las envolventes evaluadas (M1, M2 y M3) muestra, en igualdad de condiciones de parametrización, resultados muy disímiles en lo que a demanda energética se refiere. Ejemplo la simulación correspondiente a zona térmica 5 (Temuco), considerando orientación norte, ventana de PVC, espesor de aislación 10 mm. Alcanzó valores de demanda calefacción de 52,4 kWh/m² año, 53,97 kWh/m² año y 75,36 kWh/m² año respectivamente. Mostrando de ese modo que la influencia de la materialidad influye no solo en la demanda energética, sino también en las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida. Para el mismo ejemplo se concluyó que la solución M3 (madera) mostró el peor desempeño energético incluso con un valor menor al estándar mínimo exigido de 60 kWh/m² año (tabla 5-1), del mismo modo al considera una vida útil de 40 años para la fase de uso, precisamente la solución M3, sería la que aportaría mayores de emisiones CO₂ alcanzando valores de 17,18 KgCO₂/m², respecto a las soluciones M1 (hormigón) y M2 (albañilería) que alcanzan emisiones de 11,94 KgCO/m²; 9,18 KgCO/m² respectivamente. Todo lo anteriormente señalado muestra la relevancia de evaluar con un enfoque de ciclo de vida las implicancias de las estrategias de diseño y mejora en el

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

acondicionamiento térmico, permitiendo visualizar los impactos en toda la cadena de valor del sistema producto evaluado (*vivienda caso estudio*).

Es importante señalar que el ejemplo anterior no pretende establecer que una solución en base a la materialidad madera no alcance estándares de eficiencia energética o de sostenibilidad, sólo que antes de concluir sobre aquellos atributos debe evaluarse con criterios de ciclo de vida. Al respecto la solución de envolvente térmica que considera la línea base del caso estudio, comparativamente con las soluciones de muros M1, M2 y M3, tiene mejor desempeño energético. La cual ha sido diseñada con una transmitancia térmica de 0,53 (W/m² K) para alcanzar una demanda energética de 49,7(kWh/m² año) un valor muy bajo sobre el estándar mínimo exigible por CITEC de 60 (kWh/m² año), establecido en tabla 5-1. Importante es señalar que para alcanzar este elevado nivel de eficiencia energética y tal como lo ilustración 5-25, las materialidades que lo componen muestran elevados valores de energía contenida y emisiones de CO₂, como lo son el caso del fibrobitumen, poliestireno expandido y la placa de OSB.

Es concluyente también, el impacto producido en el aumento de la energía contenida y las emisiones de CO₂, al mejorar el desempeño energético de la envolvente térmica. Con la finalidad de medir dicho impacto, en esta investigación por ejemplo se mejoró la transmitancia térmica (disminuyendo su valor), aumentando el espesor de la aislación y tal como se mostró en tabla 5-15, nuevamente para el caso M3 (madera) se decide aumentar la aislación en 20 mm, reduciendo su demanda energética en aprox. 28% y las emisiones de CO₂ en un 22% aproximadamente. No obstante se observa que la energía contenida, al considerar la disminución de la transmitancia térmica, se ve aumentada en un 0,05% porcentaje muy similar al aumento de las emisiones de CO₂, finalmente tras la evaluación del ciclo de vida, se concluye que dicha mejora logra una reducción total de un 20% en consumo energético y emisiones de CO₂. Concluyendo entonces que a menor transmitancia térmica menor es la demanda de energía y por ende menor emisiones de GEI, durante su ciclo de vida

Otra importante conclusión está referida a la relación del peso (masa) de los materiales con la energía contenida y las emisiones de CO₂, al respecto puede señalarse que el peso de los materiales no es directamente proporcional a la energía contenida en ellos. Por ejemplo Ej. Al analizar las soluciones constructivas, para el caso de la solución M3 (Madera). El peso del entramado de madera, equivale al 50% del total del peso del panel, mientras que la energía contenida equivale sólo a un 0,27%. Caso contrario, sucede con la

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

aislación térmica (Poliestireno Expandido), la cual considera un 0,005% del peso del panel, un 91% de la energía contenida en él, y 94% de la emisiones de gases de efecto invernadero.

Con respecto a los resultados referidos a la energía contenida en los materiales de construcción presentes en las envolventes térmicas estudiadas, se advierte la incidencia de los procesos de elaboración y procesamiento de las materias primas. Los tipos de combustibles en dichos procesos son determinantes en ello, ya que cada combustible, tiene asociado diferentes coeficientes de emisión (Roche, 2010). Por ejemplo, para el caso del aislante térmico, Polietileno expandido cuya producción es a partir de hidrocarburos, cuya producción conlleva los mayores impactos de energía contenida (90%) potencial de calentamiento Global (Zabalza, 2010). Tal como se ha señalado en punto, al evaluar la energía incorporada con enfoque ACV se advierte la alta participación de esta fase del ciclo de vida, la cual alcanza porcentajes de participación del orden del 24% considerando un mínimo de espesor de aislación térmica, el cual al mejorarlo (es decir aumentándolo) este porcentaje de participación aumenta a un 30%. Se advierte de esta manera que al mejorar el desempeño energético de la fase de operación, la fase del ciclo de vida vinculada a la fabricación de materiales va adquiriendo mayor participación.

Desde el punto de vista de la energía contenida en la fase de fabricación de materiales, los resultados de este estudio muestran la relevancia de evaluar anticipadamente con enfoque de ciclo de vida, los efectos acumulativos en las otras fases e incorporarla en la toma de decisiones en las estrategias de diseño con enfoque de sustentabilidad ambiental.

Si bien es cierto y tal como se ha comprobado en este capítulo, la fase de uso tiene una participación importante en términos de impacto energético como en emisiones de CO₂, no obstante se advierten importantes oportunidades para la reducción de impactos en las fases anteriores del ciclo de vida y en el caso del CO₂, como se ha visto que pueden suponer el principal factor de reducción.

Aunque para este caso las fundaciones no forman parte de la envolvente térmica, fueron contabilizadas de igual forma para analizar la incorporación tanto de energía como de emisiones de CO₂ de este componente, las cuales tienen una baja incidencia desde el punto de vista energético y ambiental respecto a los otros elementos de la envolvente, donde claramente se puede apreciar que la selección y especificación de los materiales de construcción influyen directamente desde el punto de vista energético y ambiental. De

Capítulo 5 / Estudio de la energía incorporada en el Ciclo de Vida de una vivienda evaluando las distintas soluciones materiales en su envolvente térmica

este modo señalar que existen una gran cantidad de combinaciones de materiales de construcción, asociados a la envolvente térmicas, las cuales permitirían reducir el costo energético - ambiental. Destacando además que solo a los elementos de la envolvente son aplicables las exigencias de la reglamentación térmica, por ende es importante conocer el ahorro energético y la mejora ambiental que se puede alcanzar en esta primera fase en estudio.

Finalmente puede señalarse que el ACV realizado no permite generalizar los resultado, pero entrega los lineamientos metodológicos, para predecir impactos ambientales asociados a las estrategias de diseño en forma anticipada, siendo necesarios completar la parametrización del estudio, incorporando otras variables que no se han considerado y que podrían incidir sensiblemente en los resultados (factor forma, infiltraciones, porcentaje de vanos, demanda refrigeración, iluminación, diversidad de zonas climáticas, etc.), ya que también interactúan en el comportamiento de las envolventes térmicas, por lo que resulta especialmente relevante tener en consideración los límites del estudio expuestos.

6 CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, APORTES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.

6.1 ANTECEDENTES.

En este capítulo, se muestran y sintetizan las principales conclusiones referidas al cumplimiento de los objetivos planteados en la presente tesis doctoral, como así mismo la producción científica, contribución al conocimiento y futuras líneas de investigación generadas a partir de ella.

6.1.1 Principales conclusiones y síntesis de la tesis

Los resultados de esta tesis doctoral y en plena concordancia con el objetivo general planteado en ella, muestran la importancia del uso de la herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ACV), en la determinación de la energía incorporada en viviendas y el impacto ambiental vinculado a ello.

A través del análisis de los casos estudios, se evidencia la potencialidad de la herramienta ACV para la evaluación energética y ambiental de alternativas proyectuales de viviendas, con condiciones de evaluación sitioespecíficas (locales). Los perfiles ambientales obtenidos productos de dichos análisis, son de inmediata aplicación para el proceso de toma de decisiones, en particular en la etapa de diseño donde efectivamente se toman determinaciones que son gravitantes para el comportamiento ambiental de todo el ciclo de vida de la unidad habitacional, tal como se evidenció por ejemplo, en el cambio de espesores de la aislación térmica en el caso estudio.

De este modo y en términos generales puede señalarse, que con una oportuna Evaluación de Ciclo de Vida pueden identificarse anticipadamente los impactos ambientales que cada selección o decisión determinan, y explorar los materiales o procesos que los causan, cuantificando su influencia. Aspecto muy relevante, ya que, como se ha visto a

la luz de los resultados de la presente tesis, no sería posible tener una opinión concluyente sobre los impactos ambientales de una edificación si sólo se considera una fase del ciclo de vida de esta.

También se ha establecido que existe un esfuerzo internacional para avanzar en los aspectos metodológicos, normativos y reglamentarios en la obtención de datos para la realización de Inventarios ambientales de Ciclo de Vida (ICV). Advirtiendo el atraso a nivel nacional y local en ese sentido, se complejiza las dificultades que se encuentran al afrontar un estudio energético ambiental de viviendas bajo un enfoque de ciclo de vida.

En ese contexto, podría señalarse que este trabajo investigativo viene a contribuir y fortalecer en el contexto nacional, el uso de la herramienta ACV en la mejora del desempeño energético y ambiental de edificaciones, a través de una propuesta metodológica, que si bien es cierto está estandarizada (ISO 14.040), aporta de igual forma en el ejercicio del diseño, a través de la creación de una pequeña base de datos con indicadores ambientales locales, tanto para materialidades mayormente utilizadas en envolventes térmicas, como así mismo determinaciones de la huella energética y de carbono, para las fases de construcción y uso de viviendas de interés social.

Atendiendo los alcances de los objetivos específicos planteados en el desarrollo de esta tesis doctoral, a continuación se hace una pequeña síntesis sobre lo concluyente de cada capítulo y resultados obtenidos en esta investigación.

En capítulo uno se ha realizado un sumario, referido a la vinculación del concepto de sostenibilidad con el área de la edificación tanto a escala local como mundial, dando cuenta además de las iniciativas y estándares internacionales dirigidos a la sostenibilidad en la edificación, de lo cual se concluye que cualquier iniciativa que no involucre el concepto de ciclo de vida no tendrá un efecto en ese sentido, ya que no se estarán abordando los impactos directos e indirectos del ciclo de vida estudiado, no permitiendo de ese modo avanzar en iniciativas efectivas hacia una edificación sostenible.

Chile está incorporándose gradualmente en este contexto y la primera iniciativa dado por el sector edificación, va orientada por la reducción del consumo energético y reducción de las emisiones del GEI, en forma consecuente con las políticas del estado chileno en esa materia.

Capítulo 6 / Conclusiones y perspectivas futuras

En el entendido que diseño eficiente de los edificios, puede desempeñar un papel clave en la lucha contra el cambio climático. Incorporar estrategias que apunten a disminuir el impacto en el medioambiente, y a aumentar la eco eficiencia en toda cadena de valor de una edificación, hace posible reducir las emisiones de GEI. Al respecto, el consumo de energía, debe ser considerado como un indicador de sustentabilidad y, disminuir su uso, permitiendo de ese modo avanzar hacia una construcción sostenible.

Se establece en este capítulo una completa revisión de la problemáticas ambiental del sector edificación a nivel local y mundial, dando cuenta de la injerencia del problema energético y las emisiones de GEI vinculadas a ello.

Se describe el escenario mundial con respecto a las iniciativas del sector construcción frente a la reducción los consumos energéticos; incentivos, legislación, principios normativos y plazos establecidos para el cumplimiento de metas en tal sentido. Al respecto Chile cuenta desde el año 2012 con una política de sustentabilidad para el sector construcción y con un plan de reducción de consumo energético PAEE el cual plantea un reducción de un 12% al año 2020 y reducciones de emisiones de CO₂ en un 20% al año 2020 según datos del Ministerio de Energía. De este modo, asumiendo el consumo energético como un indicador de sustentabilidad, la tesis doctoral ha enfocado su atención en ello y en la categoría de impacto ambiental Potencial de Calentamiento Global.

En el capítulo dos, se muestran los resultados de una rigurosa revisión del estado del arte referido al uso de la herramienta ACV en la edificación. Ahí se da cuenta de la importante experiencia internacional que existe en torno a ello, y principalmente muestra el atraso del país en esta materia, particularmente el sector de la construcción. No obstante se identifican algunas iniciativas a escala local (principalmente a nivel de convenios interministeriales y proyecto I+D+i), lo mismo para algunos países latinoamericanos; México, Argentina.

Se concluye además, que para la realización de un ACV en toda su dimensión, es necesario contar con información ambiental validada y reconocida por el sector de la construcción. Para la realización de un ICV (Inventario Ciclo de Vida), mínimo, debe contar con declaraciones ambientales de productos (DAP), en las cuales se dé cuenta, en forma cuantitativa, de los aspectos e impactos ambientales más relevantes asociados al proceso de producción de un determinado producto. Se facilita, de este modo, la

realización de un estudio con enfoque de ciclo de vida, alcanzando así mayor certidumbre a los resultados obtenidos. Al respecto, en Chile tampoco se cuenta con dicha información, siendo una barrera más para el uso de la herramienta ACV.

En capítulo tres, dando cuenta de uno de los principales objetivos específicos de esta tesis doctoral, se realizan cuatro inventarios ambientales para los materiales: madera, cemento, hormigón premezclado y albañilería de ladrillo. En el desarrollo de esta actividad, se concluye principalmente que en Chile, al no contar con datos públicos sobre inventarios ambientales de materiales de construcción, la realización de ICV se ve dificultada. Es urgente avanzar en esta materia, esto con la finalidad estudiar y cuantificar la importante cantidad de aspectos e impactos ambientales asociados a los procesos unitarios que forman parte de un sistema (productivo), teniendo en cuenta que el objetivo principal de esta investigación, apunta a la categoría de impacto referida a la energía contenida y las emisiones de CO₂.

Ante la falta de datos públicos, existe la posibilidad trabajar sobre bases de datos e inventarios existentes, siendo en efecto una positiva ayuda, pero con claras limitaciones, referidas principalmente a la asimetría de los límites de los sistemas estudiados, lo cual dificulta los análisis y conclusiones finales.

Finalmente en capítulo cinco y consolidando todos los resultados obtenidos en esta investigación, se ha dimensionado y cuantificado la energía incorporada en el ciclo de vida de una vivienda de interés social mejorada energéticamente. Se cuantificó las implicancias del consumo energético y emisiones de CO₂, durante todo el ciclo de vida (excluyendo la fase de desconstrucción).

Esta tesis no tuvo como objetivo optimizar energéticamente la vivienda en estudio, sino a través de una propuesta metodológica de enfoque de ciclo de vida, mostrar las implicancias ambientales en el ejercicio del diseño proyectual.

De este modo, las principales conclusiones obtenidas a partir de la Evaluación de Ciclo de Vida realizada, muestran por una parte, la diferencia de los perfiles ambientales de cada materialidad y componente constructivo, como así mismo, la injerencia de ellos al evaluarlos sinérgicamente durante todo el ciclo de vida. Se encontró materiales muy amigables con el medio ambiente, como es la madera, que dependiendo de la solución constructiva propuesta, no se garantiza un menor consumo energético durante el ciclo de vida.

El capítulo cinco, se estableció relaciones directas entre el desempeño energético y ambiental de la vivienda estudiada, lo que justifica y da cuenta del aporte del uso de la herramienta ACV en la edificación, principalmente incorporada como una herramienta en las estrategias de diseño por parte de los proyectistas.

Como se desprende de estas conclusiones, desde el punto de vista energético ambiental, la responsabilidad del proyectista es gravitante en la consecución de proyectos energéticamente eficientes y sustentables, lo que lleva a plantear la necesidad de incorporar en la formación profesional, tanto la filosofía y enfoque de ciclo de vida, como así mismo, el uso de la herramienta ACV en el desempeño arquitectónico.

Igualmente, se indica que la forma de concebir un proyecto sustentable; debe considerar la integración disciplinar entre profesionales (arquitectos, ingenieros, constructores, etc), el uso de herramientas proyectuales de vanguardia como la ventajosa herramienta BIM, pero incorporando el enfoque ACV, permitiendo integrar este enfoque en el diseño arquitectónico y la planificación constructiva.

6.2 CONTRIBUCIÓN DE LA TESIS.

El aporte de la investigación al desarrollo científico e informativo de la construcción, especialmente al área de diseño sustentable, permite generar criterios en cuanto a la elección de materiales desde el punto de vista energético y cargas medio ambientales asociadas a su producción, permitiendo desarrollar una estrategia de diseño integral en todo su proceso.

Esta tesis ha permitido usar indicadores ambientales sitioespecificos (locales), para la realización de inventarios ambientales nacionales de materiales de construcción a través de una metodología de Análisis de Ciclo de Vida, la cual si bien es cierto, es una metodología estandarizada (ISO 14.040: 2006) el uso en el sector de la construcción está muy lejano a lo desarrollado en otras áreas del sector productivo por ejemplo; minería, sector agropecuario y sector alimentos entre los más importantes.

A partir de la realización de cada inventario de ciclo de vida (ICV) realizado, se han dejado establecidos los aspectos metodológicos para la realización de otros ICV de materiales de construcción, incluso a través de la incorporación de nuevos límites de los

sistemas estudiados, los que pudieran complementar la información y resultados obtenidos hasta el momento.

En el ICV de los materiales, se han identificado las etapas más críticas del proceso productivo en términos de consumo de energía primaria y generación de emisiones de GEI, observando cuáles serían las acciones para disminuir dicho impacto.

Se ha realizado una evaluación cuantitativa de los impactos ambientales asociados al consumo energético (energía incorporada) y emisiones de gases de efecto invernadero para las distintas fases del ciclo de vida de una vivienda. Estudiando para proyectos de edificación nacionales, las aportaciones para cada una de estas fases. Estableciendo que los mayores consumos energéticos y emisiones de GEI se generan en la fase de uso, seguido por la fase de fabricación de materiales.

Del mismo modo que ha ocurrido con los ICV de materiales de construcción estudiados, los ICV para las fases construcción y uso de la vivienda estudiada, se dejan establecidos los aspectos metodológicos y bases de datos necesarias para complementar el estudio del ciclo de vida de una vivienda.

Se han sensibilizado todos los inventarios ambientales realizados, con énfasis en el aspecto energético (matriz energética chilena, cambio uso combustible, variaciones poderes caloríficos, etc), mostrando con ello la variabilidad desde el punto de vista de las emisiones de GEI que tienen en nuestro país, por ejemplo, al irse carbonizando la matriz energética o bien, al ir incorporando diferentes tipos de combustible (fósiles o renovables).

Se ha cuantificado el impacto en términos de huella energética y huella de carbono, vinculadas a las estrategias de diseño para el acondicionamiento térmico de las envolventes. Mostrando cómo una mejoría en la transmitancia térmica de una envolvente, puede aumentar la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero.

De manera sintetizada, podría señalarse que las contribuciones de esta tesis, comparadas con otros trabajos doctorales vinculados al ACV en edificación, radican en primer lugar, en que es el primer trabajo doctoral en Chile basado en el uso de la herramienta ACV en el sector edificación. Por otro lado, el *enfoque local* del estudio y la transversalidad de sus resultados para cada fase del ciclo de vida estudiado, con respecto a una solución

tipológica de amplia aplicación (vivienda de interés social), pero también singular, desde el punto de vista del desempeño energético (solución mejorada energéticamente).

Las tesis doctorales revisadas, vinculadas al ACV en edificación, son todas extranjeras, con importantes contribuciones claro está, con respecto a sus respectivos objetivos y que en más de un caso han sido citadas en esta investigación. A saber; (Cardim de Carvalho, 2001; García, 2010; Zabalza, 2010; Hernández, 2013 y Monterotti, 2013), pero ninguna de ellas evidentemente analiza la realidad nacional chilena.

6.2.1 Productividad Científica

La productividad científica de este trabajo doctoral se enmarca en dos hitos.

6.2.1.1 El primero de ellos corresponde al ya mencionado (capítulo 2, punto 2.8.2.3), proyecto de investigación FONDEF D09I1162:

“Diseño y aplicación de un sistema de aseguramiento de calidad para obras de construcción habitacional en Chile basado en criterios y estándares de desempeño (performance)”. Desarrollado entre los años 2011 y 2013.

Para el cumplimiento de los objetivos del proyecto se consideró una estructura de cuatro módulos, que abordaran los desempeños de: seguridad, durabilidad, habitabilidad y sustentabilidad medioambiental. Los dos primeros módulos desarrollados por investigadores del Decon (Pontificia Universidad Católica) y los dos módulos restantes desarrollados por investigadores de la Universidad del Bio Bio (CITEC).

De este modo la autora, como parte del equipo de investigadores del CITEC, tuvo la responsabilidad de construir el módulo de Sustentabilidad ambiental, contribuyendo de esta manera a la creación de un Sistema destinado a fomentar la innovación, la eficiencia de los procesos constructivos, la competitividad y, como consecuencia, mejorar la calidad de la edificación e incorporar conceptos básicos de sustentabilidad para la vivienda construida en Chile.

Por consiguiente todos los aspectos metodológicos y resultados logrados en esta tesis doctoral fueron incorporados en el diseño de este módulo de Sustentabilidad Ambiental del mencionado proyecto FONDEF.

Capítulo 6 / Conclusiones y perspectivas futuras

A partir de los inventarios ambientales (ICV), de las materialidades estudiadas y del uso de la herramienta ACV en el estudio de la energía contenida y huella de carbono en la vivienda caso estudio (la misma estudiada en capítulo cinco), se logró establecer para el módulo de Sustentabilidad Ambiental, valores de criterio de desempeño tanto de energía contenida (MJ/m²), como de la huella de carbono por unidad de superficie (Kg CO₂/m²), para la envolvente térmica de viviendas pilotos.

Los valores obtenidos, fueron comparados con valores actuales y valores óptimos propuestos por centros de investigación de sostenibilidad europeos (Wadel, 2010), los cuales fueron proyectados y adaptados a la realidad chilena, de acuerdo a las metas de reducción de consumo energético y emisiones de CO₂, de acuerdo a los compromisos adquiridos con respecto a la reducción de GEI (ver tablas 6-1 y 6-2).

Se da cuenta por una parte del orden de magnitud de los resultados logrados y por otra, de la importancia de incorporar el uso de la herramienta ACV en la edificación en la medición de desempeños de sustentabilidad ambiental

De este modo para los desempeños evaluados para el módulo sustentabilidad medioambiental, se tuvo:

Tabla 6-1: Resultado Desempeño 1 Proyecto FONDEF D09I1162

Desempeño 1 - Energía Contenida				
Exigencia	Elemento	Valor límite	Valor proyecto	Verificación
Energía Contenida	Envolvente Térmica	≤3000MJ	1466,1 MJ/m ²	cumple

Tabla 6-2: Resultado Desempeño 2 Proyecto FONDEF D09I1162

Desempeño 2 – Emisiones de CO ₂				
Exigencia	Elemento	Valor límite	Valor proyecto	Verificación
Emisiones de CO ₂	Envolvente térmica muros	≤150 KgCO ₂ /m ²	148,1 KgCO ₂ /m ²	cumple

El desarrollo de este proyecto arrojó importantes conclusiones y reflexiones, sintonizadas con todo lo que en esta tesis se ha venido planteando. Los resultados obtenidos en este proyecto se han validado frente a División Técnica (DITEC) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, dando cuenta por cierto de lo relevante del uso de la herramienta ACV a la hora de evaluar sustentabilidad ambiental de viviendas.

6.2.1.2 Publicación Indexada (ISI)

El segundo hito, corresponde a una publicación de un artículo titulado: Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción. Publicado en marzo del año 2013 en Revista de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile, indexada ISI. Autores: MSc. Muñoz C, Dr. Zaror C, Dr. Saelzer G, Dr. Cuchí A.

Este artículo muestra un resumen del capítulo número tres de la presente tesis doctoral, el cual estudia la huella energética y de carbono, para la fase de construcción de una vivienda de interés social.

6.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

A lo largo del trabajo presentado se han ido destacando otras líneas futuras de investigación en el marco de los temas tratado en esta tesis.

Dentro de ese contexto se sugieren a futuro nuevas líneas de investigación, en lo referente a la valorización económica del ACV, por ejemplo sería interesante sensibilizar los resultados de los ICV estudiados, incorporando la variable costo a cada uno de los combustibles utilizados tanto en los procesos productivos de materiales, como así mismo en los combustibles utilizados en la fase de uso u operación de la vivienda. Dado que, en estricto rigor las decisiones de elección de materialidades y mejora en los procesos productivos dependerán en gran medida de una evaluación económica, identificándose como una limitación de este estudio.

Del mismo modo y considerando que un proyecto, para ser evaluado bajo el concepto de sustentabilidad, debiera incorporar la componente social. Sería pertinente realizar este estudio evaluando los beneficios sociales que ello involucre, teniendo en cuenta que el Análisis de Ciclo de Vida Social (ACV-S), se rige bajo los mismos principios normativos de la ISO 14.040. Esta línea de investigación es tremendamente relevante, en términos que pueden evidenciarse los beneficios a nivel país, de una mejora en la calidad energética y ambiental de una vivienda (principalmente de interés social), y su implicancia (medida

cuantitativamente a través de un ACV), en la calidad de vida de la personas y el ahorro que le significaría al estado, en la reducción de morbilidad de enfermedades respiratorias.

Otra línea de investigación futura, viene dada por el estudio de la eficiencia de los equipos (climatización, iluminación, etc.) y cómo esta característica incide en el desempeño energético, ambiental y económico de una vivienda, siempre con un enfoque de ciclo de vida, pero con énfasis en la fase de uso (dada la tributación que tiene y ha quedado en evidencia en los resultados de esta tesis).

Dado que esta tesis se ha centrado principalmente en el estudio energético y ambiental de las principales materialidades que forman parte de la envolvente térmica de una vivienda, sería necesario completar este estudio considerando la sinergia de la totalidad de materialidades, componentes e instalaciones que forman parte de una vivienda, evaluadas con un enfoque ACV.

Se identifica otra línea de investigación con enfoque ACV, profundizando en la influencia de las estrategias de diseño, considerando que esta tesis ha mostrado la sensibilidad de los resultados, frente a cada parámetro considerado. Por ejemplo, sería muy interesante hacer un ACV para estudiar el efecto de las infiltraciones de aire (y/o cualquier otro parámetro) con respecto al consumo energético y las respectivas emisiones de GEI asociadas.

Esta tesis doctoral centró la aplicación del ACV en casos estudios asociados a una tipología de vivienda singular (mejorada energéticamente), por lo que la discusión con respecto a los resultados se enriquecería considerablemente si se estudiaran otras tipologías de viviendas y se hicieran análisis comparativos de los resultados obtenidos.

Otro aspecto relevante de estudiar es el referido a las categorías de impacto ambiental, esta tesis, de acuerdo a los objetivos planteados, sólo abordó la categoría de impacto ambiental referida a la energía contenida y emisiones de gases de efecto invernadero. De este modo se abre una oportunidad de complementar los resultados obtenidos evaluando otras categorías de impacto ambiental, las cuales han sido señaladas en el capítulo dos (tabla 2-2): disminución capa de ozono, toxicidad humana, acidificación, eutrofización, ruido, etc.

Capítulo 6 / Conclusiones y perspectivas futuras

Otra línea investigativa, y a modo de complementar el estudio del flujo energético durante todo el ciclo de vida de una vivienda, sería importante conocer cuanta es la incidencia, en el consumo energético total, considerando las otras fases del ciclo de vida que no fueron evaluadas en la investigación, las cuales no formaban parte de este estudio, pero que aportan al desarrollo de un diseño con criterios de sustentabilidad, señaladas en capítulo dos tabla 2-6 (rehabilitación, reparación, demolición, etc.).

Finalmente y dado que el proceso de construcción tiene un importante efecto en las emisiones incorporadas, tanto en los materiales como en los componentes y sistemas constructivos, sería importante desarrollar líneas de investigación orientadas a soluciones constructivas más eficientes, tales como sistemas prefabricados u otros similares.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

- ADALBERTH, K. 2001 Life-cycle assessment of four multi-family buildings. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 2001, vol2, p 1-21, , ISSN 1403-2147.
- ALIAS. H., JACOBO, J. 2004 Situación Higrotérmica de componentes de la envolvente de viviendas de interés social en NEA según normativa IRAM. [En línea][citado el: 05 de julio 2012]. Disponible en web <<http://arq.unne.edu.ar/publicaciones/areadigital/area7/anteriores/pdf/alias.pdf>>
- ALVARADO, P., SPLOMANN C. 2009. Análisis de competencia del sector de la construcción chileno y sus procesos de licitaciones públicas de contratos de obras: Estructura, Agentes y Prácticas. Editado por Fiscalía Nacional económica. [En línea][citado el: 07 de Septiembre 2012]. Disponible en <<http://www.fne.gob.cl>>
- ALONSO, C., OTEIZA, I., GARCIA, J. 2010. Criterios para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el proyecto de fachadas de edificios de viviendas. En Congreso Nacional de Investigación y Edificación, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- AENOR. 2012. Informe anual 2012.[En línea][citado el: 03 noviembre 2010]. Disponible en <http://www.aenor.es/DescargasWeb/aenor/datos/informe_anual_2012.pdf >
- ARANDA,A., ZABALZA I., SCARPELLINI, S. 2005. Modelling of energy and environmental costs for sustainability of urban areas. *Journal Thermal Science Special* ;9 (3):25- 37.
- ARANDA, A., ZABALZA, I., LLERA, E., LEMASS, O. 2007. Energy efficiency strategy for Spain: description of current framework and a complementary viewpoint". *International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. 20th International Conference. Padova (Italy). 2007: 1595-1602.
- ARANDA, A., ZABALZA, I., MARTINEZ A., VALERO A., SCARPELLINI S. "El análisis de ciclo de vida como herramienta de gestión empresarial". ISBN: 84-96169-74-X. Fundación Confemetal, Madrid, 2006.
- ARCAS, J., PAGES, A., CASALS, M. 2011. El futuro del hábitat: repensando la habitabilidad desde la sostenibilidad. El caso español. *Revista INVI* [En línea]. Disponible en <<http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI> > [consulta el: 12 julio 2012]. ISSN 0718-8358.
- ARDENTE, F., BECCALI G., CELLURA M., LO BRANO V. 2005. Life cycle assessment of a solar thermal collector. *Renew Energy* 2005; 30 (7):1031-1054.
- ARDENTE, F., BECALLI, M., CELLURA, M., MISTRETA M. 2008. Building energy performance: ALCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings* 2008; 40:1-10.
- ARENA, A., De ROSA C. 2001., Análisis de Ciclo de vida y sustentabilidad de los edificios - Experiencia Argentina. Cricyt Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 10, 2006. ISSN 0329-5184.
- ARGÜELLO T, ARAGÜELLES B, BADILLO R,. 2013. Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. Mexico, ISBN en trámite, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. p 11-15.

Bibliografía

- ARREAZA, H., AVELLANEDA, J. 2010. A physical-energetic balance of CO₂ emissions for a wooden facade. A: 37th IAHS World Congress on Housing. 37th IAHS World Congress on Housing: design, technology, refurbishment and management of buildings. p. 1-9.
- AVELLANEDA, J., CELA, C., GONZALEZ, J. 2013. Evaluación del impacto ambiental de diferentes sistemas constructivos industrializados comparado con un sistema constructivo convencional. I Congreso Internacional y III Nacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-eficientes: Sevilla 20, 21 y 22 mayo 2013: actas, p. 299-309.
- BANCO CENTRAL 2008. Fichas anuales 2008-2012. Cuentas nacionales anuales (2008-2011). [En línea]. Disponible en <<http://www.bcentral.cl/publicaciones/estadisticas/actividad-economica-gasto/aeg01i.htm>> [consulta el: 09 julio 2012]. ISSN 07 17-3660.
- BEDEC. 2011. ITeC Bases de datos. [En línea]. Disponible en web <<http://www.itec.es/noubedec.e/bedec.aspx>> [consulta el: 10 julio 2010].
- BLENGINI, G., DI CARLO T. 2010. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings* 2010;42(6): 869-880.
- BRITISH STANDARDS. 2008. How to assess the carbon footprint of goods and services. Guide to PAS 2050-2008. 59p
- BUSTAMANTE, W., ROZAS, Y., CEPEDA, F. AND MARTINEZ, P 2009. Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social. In MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO DIVISION TECNICA DE ESTUDIO Y FOMENTO HABITACIONAL (MINVU) Y PROGRAMA PAIS DE EFICIENCIA ENERGETICA (CNE). Santiago de Chile, 2009.
- CALDERÓN, 2013. Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. ISNB en trámite, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. p 53-58.
- CASTELLS, F., ORTIZ, O., & SONNEMANN, G.(2008).Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA.
- CARDIM DE CARVALHO A. 2001. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento - Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Tesis Doctoral Universitat Politècnica de Catalunya - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, España.
- CERON, I., SANYE, E., RIERADEVALL, J., MONTERO, J., OLIVER, J. 2013 Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. ISNB en trámite, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- CIEMAT.2012. El potencial de ahorro de energía y reducción de gases de efecto invernadero en viviendas. España 2005- 2012.[En línea][citado el: 10 de julio 2012]. Disponible en web <<http://www.aislar.com/documentos%20enlazados/cener%20completo.pdf>>
- CCHC, Informe MACH n°33, agosto 2011.[En línea][citado el: 08 de agosto 2012]. Disponible en web <<http://www.cchc.cl/publicacion/informe-mach-33/>>

Bibliografía

CIRCE, CONAMA 2012, Congreso Nacional Medio Ambiente, Zaragoza. [En línea][citado el: 15 de septiembre 2012]. Disponible en web
<<http://www.conama2012.conama.org/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=290&id=1896699924&op=view>>

CONAMA 2008. Plan Acción Nacional Cambio Climático. [En línea][citado el: 12 de septiembre 2012]. Disponible en web
<http://www.mma.gob.cl/1304/articles-49744_plan_01.pdf>.

COMISIÓN EUROPEA. “Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on Integrated Product Policy. Building on Environmental Life-Cycle Thinking”. Bruselas, (COM (2003) 302).

COMISIÓN EUROPEA. “Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the Sustainable Consumption and Production and Sustainable Industrial Policy Action Plan”. Bruselas, (COM (2008) 397).

COMISIÓN EUROPEA. “Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Taking sustainable use of resources forward: A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste”. Bruselas, (COM (2005) 666).

COMISIÓN EUROPEA. “Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy on the sustainable use of natural resources”. Bruselas, (COM (2005) 670).

COMISIÓN EUROPEA. “Development of Horizontal Standardised Methods for the Assessment of the Integrated Environmental Performance of Buildings”. M/350 EN, Standardisation Mandate to CEN, 29/03/04.

CUADRADO, J. Establecimiento de una metodología general para la medida de la sostenibilidad en el ciclo de vida de los edificios industriales. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco - Departamento de Ingeniería Mecánica, 2009.

CHARGOY, J., SOJO, A., SUPPEN, N., REYES, R. 2013 Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. ISBN en trámite, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. P 67-74.

COMISION NACIONAL DE ENERGIA (CNE). Antecedentes sobre la matriz energética en Chile y sus desafíos para el futuro. [En línea][citado el: 11 de octubre 2012]. Disponible en web
<http://www.cne.cl/images/stories/estadisticas/raiz/antecedentes_matriz_energetica_010611.pdf>.

CUCHÍ, A., WADEL, G., LÓPEZ, F., & SAGRERA, A. (2007). Guía de la eficiencia energética para Administradores de Fincas. Fundación Gas Natural. [En línea][citado el: 12 de octubre 2012]. Disponible en web <<http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/Gu%C3%ADa-de-la-eficiencia-energ%C3%A9tica-para-Administradores-de-Fincas.pdf>>.

Bibliografía

CUCHÍ A., PAGÈS A. 2009. Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Ministerio de Vivienda. Madrid, Octubre 2009. [En línea][citado el: 8 de octubre 2012]. Disponible en web

<http://www.gbce.es/archivos/ckfinderfiles/Investigacion/libro_GTR_cast_postimprensa.pdf >.

CUCHÍ A. 2010. “Cambio Global España 2020/50 Sector edificación La imprescindible reconversión del sector frente al reto de la sostenibilidad”. Edición Societat Orgànica. 2010. [En línea][citado el: 14 de octubre 2012]. Disponible en web

<http://www.gbce.es/archivos/ckfinderfiles/Investigacion/libro_GTR_cast_postimprensa.pdf >.

CUCHÍ A. 2001. Arquitectura”. Proceedings Seminario herramientas informáticas asociadas al ACV. Universitat Autònoma de Barcelona, 18 de junio de 2008. Chen T.Y., Burnett J, Chau C.K. “Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong”. Energy 2001;26:323-340.

CIRCE, Proyecto EnerBuiLCA. Life Cycle Assessments for Energy Efficiency in Buildings. [En línea][citado el: 06 de julio 2011]. Disponible en web < <http://www.enerbui-lca.sudoe.eu/2012>>.

CIRCE, 2010, GUIDELINES FOR LCA CALCULATIONS IN EARLY DESIGN PHASES, Grant Agreement N° - EIE/07/090/SI2.467609. [En línea][citado el: 03 de mayo 2011]. Disponible en web < http://circe.cps.unizar.es/enslic/texto/d_3-spanish.pdf>.

CHARLOT-VALDIEU, P. OUTREQUIN.2010. Un procedimiento y una herramienta de ayuda a la decisión para desarrollar estrategias de rehabilitación energética sostenibles para la Directiva Europea (EPBD) 2010. Informes de la Construcción, Vol 63, No Extra (2011) doi:10.3989/ic.11.064

CORMA 2003, Disponibilidad de Pino radiata en Chile 2003-2032. [En línea][citado el: 03 de mayo 2010]. Disponible en web<http://www.corma.cl/corma_info.asp?idq=155 >.

CORRIM 2011, Puettman 2009. [En línea][citado el: 03 de julio 2010]. Disponible en web < http://www.corrim.org/pubs/reports/annual/CORRIM_Annual_2011.pdf >.

DAVIES, C . The prefabricated Home, Reaktion books, Trowbridge, 2005. [En línea][citado el: 20 de junio 2011]. Disponible en web < <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6136/TGW06de13.pdf?sequence=6>>

DE GRACIA A., RINCÓN L., CASTELL A., JIMÉNEZ M., BOER D., MEDRANO M., CABEZA L.F. 2010. Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings. Energy and Buildings 2010; 42(9):1517-1523.

DE LUXÁN M., VÁZQUEZ M., GÓMEZ G., ROMÁN E., BARBERO M. 2009. Actuaciones con criterios de sostenibilidad en la rehabilitación de viviendas en el centro de Madrid. ISBN: 978-84-935719-8-6. Edita: Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo (EMVS) Área de Gobierno de Urbanismo y Vivienda del Ayuntamiento de Madrid.

DE MEESTERA B., DEWULFA J., VERBEKEA S., JANSSENSB A., VAN LANGENHOVEA H. 2009. Exergetic life-cycle assessment (ELCA) for resource consumption evaluation in the built environment”. Building and Environment 2009;44:11-17.

Bibliografía

DGIEM (2008). Guía de rehabilitación energética de edificios de viviendas. Madrid. Dirección General de Industria, Energía y Minas. [En línea][citado el: 16 de mayo 2012]. Disponible en web < <http://www.cecua.es/publicaciones/guia%20enforce.pdf> >.

DING, G2008. Sustainable construction - The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management* 2008; 86:451-464.

DOOLEY R., LEGGETT-SIKORA J., DAQUISTO D., NOWAK M. 2001. LCA Tools to measure environmental impacts: Assessing their applicability to the Home Building Industry. National Association of Home Builders Research Centre-NAHB. Final report, 2001. [En línea][citado el: 25 de junio 2012]. Disponible en web < http://www.toolbase.org/PDF/CaseStudies/life_cycle_assessment_tools.pdf>.

ELCD. European Reference Life Cycle Database" (ELCD), [En línea][citado el: 23 de agosto 2010]. Disponible en web< <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>>.

FRISCHKNECHT AND REBITZER, 2007 Ecoinvent, Overview and Methodology. [En línea][citado el: 15 de junio 2010]. Disponible en web< http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/01_OverviewAndMethodology.pdf>. EN 15978:2011, Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. [En línea][citado el: 11 de octubre 2011]. Disponible en web <<http://www.cen.eu/cen/Sectors/TechnicalCommitteesWorkshops/CENTechnicalCommittees/Pages/Standards.aspx?param=481830&title=Sustainability%20of%20construction%20works>>.

ENSLIC, 2010. Use LCA for sustainable building design. [En línea][citado el: 7 de abril 2011]. Disponible en web< <http://circe.cps.unizar.es/enslic/texto/proj.html>>.

ESCALANTE, 2013. Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. ISBN en trámite, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. pp 17-25.

ESCORCIA, R. GARCÍA, M. TREBILCOCK, F. CELIS, U. BRUSCATO. 2012. Mejoramientos de envolvente para la eficiencia energética de viviendas en el centro-sur de Chile. *Informes de la Construcción*, Vol 64, No 528 (2012) doi:10.3989/ic.11.143. . [En línea][citado el: 21 de febrero 2013]. Disponible en web< <http://www.revistahabitatsustentable.cl/inicio.html>>.

FEIST W., SCHNIEDERS J., DORER V., HAAS A. 2005 Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings* 2005;37 (11):1186-1203.

FISSORE-COLONELLI. Informe Final Sistema de Certificación Energética de Viviendas Chile. 2011 [en línea] [citado el: 15 de marzo 2012]. Disponible en web< <http://www.acee.cl/576/article-58868.html>>.

FONDEF . Diseño y aplicación de un sistema de aseguramiento de calidad para obras de construcción habitacional en Chile basado en criterios y estándares de desempeño (performance). [en línea] [citado el: 18 de abril 2013]. Disponible en web <<http://www.conicyt.cl/fondef/2011/05/09/se-inicia-proyecto-fondef-que-certificara-desempeno-de-las-viviendas-una-vez-construidas/>>.

Bibliografía

GRAEDEL T. Industrial Ecology - Definition and Implementation. Industrial Ecology and Global Change. Cambridge University Press, New York, Chapter 3, 1994.

Gustavsson L., Joelsson A. 2010 Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings* 2010;42(2): 210-220.

HÄKKINEN T., TATTARI K., VARES S., LAITINEN A., HYVÄRINEN J. 2006 Methodology for Compiling Environmental Declarations for Building Products and Assessing Environmental Impacts of Buildings. Confederation of Finnish Construction Industries RT. 2006. [en línea] [[citado el: 23 de septiembre 2011]. Disponible en web <<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/environ/eka-report-2006.pdf>>.

HANNON B., STEIN R.G., SEGAL B.Z., SERBER D. 1978 Energy and labor in the construction sector. *Science* 1978; 202(4370):837-847.

HATT T., 2012. El Estandar "Passivhaus" en Chile. Una nueva oportunidad en la construcción sustentable para el centro sur de Chile. Tesis Doctoral. Universidad del Bío Bio.

HEGGER, M., AUCH-SCHWELK, V ; FUCHS, M; ROSENKRANZ, T. Construction material manual, Birkhäuser edition Detail, Munich, Alemania 2006.

HERNÁNDEZ, P AND KENNY, P. 2010 Life cycle inventory of buildings: a calculation method. *Building and Environment*. 45(4): 1037-1041. April 2010.

HERNANDEZ, P AND KENNY, P 2010 From net energy to zero energy buildings: Defining life zero energy (LC-ZEB). *Energy and Buildings*, 2010, vol 42, n° 6, p.815-821.

HERNÁNDEZ,2012. International Congress on Project Engineering. "15th International Congress on Project Engineering". Huesca: Asociación Española de Ingeniería de Proyectos, 2012.UPC Miotto UPC.

IEA. World energy Outlook - 2012. International Energy Agency. [en línea] [[citado el: 5 de noviembre 2011]. Disponible en web <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Spanish.pdf>>.

INFOR 2008, Boletín Estadísticos 121. Anuario Forestal 2008. [En línea] [[citado el: 7 de agosto 2010]. Disponible en web <<http://biblioteca1.infor.cl:81/DataFiles/24888.pdf> >.

INSTITUTO NACIONAL NORMALIZACIÓN (INN) (Chile). LISTADO DE NORMAS.[En línea] [[citado el: 16 de septiembre 2012]. Disponible en web <http://www.inn.cl/pdfs/catalogonormas/Catalogo_2012_04_Abril.pdf. Listado Normas>.

INSTITUTO NACIONAL NORMALIZACIÓN (INN) (Chile). Sustentabilidad en la construcción de edificios Métodos para el desarrollo de indicadores de sustentabilidad - Parte 1: Edificios. NCh3048/1.Of2007 ISO/TS 21929-1:2006. 24p.

INSTITUTO CHILENO CEMENTO Y HORMIGÓN (ICH), 2010. Despacho anual hormigón.[En línea] [[citado el: 04 de abril 2012]. Disponible en web <<http://ich.cl/estadísticas> >

Bibliografía

INSTITUTO NACIONAL NORMALIZACIÓN (INN) (CHILE). Sustentabilidad en la construcción de edificios - Métodos de evaluación del comportamiento ambiental de los trabajos de construcción - Parte 1: Edificios. NCh3049/1.Of2007 ISO/TS 21931-1:2006. 35p.

INSTITUTO NACIONAL NORMALIZACIÓN (INN) (CHILE).Gestión Ambiental - Evaluación del Ciclo de Vida - Principios y Marco. NCh-ISO 14040.Of1999. 21p.

INSTITUTO NACIONAL NORMALIZACIÓN (INN) (CHILE).Gestión Ambiental - Evaluación del Ciclo de Vida - Definición de los objetivos y el alcance y análisis del inventario. NC-ISO 14041.Of2000. 39p.

IPCC-INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. (2007). IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System. Chapter 7 Foams. [En línea] [[citado el: 03 de marzo 2010]. Disponible en web <<http://www.ipcc.ch>>.

ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations -- Principles and procedures". ISO, Ginebra, 2006.

ISO 21930:2007 "Sustainability in building construction- Environmental declaration of building products". ISO, Ginebra, 2007.

ISO/TS 14048:2002 "Norma sobre Gestión Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Normalización de datos e información para una evaluación de ciclo de vida.2002.

KELLENBERGER D, ALTHAUS H. Relevance of simplifications in LCA of building components. Building and Environment. 44(4): 818-825. April 2009.
U.S LIFE INVENTORY DATABASE, [En línea] [[citado el: 13 de junio 2011]. Disponible en web <<http://www.nrel.gov/lci/>>.

LIÉBANA, 2012. Tesis Doctoral Evaluación y Análisis de las emisiones de CO₂ de la producción de forjados planos hormigonados in situ en el análisis del ciclo de vida. 2012. Universidad San Pablo-CEU. Madrid España.

JÖNSSON Å. 2000. Tools and methods for environmental assessment of building products—methodological analysis of six selected approaches. Building and Environment 2000; 35:223-238.

LÓPEZ, F. 2006 Sobre el uso y la gestión como los factores principales que determinan el consumo de energía en la edificación. Una aportación para reducir el impacto ambiental de los edificios". Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya- Departament de Construccions Arquitectòniques, 2006.

LUXÁN, M. 1996. Arquitectura integrada en el medio ambiente, en La construcción de la ciudad sostenible. Primer catálogo español de buenas prácticas. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. [En línea] [[citado el: 19 de octubre 2011]. Disponible en web <<http://habitat.aq.upm.es/cs/>>.

MACÍAS, M., NAVARRO G. 2010. Metodología y Herramienta Verde para la evaluación de Sostenibilidad de Edificios . Informes de la Construcción- Macías M, García J. Verde, a Methodology and tool for a sustainable building assessment. Informes de la Construcción. 62(517)87-100. March 2010.

Bibliografía

- MALMQVIST T., GLAUMANN M., SCARPELLINI S., ZABALZA I., ARANDA A., LLERA E., DÍAZ S. 2010. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. Energy, In Press, corrected proof available online 17 April 2010.
- MARTI I RAGUÉ X. 2003. Edificación sostenible". Desarrollo Sostenible en España. CONAMA. pp:183-191. [En línea] [citado el: 12 de mayo 2011]. Disponible en web <<http://www.conama.es/viconama/ds/pdf/43.pdf> >.
- MINVU, 2013. Construcción Sustentable. [En línea] [citado el: 16 de enero 2012]. Disponible en web < http://www.minvu.cl/opensite_20130313161940.aspx >.
- MERCADER, P., OLIVARES M, RAMIREZ DE ARELLANO A. 2012. Materiales de Construcción Vol. 62, 308, 567-582 ISSN: 0465-2746.
- MIDEPLAN, CASEN 2006. Encuesta CASEN. [En línea] [citado el: 12 de abril 2012]. Disponible en web <<http://www.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen/publicaciones/2006/Pobreza.pdf> >.
- MIOTTO ,B; GARCÍA, A; ESCORCIA, O; TREBILCOCK,M. 2011 ; Celis F. Diseño Integrado para Viviendas Energéticamente Eficientes en Chile: Enhebrando Capacidades. Hábitat Sustentable. Vol. 1, N°. 1, 2-13. ISSN: 0719 - 0700. [En línea][citado el: 14 de mayo 2012]. Disponible en web< <http://www.revistahabitatsustentable.cl/inicio.html> >.
- MUÑOZ, C., ZAROR, C., SAELZER, G., CUCHI, A. 2012. Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción. Caso estudio: vivienda de tipología social. Región del Bio Bio - Chile. Revista de la Construcción, 2012 vol. 11 n°3.
- ORTIZ, O., CASTELLS, F., SONNEMANN, G.2009. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. Construction and Building Materials. 23(1): 28-39. January 2009.
- PATTINI, A., ARENA, A., DE ROSA, C., 2004. Análisis de Ciclo de vida y sustentabilidad de los edificios - Experiencia Argentina. Cricyt. Mendoza. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 10, 2006. ISSN 0329-5184.
- PAS 2050 PAS 2050: 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. BSI British Standards. Londres.
- PERAZA, O. 1985.Industrialización de la madera. [En línea][citado el: 23 de junio 2010]. Disponible en web< http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_1241_17682.pdf>.
- PEUPOORTIER, B.2001. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French contex . Energy and Buildings 2001; 33:443- 450.
- PEUPOORTIER B., PUTZEYS K. 2005. Inter-Comparison and Benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools. PRESCO Workpackage 2: Final report, 2005. [En línea][citado el: 8 de marzo 2012]. Disponible en web <http://www.etn-presco.net/generalinfo/PRESCO_WP2_Report.pdf>.

Bibliografía

- PULSELLI, R., SIMONCINI, E., MARCHETTINI, N. 2009. Energy and energy based cost-benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate. *Building and Environment* 2009;44(5):920-928.
- PULSELLI, R., SIMONCINI E., PULSELLI, F., BASTIANONI, S. 2007. Energy analysis of building manufacturing, maintenance and use: em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and Buildings* 2007; 39(5):620-628.
- PURCELL, E. 1988 *Electricidad y Magnetismo*. Series Berkeley physics course ;2. Barcelona Reverte. Barcelona. España.
- RIVELA, B., MOREIRA, M, MUÑOZ, I., RIERADEVALL J., FEIJOO G.2006. Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture. *Science of The Total Environment* 2006; 357 (1-3):1-11.
- RIVELA, B; CUERDA, I; OLIVIERI, F; BEDOYA, C. & NEILA, J. 2012. Análisi de Ciclo de Vida para el ecodiseño del sistema Intemper TF de cubierta ecológica Algibe. Life Cycle Assessment for ecodesign of ecological roof made with intemper TFb Ecological Water Tank System. *Materiales de la Construcción*, 2012.
- PRICE, L., S. ET AL, 2006. Sectoral trends in global energy use and greenhouse gas emissions. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. [En línea][citado el: 7 de junio 2011]. Disponible en web <<http://ies.lbl.gov/iespubs/56144.pdf> >.
- ROCHE P., 2010. Calculating green house gas emissions for buildings: analysis of the performance of several carbon counting tools in different climates. *Informes de la Construcción*. 62(517)61-80 March 2010.
- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). “Guidelines for Life Cycle Assesment: A “Code of Practice”. 1993.
- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). “Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment”. 1996.
- SALAT, S. (2009). Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. *Building Research & Information*, 37(5), 598.
- SARTORI I , HESTNES A.2007. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*. 39(8): 249-257. March 2007.
- SCARPELLINI S., ZABALZA I., ARANDA A., LLERA E., DÍAZ S., GLAUMANN M., MALMQVIST T. 2009. Life cycle assessment in buildings: the ENSLIC simplified method and guidelines. 5th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 29 September – 3 October 2009, Dubrovnik, Croatia.
- SUSTAINABILITY REPORT 2009 EUROPEAN ECONOMY. [En línea][citado el: 2 de agosto 2010]. Disponible en web <http://ec.europa.eu/economy_finance/publications/publication15998_en.pdf>
- THORMARK C. 2002. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment* 2002;37: 429-435.

Bibliografía

- THORMARK C. 2006. The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment*. 41(8): 1019-1026. August 2006.
- TREBILCOCK AND DÍAZ, 2012. Manual Diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos. INNOVA CORFO CHILE. Capítulo 1, 3 y 4. ISBN 978-956-8070-04-5.
- TRINIUS W. AND BORG, M. 1999. Influence of life Cycle Allocation and valuation on LCA results. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, Vol. 1, Stockholm April 1999.
- UNEP, Buildings and Climate Change Summary for Decision-Makers., 2009. [En línea][citado el: 7 de junio 2011]. Disponible en web <<http://ies.lbl.gov/iespubs/56144.pdf> >.
- UNEP, Life Cycle Inventory Programme. [En línea][citado el: 10 de junio 2011]. Disponible en web <http://www.unep.org/publications/contents/pub_details_search.asp?ID=6236,2011>
- VALDEZ, 2013. Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. ISNB en trámite, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí p37-43.
- VAN HALEN C., VISSERS P., COPIUS E., OSSET P., GAYMARD S., SCHUURMANS A. 2002 Comparative study of national schemes aiming to analyse the problems of LCA tools and the environmental aspects in the harmonised standards. PriceWaterhouseCoopers, 2002.
- VERBEECK G., HENS H. 2010 From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings* 42(6): 815-821. June 2010
- WADEL G., AVELLANEDA J., CUCHÍ A. 2010. Sustainability in industrialized architecture: closing the materials cycle. *Informes de la Construcción*. 62(517): 37-51, January 2010.
- WENDEHORST R., VOLLENSCHAAR D. 1998. *Baustoffkunde*". 25. überarbeitete Aufl. Edition. Vincentz, Hannover.
- WOOLLEY, T., KIMMINS, S., HARRISON, P., HARRISSON, R. 1997 *Green Building Handbook V1*. London: E & FN Spon. ISBN 0-203-47740-5. EEUU P 365.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND WORLD RESOURCES. 2009. Institute. Greenhouse Gas Protocol. [En línea][citado el: 5 de julio 2010]. Disponible en web <<http://www.ghgprotocol.org>>.
- XIADONG Y, 2009. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*. Vol 45 (3) Elsevier.
- YOHANIS, Y., NORTON, B. 2007. Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK" *Energy* 2002;27:77-92: The case of EcoEffect". *Building and Environment* 2007;42(3):1458-1464

Bibliografía

- ZABALZA I., ARANDA A., SCARPELLINI S., LLERA E., MARTÍNEZ A. 2009. Energías renovables en Aragón. Editado por Cámara de Comercio e Industria de Zaragoza, Confederación de Empresarios de Aragón y Caja de Ahorros de la Inmaculada. ISBN 978-84-87807-37-4. Zaragoza. [En línea][citado el: 12 de agosto 2010]. Disponible en web
<http://www.camarazaragoza.com/docs/Energias_renovables_Aragon_12272.pdf>
- ZABALZA, I., ARANDA, A., SCARPELLINI, S., 2006. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*. 41(5): 669-675. May 2006
- ZABALZA, I., ARANDA, A., SCARPELLINI, S., Díaz S.2009. Life cycle assessment in building sector: State of the art and assessment of the environmental impact of the building materials. 1st International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium ELCAS, 4-6 June, 2009b, Nisyros, Greece.
- ZABALZA, I., ARANDA A. 2009. Energía solar térmica”. Colección de Textos Docentes nº 141. Serie Energías renovables. ISBN: 978-84-92521-72-2. Prensas Universitarias de Zaragoza, 2009.
- ZABALZA I., ARANDA A., SCARPELLINI S.2009. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment* 2009a; 44:2510-20.
- ZABALZA I, 2010. Proyecto EnerBuiLCA: Desarrollo de una base de datos y una herramienta de análisis de ciclo de vida de edificios adaptada a la región sudoeste de Europa.2010.Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). [En línea][citado el: 21 de enero 2011]. Disponible en web
<<http://www.conama2012.conama.org/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=86&id=226&op=view&tipo=C>>.
- ZABALZA, I. 2009. Adaptación metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza - Departamento de Ingeniería Mecánica.
- ZABALETA, H. 1988. Compendio de Tecnología del Hormigón. Publicaciones Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (ICH). 143 pp.
- ZAROR, C. 2002. Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos. ISBN 956-227-252-4. 2a ed. Monografías Universidad de Concepción.

Bibliografía

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Listado de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1-1: REPRESENTACIÓN CICLO DE LOS MATERIALES, CUCHÍ 2009	14
ILUSTRACIÓN 1-2: CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO, ZABALZA 2012.....	16
ILUSTRACIÓN 1-3: ESQUEMA EDIFICIO COMO MULTIPRODUCTO, (CARVALHO, 2011).....	18
ILUSTRACIÓN 1-4: PROYECCIÓN DEMANDA ENERGÉTICA CHILE AL 2030, (MINENERGIA, 2012).	21
ILUSTRACIÓN 1-5: CONSUMO DE ENERGÍA V/S CRECIMIENTO ECONÓMICO EN CHILE Y PAÍSES DELA OECD.	21
ILUSTRACIÓN 1-6: PLAN NACIONAL DE ACCIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2010- 2020 (MINENERGIA, 2012)	22
ILUSTRACIÓN 1-7: EMISIONES HISTÓRICAS (1971-2000) Y PROYECTADAS (2000–2030) ASOCIADAS AL USO DE LOS EDIFICIOS SEGÚN DIVERSOS ESCENARIOS. (PRICE, L., 2006).....	25
ILUSTRACIÓN 1-8: DIAGRAMA DE FLUJO DE EDIFICIOS LC–ZEB (HERNÁNDEZ AND KENNY, 2009).....	29
ILUSTRACIÓN 1-9: CASOS GENÉRICOS DE EDIFICIOS CON ESTÁNDAR LC –ZEB (HERNÁNDEZ AND KENNY, 2009).....	30
ILUSTRACIÓN 2-1: ESTRUCTURA DE ACV. ISO 14.040–2006.....	51
ILUSTRACIÓN 2-2: ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO SEGÚN EL ESTÁNDAR PREN 15643-2 DEL CEN/TC 350.	54
ILUSTRACIÓN 2-3: INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA APLICADO A UN PROCESO UNITARIO DEL SISTEMA (PROYECTO ENERBUILCA, 2015)	56
ILUSTRACIÓN 2-4: FASES DE CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA EICV. CATEGORÍA DE IMPACTO: CALENTAMIENTO GLOBAL (CIRCE, 2012).....	60
ILUSTRACIÓN 2-5: RELACIÓN ENTRE OPCIONES DE DISEÑO DE UN EDIFICIO FRENTE A LA DISPONIBILIDAD DE DATOS DURANTE EL PROCESO DE DISEÑO (CIRCE, 2010)	64
ILUSTRACIÓN 2-6: RELACIÓN ENTRE CASOS DE APLICACIÓN Y ETAPA DE CICLO DE VIDA DEL EDIFICIO (EN 15978, 2011)	65
ILUSTRACIÓN 3-1: CONTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA INCORPORADA Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE MATERIALES, PARA CONSTRUIR 1 M ² DE CONSTRUCCIÓN ESTÁNDAR (ZABALZA, 2009)	95
ILUSTRACIÓN 3-2: FLUJO DE PROCESOS MADERA ASERRADA PLANTA ESTUDIADA (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	101
ILUSTRACIÓN 3-3: FLUJO DE PRODUCCIÓN UTILIZADA EN EL ICV, (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	102
ILUSTRACIÓN 3-4: DISTRIBUCIÓN MENSUAL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	105
ILUSTRACIÓN 3-5: FLUJO DE PRODUCCIÓN PROCESO ESTUDIO (PARTE 1): BALANCE VOLUMÉTRICO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	108
ILUSTRACIÓN 3-6: FLUJO DE PRODUCCIÓN PARTE 2-3 Y 4 BALANCE DE VOLUMÉTRICO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	109
ILUSTRACIÓN 3-7: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE CONSUMO DE ROLLIZOS POR RANGOS DE KILOMETRAJE (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	110
ILUSTRACIÓN 3-8: DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE VERSUS PRODUCCIÓN O METROS CÚBICOS MOVILIZADOS, EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	111
ILUSTRACIÓN 3-9: DISTRIBUCIÓN CONSUMO DIÉSEL (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	112
ILUSTRACIÓN 3-10: VALIDACIÓN FLUJO DE PRODUCCIÓN MEDIANTE TRIANGULACIÓN DE DATOS, EN PORCENTAJE DEL CONSUMO TOTAL ANUAL (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	113
ILUSTRACIÓN 3-11: FLUJO PRODUCCIÓN Y ENERGÍA POR PRODUCTO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	120
ILUSTRACIÓN 3-12: SENSIBILIZACIÓN CONSUMO ENERGÉTICO – FLUJO ELÉCTRICO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	126
ILUSTRACIÓN 3-13: COMPARACIÓN DE DISTRIBUCIÓN FLUJOS ENERGÉTICOS POTENCIAL, POR ASIGNACIÓN DE FLUJO POR VOLUMEN DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE FLUJO POR VOLUMEN Y COSTO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	128
ILUSTRACIÓN 3-14: GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EMITIDOS POR EFECTO DE LA ACTIVIDAD, EMISIONES DE CO ₂	134
ILUSTRACIÓN 3-15: DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO FABRICACIÓN ESTUDIADO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	141
ILUSTRACIÓN 3-16: CONSUMO TOTAL DE MATERIAS PRIMAS (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	144
ILUSTRACIÓN 3-17: CONSUMO TOTAL DE COMBUSTIBLES TON/AÑO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	145
ILUSTRACIÓN 3-18: CONSUMO ELECTRICIDAD SIC PROCESO PRODUCTIVO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	145
ILUSTRACIÓN 3-19: SALIDAS PRODUCTOS - PROCESO PRODUCCIÓN CEMENTO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	147
ILUSTRACIÓN 3-20: CONSUMOS ENERGÉTICOS POR PROCESO UNITARIO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	151

Listado de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 3-21: DETALLE CONSUMO POR TIPO DE COMBUSTIBLE DENTRO PLANTA (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	151
ILUSTRACIÓN 3-22: EMISIONES TOTALES DE CO ₂ PROCESOS UNITARIOS - AÑO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	152
ILUSTRACIÓN 3-23: DETALLE EMISIONES POR TIPO DE COMBUSTIBLE (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	153
ILUSTRACIÓN 3-24: DIAGRAMA DE FLUJO PROCESOS UNITARIOS ECV CEMENTO SIDERÚRGICO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	154
ILUSTRACIÓN 3-25: MATERIALIDADES, (INE, 2007)	158
ILUSTRACIÓN 3-26: ESQUEMA CICLO DE VIDA HORMIGÓN PREMEZCLADO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	159
ILUSTRACIÓN 3-27: DIAGRAMA FLUJO PROCESO PRODUCTIVO HORMIGÓN PREMEZCLADO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	161
ILUSTRACIÓN 3-28: CONSUMO CEMENTO AÑO 2010 (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	163
ILUSTRACIÓN 3-29: CONSUMO GRAVA 40 MM (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	163
ILUSTRACIÓN 3-30: CONSUMO GRAVILLA 20 MM (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	164
ILUSTRACIÓN 3-31: CONSUMO ARENA 5 MM (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	164
ILUSTRACIÓN 3-32: CONSUMO ADITIVOS QUÍMICOS (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	165
ILUSTRACIÓN 3-33: CONSUMO DE COMBUSTIBLE TRANSPORTE INDIRECTO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	166
ILUSTRACIÓN 3-34: CONSUMO DE COMBUSTIBLE TRANSPORTE INDIRECTO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	167
ILUSTRACIÓN 3-35: CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA AÑO 2010 (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	168
ILUSTRACIÓN 3-36: PRODUCCIÓN ANUAL HORMIGÓN PREMEZCLADO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	169
ILUSTRACIÓN 3-37: CONSUMO ENERGÍA MENSUAL ASOCIADA AL PROCESO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	171
ILUSTRACIÓN 3-38: PORCENTAJE DE LAS ENERGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA, 2010) ..	171
ILUSTRACIÓN 3-39: COMPARACIÓN ENERGÍAS CONTENIDAS MENSUALES (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	172
ILUSTRACIÓN 3-40: INCREMENTO DE ENERGÍA POR ACTIVIDAD (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	177
ILUSTRACIÓN 3-41: VARIACIÓN DE ENERGÍA CONTENIDA SEGÚN PODERES CALORÍFICOS (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	177
ILUSTRACIÓN 3-42: EMISIONES CO ₂ TRANSPORTE - ANÁLISIS SENSIBILIDAD (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	178
ILUSTRACIÓN 3-43: VARIACIÓN PODERES CALORÍFICOS (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	179
ILUSTRACIÓN 3-44: BALANCE MASAS ICV HORMIGÓN PREMEZCLADO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	180
ILUSTRACIÓN 3-45: DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO FABRICACIÓN LADRILLO CERÁMICO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	188
ILUSTRACIÓN 3-46: PRODUCCIONES MENSUALES SANSÓN 7 Y MEDIA GEOMÉTRICA CORRESPONDIENTE (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	189
ILUSTRACIÓN 3-47: PRODUCCIONES MENSUALES SANSÓN 10 Y MEDIA GEOMÉTRICA CORRESPONDIENTE (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	190
ILUSTRACIÓN 3-48: DIFERENCIA ENTRE ENERGÍA CONTENIDA PODER CALORÍFICO INFERIOR Y SUPERIOR (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	196
ILUSTRACIÓN 3-49: COMPARACIÓN DE CONSUMOS ENERGÉTICOS POR PROCESO UNITARIO (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	197
ILUSTRACIÓN 3-50: PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LA ENERGÍA EN PROCESOS UNITARIOS EN 1 KG DE LADRILLO	197
ILUSTRACIÓN 4-1: CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO - VIVIENDA (BUSTAMANTE, 2009).....	209
ILUSTRACIÓN 4-2: SISTEMA PRODUCTO - CARGAS AMBIENTALES (ISO 14.040, 2006).....	209
ILUSTRACIÓN 4-3: EJEMPLO DE UN GRUPO DE PROCESOS UNITARIOS PARA UN ACVS DE UNA VIVIENDA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	210
ILUSTRACIÓN 4-4: RELACIÓN DE SISTEMA PRODUCTO CON PROCESOS UNITARIOS INTERRELACIONADOS POR FLUJOS INTERMEDIOS Y ELEMENTALES, CON EL MEDIO AMBIENTE. (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	211
ILUSTRACIÓN 4-5: PLANOS PLANTA VIVIENDA TIPO FSV - CASO ESTUDIO (MINVU, 2012) 2012	213
ILUSTRACIÓN 4-6: CORTE Y ELEVACIÓN LATERAL-VIVIENDA TIPO FSV - CASO ESTUDIO (MINVU, 2012)	214
ILUSTRACIÓN 4-7: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LA PARTICIPACIÓN EN PESO (KG) DE LAS PARTIDAS DE FUNDACIONES Y ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	218

Listado de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 4-8: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL EN PARTICIPACIÓN DE ENERGÍA CONTENIDA (MJ) EN LAS PARTIDAS DE FUNDACIONES Y ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	218
ILUSTRACIÓN 4-9: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL EN PARTICIPACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO (MJ) EN LAS PARTIDAS DE FUNDACIONES Y ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	219
ILUSTRACIÓN 4-10: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL EN PARTICIPACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO COMBUSTIBLE (MJ) EN LAS PARTIDAS DE FUNDACIONES Y ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	220
ILUSTRACIÓN 4-11: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL EN PARTICIPACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO (KG CO ₂) PRODUCIDA POR EL CONSUMO DE ENERGÍAS (ELÉCTRICA Y COMBUSTIBLE) EN LAS PARTIDAS DE FUNDACIÓN Y ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	220
ILUSTRACIÓN 4-12: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL COMPARATIVA ENTRE EL PESO (KG) V/S LA ENERGÍA CONTENIDA (MJ) DE LAS PARTIDAS DE FUNDACIÓN Y ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	221
ILUSTRACIÓN 4-13: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL COMPARATIVA ENTRE EL PESO (KG/M ²) V/S LA ENERGÍA CONTENIDA (MJ/M ²) DE LAS PARTIDAS DE FUNDACIÓN Y ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	222
ILUSTRACIÓN 4-14: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL COMPARATIVA ENTRE EL PESO (KG) V/S EL CONSUMO ENERGÉTICO (MJ Y LITROS) DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	223
ILUSTRACIÓN 4-15: DISTRIBUCIÓN COMPARATIVA ENTRE EL PESO (KG/M ²) DE LOS MATERIALES V/S EL CONSUMO ELÉCTRICO (MJ/M ²) Y COMBUSTIBLE (LITRO/M ²) PRODUCIDO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	223
ILUSTRACIÓN 4-16: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL COMPARATIVA ENTRE EL CONSUMO ENERGÉTICO (ELÉCTRICO Y COMBUSTIBLE) (MJ) V/S SU HUELLA DE CARBONO EMITIDA (KG CO ₂ /M ²). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	224
ILUSTRACIÓN 4-17: DISTRIBUCIÓN COMPARATIVA ENTRE LA HUELLA DE CARBONO (KG CO ₂ /M ²) V/S HUELLA DE CARBONO COMBUSTIBLE (KG CO ₂ /M ²) (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	225
ILUSTRACIÓN 4-18: DISTRIBUCIÓN COMPARATIVA ENTRE EL CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO (MJ/M ²) V/S SU HUELLA DE CARBONO EMITIDA (KG CO ₂ /M ²). (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA,2012).....	225
ILUSTRACIÓN 4-19: DISTRIBUCIÓN COMPARATIVA ENTRE EL CONSUMO COMBUSTIBLE (LITROS/M ²) DE LOS MATERIALES V/S SU HUELLA DE CARBONO EMITIDA (KG CO ₂ /M ²) DURANTE LA FASE DE CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	226
ILUSTRACIÓN 4-20: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL COMPARATIVA ENTRE LA ENERGÍA CONTENIDA (MJ /M ²) DE LOS MATERIALES V/S EL CONSUMO ENERGÉTICO (ELÉCTRICO MJ/M Y COMBUSTIBLE LITROS/M ²) REQUERIDO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	226
ILUSTRACIÓN 4-21: DISTRIBUCIÓN COMPARATIVA ENTRE LA ENERGÍA CONTENIDA (MJ/M ²) DE LOS MATERIALES V/S EL CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO (MJ/M ²) REQUERIDO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA TIPO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	227
ILUSTRACIÓN 4-22: PORCENTAJE DE LA ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA EN LA EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA SIMPLIFICADO DE UNA VIVIENDA - CASO ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	228
ILUSTRACIÓN 5-1: VIVIENDA FSV. REGIÓN DE LA ARAUCANÍA (CITEC UBB, 2010).....	237
ILUSTRACIÓN 5-2: ELEVACIÓN FRONTAL Y POSTERIOR CASO ESTUDIO (CITEC UBB, 2011).....	238
ILUSTRACIÓN 5-3: ELEVACIÓN LATERALES CASO ESTUDIO (CITEC UBB, 2011).....	238
ILUSTRACIÓN 5-4: ELEVACIÓN LATERALES CASO ESTUDIO (CITEC UBB, 2011).....	239
ILUSTRACIÓN 5-5: DETALLE MURO HORMIGÓN ARMADO SOLUCIÓN MINVU (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	244
ILUSTRACIÓN 5-6: DETALLE MURO ALBAÑILERÍA SOLUCIÓN MINVU (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	245
ILUSTRACIÓN 5-7: DETALLE MURO MADERA SOLUCIÓN MINVU (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	246
ILUSTRACIÓN 5-8: DETALLE SOLUCIÓN TECHUMBRE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	247
ILUSTRACIÓN 5-9: DETALLE SOLUCIÓN MURO 2 LÍNEA BASE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	247

Listado de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 5-10: DETALLE SOLUCIÓN MURO 2 LÍNEA BASE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	248
ILUSTRACIÓN 5-11: DISTRIBUCIONES PORCENTUALES ENTRE PESO, ENERGÍA CONTENIDA Y HUELLA DE CARBONO CORRESPONDIENTE A LA SOLUCIÓN M1: HORMIGÓN ARMADO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	256
ILUSTRACIÓN 5-12: VARIACIÓN PORCENTUAL AUMENTO DE LA AISLACIÓN EN 20MM PARA M1: HORMIGÓN ARMADO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	256
ILUSTRACIÓN 5-13: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL ENTRE EL PESO, LA ENERGÍA CONTENIDA Y LA HUELLA DE CARBONO CORRESPONDIENTE A LA SOLUCIÓN M 2 DE ALBAÑILERÍA DE LADRILLO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	257
ILUSTRACIÓN 5-14: VARIACIÓN PORCENTUAL AUMENTO DE LA AISLACIÓN EN 20MM PARA LA SOLUCIÓN M2: ALBAÑILERÍA DE LADRILLO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	258
ILUSTRACIÓN 5-15: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL EL PESO, ENERGÍA CONTENIDA Y HUELLA DE CARBONO CORRESPONDIENTE A LA SOLUCIÓN M3 DE MADERA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	258
ILUSTRACIÓN 5-16: VARIACIÓN PORCENTUAL AUMENTO DE LA AISLACIÓN EN 20MM PARA SOLUCIÓN M3 MURO DE MADERA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	259
ILUSTRACIÓN 5-17: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS SOLUCIONES DE MURO DE HORMIGÓN, ALBAÑILERÍA Y MADERA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	260
ILUSTRACIÓN 5-18: DISTRIBUCIÓN COMPARATIVA ENTRE LA VENTANA DE PVC V/S VENTANA DE ALUMINIO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	261
ILUSTRACIÓN 5-19: PARTICIPACIÓN EN PESO, ENERGÍA Y HUELLA DE CARBONO, CORRESPONDIENTE A LOS ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE Y FUNDACIONES DEL ESTUDIO DE CASO: M1V1E1 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	263
ILUSTRACIÓN 5-20: PARTICIPACIÓN EN PESO, ENERGÍA Y HUELLA DE CARBONO, CORRESPONDIENTE A LOS ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE Y FUNDACIONES DEL ESTUDIO DE CASO: M2V1E1 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	263
ILUSTRACIÓN 5-21: PARTICIPACIÓN EN PESO, ENERGÍA Y HUELLA DE CARBONO, CORRESPONDIENTE A LOS ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE Y FUNDACIONES DEL ESTUDIO DE CASO: M3V1E1 (ELABORACIÓN PROPIA)	263
ILUSTRACIÓN 5-22: DEMANDA ANUAL CALEFACCIÓN CASO ESTUDIO C FD M1 V1 E1 v/s T FD M1 V1 E1 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	268
ILUSTRACIÓN 5-23: ORIENTACIÓN VIVIENDA CASO ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	269
ILUSTRACIÓN 5-24: IDEAL Y ÓPTIMO ESPESOR DE AISLAMIENTO (CIEMAT, 2012)	273
ILUSTRACIÓN 5-25: RELACIÓN ENERGÍA CONTENIDA V/S EMISIONES DE CO ₂ - ENVOLVENTE LÍNEA BASE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	275
ILUSTRACIÓN 5-26: ENERGÍA CONTENIDA V/S EMISIONES CO ₂ - SOLUCIONES ENVOLVENTE TÉRMICA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	276
ILUSTRACIÓN 5-27: DEMANDA ENERGÉTICA V/S EMISIONES CO ₂ - ZONA 4 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	277
ILUSTRACIÓN 5-28: DEMANDA ENERGÉTICA V/S EMISIONES CO ₂ - ZONA 5 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	278
ILUSTRACIÓN 5-29: ANÁLISIS COMPARATIVO ENERGÍA CONTENIDA ECV LÍNEA BASE V/S ENVOLVENTES TÉRMICAS (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	287
ILUSTRACIÓN 5-30: ANÁLISIS COMPARATIVO EMISIONES DE CO ₂ ECV LÍNEA BASE V/S ENVOLVENTES TÉRMICAS (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	290
ILUSTRACIÓN 5-31: EMISIONES DE CO ₂ V/S LÍNEA BASE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	291
ILUSTRACIÓN 5-32: TRANSMITANCIA TÉRMICA ENVOLVENTE V/S EMISIONES DE CO ₂ (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	292

Listado de Ilustraciones

LISTADO DE TABLAS

Listado de Tablas

TABLA 1-1: EMISIONES DE CO ₂ -EQ PROVENIENTES DEL SECTOR DE ENERGÍA, POCH AMBIENTAL, 2010	23
TABLA 2-1: CATEGORÍAS DE IMPACTO SUGERIDAS PARA ACV EN EDIFICIOS. (CEN/TC 350, 2008; ILOMÁKI A., 2009).....	55
TABLA 2-2: PRINCIPALES CATEGORÍAS DE IMPACTO (SETAC, 1993)	58
TABLA 2-3: PRINCIPALES METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CICLO DE VIDA, (CIRCE, 2012).....	62
TABLA 2-4: PRINCIPALES BASES DE DATOS PARA ESTUDIOS ACV (CIRCE, 2012).....	70
TABLA 2-5: PRINCIPALES DAP PARA EL SECTOR EDIFICACIÓN A NIVEL MUNDIAL (ENERBUILCA, 2012)	73
TABLA 2-6: HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS DE USO GENERAL PARA ACV (ZABALZA, 2010)	77
TABLA 2-7: APLICACIONES DEL ACV ADAPTADAS PARA EL USO DE EDIFICIOS (PROYECTO CÍCLOPE, 2011).....	78
TABLA 3-1: UNIDADES FUNCIONALES PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ESTUDIADOS (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	97
TABLA 3-2: RESUMEN CONSUMOS ENERGÉTICOS ANUALES (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	114
TABLA 3-3: ENERGÍA CONTENIDA POR PRODUCTO O SUBPRODUCTO POR (M ³) (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	116
TABLA 3-4: CONSUMO ENERGÉTICO CORRESPONDIENTE A UN ASERRADERO PRIMARIO PARA LA PRODUCCIÓN “MADERA ASERRADA SECA” (PERAZA, 1981)	121
TABLA 3-5: COMPARACIÓN ENERGÍA ACUMULADA PARA LA PRODUCCIÓN DE 1 (M ³) DE MADERA CEPILLADA, SECA BLANDA, REALIZADOS POR EL CORRIM (PUETTMAN EL AL.,2009)	122
TABLA 3-6: CONSUMO ENERGÉTICO CORRESPONDIENTE A UN ASERRADERO EN ESTUDIO “MADERA CEPILLADA”(ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	123
TABLA 3-7: CONSUMO ENERGÉTICO, SENSIBILIZANDO DATOS DE TRANSPORTE INTERNO, DEL ASERRADERO EN ESTUDIO “MADERA ASERRADA VERDE” CASO 1 (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	124
TABLA 3-8: CONSUMO ENERGÉTICO, SENSIBILIZANDO DATOS DE TRANSPORTE INTERNO, DEL ASERRADERO EN ESTUDIO “MADERA ASERRADA VERDE” CASO 2 (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	124
TABLA 3-9: CONSUMO ENERGÉTICO, SENSIBILIZANDO DATOS DE FLUJO ELÉCTRICO, DEL ASERRADERO EN ESTUDIO “MADERA ASERRADA VERDE” (ELABORACIÓN PROPIA, 2010)	125
TABLA 4-1: RESUMEN DATOS TOTALES DE: PESO (KG), ENERGÍA CONTENIDA (MJ), CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO Y COMBUSTIBLE (MJ) Y HUELLA DE CARBONO (KG CO ₂) DE LA FASE DE CONSTRUCCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA, 2011)	215
TABLA 4-2: RESUMEN DE LAS CANTIDADES DE PESO (KG), ENERGÍA CONTENIDA (MJ), CONSUMO ENERGÉTICO ELÉCTRICO Y COMBUSTIBLE (MJ) Y LA HUELLA DE CARBONO (KG CO ₂) POR M ² DE CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA POR PARTIDAS (ELABORACIÓN PROPIA, 2010).....	216
TABLA 4-3: RESUMEN DE LA PARTICIPACIÓN DE PORCENTAJES POR CADA PARTIDA CONSTRUCTIVA – CASO ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA, 2011).....	216
TABLA 4-4: FLUJO ENERGÉTICO, VIVIENDA CASO ESTUDIO – REGIÓN DEL BIOBÍO-CHILE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	228
TABLA 4-5: RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE MÁQUINAS Y EQUIPOS CON CONSUMO ELÉCTRICO Y COMBUSTIBLE POR OTROS DE CONSUMO SÓLO ELÉCTRICO (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	229
TABLA 4-6: HUELLA DE CARBONO DE LA ELECTRICIDAD EN CHILE AÑO 2008 (ZAROR, VEGA 2010).....	230
TABLA 4-7: RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE EL CONSUMO ELÉCTRICO SIC Y EL SING (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	230
TABLA 5-1: DESEMPEÑOS TÉCNICOS Y ESTÁNDARES RECOMENDADOS (CITEC UBB,2010)	242
TABLA 5-2: RESUMEN DE LAS VARIABLES CONSIDERADAS PARA SIMULACIÓN DEMANDA ENERGÉTICA (ELABORACIÓN PROPIA)	249
TABLA 5-3: IDENTIFICACIÓN DEL PESO, ENERGÍA CONTENIDA Y EMISIONES DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	251
TABLA 5-4: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL ENTRE EL PESO, LA ENERGÍA CONTENIDA Y LA HUELLA DE CARBONO CORRESPONDIENTE A SOLUCIÓN M1 MURO DE HORMIGÓN (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	254

Listado de Tablas

TABLA 5-5: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL ENTRE EL PESO, LA ENERGÍA CONTENIDA Y LA HUELLA DE CARBONO CORRESPONDIENTE A SOLUCIÓN M2 MURO DE ALBAÑILERÍA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	255
TABLA 5-6: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL ENTRE EL PESO, LA ENERGÍA CONTENIDA Y LA HUELLA DE CARBONO CORRESPONDIENTE A SOLUCIÓN M3 MURO DE MADERA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	255
TABLA 5-7: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL COMPARATIVA ENTRE LAS SOLUCIONES M1, M2 Y M3 DE LOS MUROS DE LA ENVOLVENTE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).	256
TABLA 5-8: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL ENTRE EL PESO, LA ENERGÍA CONTENIDA Y LA HUELLA DE CARBONO CORRESPONDIENTE A VENTANAS DE ALUMINIO Y PVC (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	261
TABLA 5-9: COMPARACIÓN DE CASOS EN CUANTO A SU PARTICIPACIÓN EN PESO, ENERGÍA Y HUELLA DE CARBONO, CORRESPONDIENTE A LOS ELEMENTOS DE SU ENVOLVENTE Y FUNDACIONES (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	262
TABLA 5-10: RESUMEN RESULTADOS DEMANDA DE CALEFACCIÓN FASE DE USO ZONA 4 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	265
TABLA 5-11: RESUMEN RESULTADOS DEMANDA DE CALEFACCIÓN FASE DE USO ZONA 5 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	266
TABLA 5-12: COMPARACIÓN DEMANDA TOTAL ENERGÍA ANUAL PARA DIFERENTES MATERIALIDADES (ENVOLVENTE, ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	270
TABLA 5-13: RELACIÓN ENERGÍA CONTENIDA V/S EMISIONES CO ₂ - SOLUCIONES ENVOLVENTE TÉRMICA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	276
TABLA 5-14: DEMANDA TOTAL ANUAL V/S EMISIÓN TOTAL ANUAL ZONA - 4 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	280
TABLA 5-15: DEMANDA TOTAL ANUAL V/S EMISIÓN TOTAL ANUAL - ZONA 5 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	281
TABLA 5-16: ACV LÍNEA BASE (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	283
TABLA 5-17: ACV - TEMUCO FACHADA A (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	284
TABLA 5-18: ACV - TEMUCO FACHADA C (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	285
TABLA 5-19: RESULTADO ECV ENERGÍA CONTENIDA LÍNEA BASE V/S SOLUCIONES ENVOLVENTES TÉRMICAS ZONA 5 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	287
TABLA 5-20: RESULTADO ECV LÍNEA BASE EMISIONES DE CO ₂ V/S SOLUCIONES ENVOLVENTES TÉRMICAS ZONA TÉRMICA 5 (ELABORACIÓN PROPIA, 2012)	290
TABLA 5-21: TRANSMITANCIA TÉRMICAS SOLUCIONES ENVOLVENTE TÉRMICA (ELABORACIÓN PROPIA, 2012).....	291
TABLA 6-1: RESULTADO DESEMPEÑO 1 PROYECTO FONDEF D09I1162.....	305
TABLA 6-2: RESULTADO DESEMPEÑO 2 PROYECTO FONDEF D09I1162.....	305

Anexos

ANEXOS

Anexos

A-1: Consumo de materias primas en la producción de 1 kg de cemento (Carvalho, 2000).

Tipo	Nomenclatura Original	Consumo de materias primas (kg)										
		Producción del clinker							Producción del cemento			
		Agua	Caliza	Marga	Arcilla	Pizarra	Óxidos férricos	Otras	Clinker	Escorias	Cenizas	Yeso
SimaPro	Cement Portland I	--	--	1,600	--	--	--	0,270	0,940	--	--	0,060
	Cement Portland	--	--	1,610	0,057	0,047	0,019	--	0,950	0,109	0,09	0,050
	Cement Hoogoven I	--	--	0,510	--	--	--	0,066	0,300	0,640	--	0,060
	Blastfurnace slag cement	--	--	0,425	0,015	0,012	0,005	--	0,250	0,729	0,024	0,050
	Portlandashcement	--	--	1,190	0,042	0,035	0,014	--	0,700	0,081	0,317	0,050
Cembureau	Cement CH	--	1,150	0,346	--	--	--	--	--	--	--	0,030
	Cement N	--	1,640	--	--	--	--	--	--	--	--	0,050
	Portlandcement NL1	1,410	1,600	--	--	--	--	--	--	--	--	0,060
	Cement S*	--	1,360	--	--	0,046	0,009	--	--	--	--	0,046
	Cement SF1	--	1,200	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Cement SF2	--	1,550	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Portlandcement A*	0,190	1,200	--	--	--	--	0,017	--	0,122	0,027	0,064
	Portlandcement NL2	1,071	--	1,045	0,028	0,066	0,019	0,047	--	0,095	0,076	0,050
	Portlandcement NL3	1,325	--	1,316	0,056	0,047	0,014	--	--	0,108	0,089	0,060
	Blastfurnace slag cement NL1	0,532	--	0,287	0,007	0,017	0,005	0,025	--	0,700	0,020	0,050
Blastfurnace slag cement NL2	0,423	--	0,420	0,018	0,015	0,004	--	--	0,675	0,285	0,060	

*Consideran los explosivos utilizados en la cantera (0,00170 y 0,00272 kg, respectivamente)

Anexos

A-2: Consumo de energía (MJ) en la producción de 1 kg de cemento (Carvalho, 2000)

Tipo	Nomenclatura	Clinker		Cemento		Suma
		térmica	electricidad	térmica	electricidad	
I	Cement Portland I	3,380 (74%)	0,196 (4%)	0,846 (19%)	0,122 (3%)	4,544 (100%)
	Cement CH	-	-	2,980 (84%)	0,557 (16%)	3,537 (100%)
	Cement N	-	-	3,850 (87%)	0,557 (13%)	4,407 (100%)
	Portlandcement NL1	3,380 (92%)	0,196 (5%)	-	0,122 (3%)	3,698 (100%)
	Cement S	-	-	4,070 (90%)	0,470 (10%)	4,540 (100%)
	Cement SF1	-	-	4,900 (92%)	0,450 (8%)	5,350 (100%)
	Cement SF2	3,770 (91%)	0,136 (3%)	0,029 (1%)	0,189 (5%)	4,124 (100%)
II	Cement Portland	3,380 (92%)	0,134 (4%)	0,032 (0%)	0,146 (4%)	3,692 (100%)
	Portlandcement A	-	-	2,810 (88%)	0,382 (12%)	3,192 (100%)
	Portlandcement NL2	-	-	2,640 (96%)	0,116 (4%)	2,756 (100%)
	Portlandcement NL3	-	-	3,380 (91%)	0,318 (9%)	3,698 (100%)
III	Cement Hoogoven I	1,080 (43%)	0,063 (2%)	1,080 (43%)	0,292 (12%)	2,515 (100%)
	Blastfurnace slag cement	0,881 (55%)	0,035 (2%)	0,120 (8%)	0,551 (35%)	1,587 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL1	-	-	0,680 (70%)	0,287 (30%)	0,967 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL2	-	-	1,080 (75%)	0,354 (25%)	1,434 (100%)
IV	Portlandashcement	2,490 (89%)	0,099 (3%)	0,042 (1%)	0,194 (7%)	2,825 (100%)

Anexos

A-3: Principales sustancias emitidas a la atmósfera en la fabricación de 1 kg de cemento (Carvalho, 2000)

Tipo	Nomenclatura Original	Emisiones al aire (gramos)			
		CO ₂	NO _x	SO ₂	Polvo
I	Cement Portland I	355,00	0,96	0,43	10,00
	Cement CH	810,00	2,00	0,60	0,30
	Cement N	813,00	2,09	0,67	0,18
	Portlandcement NL1	853,00	2,58	0,09	7,50
	Cement S	805,00	1,94	0,45	0,16
	Cement SF1	780,00	3,70	0,63	0,39
	Cement SF2	812,70	2,95	1,33	0,32
II	Portland Cement	918,30	3,11	1,16	0,24
	Portlandcement A	586,00	1,57	0,12	0,17
	Portlandcement NL2	807,00	2,95	0,09	0,19
	Portlandcement NL3	289,00	0,71	0,98	79,60
III	Blastfurnace slag cement	221,70	0,51	0,51	10,00
	Cement Hoogoven I	334,00	1,11	0,58	0,08
	Blastfurnace slag cement NL1	212,00	0,85	0,03	0,14
	Blastfurnace slag cement NL2	134,00	0,40	0,43	88,60
IV	Portlandashcement	692,90	2,33	0,90	0,18

A-4: Detalle consumo combustible dentro horno (elaboración propia, 2010).

Detalle del consumo de combustible del horno [Toneladas/ año]		2007	2008	2009	
	Combustibles fósiles convencionales	[Ton/año]	25.426,9	25.663,0	15.479,0
	Carbón	[Ton/año]	8.324	16.018,0	3.635,0
	coke de petróleo	[Ton/año]	16.661	8.650,0	11.618,0
	Fuel oil	[Ton/año]	183	733,0	0,0
	Petróleo diesel	[Ton/año]	161	195,7	156,2
	Gas natural	[1'000 Nm3/año]	98	66,2	43,1
	Esquisto	[Ton/año]	0	0,0	0,0
	lignita	[Ton/año]	0	0,0	0,0
	Combustible fósil alternativo	[Ton/año]	0,0	0,0	26,6
	Aceite usado	[Ton/año]	0,0	0,0	26,6

A-5: Detalle consumo combustible dentro horno (elaboración propia, 2010)

Detalle del consumo de combustible fuera del horno [Toneladas / año]		2007	2008	2009	
	Secado de las materias primas y componentes minerales	[Ton/año]			
	Carbón + antracita + carbón de desecho	[Ton/año]	0	0,0	0,0
	coke de petróleo	[Ton/año]	0	0,0	0,0
	Combustibles pesados (Fuel oil)	[Ton/año]	2.340	2.005,8	1.695,4
	Petróleo diesel	[Ton/año]	0	0,0	0,0
	Gas natural	[1'000 Nm3/año]	368	370,1	210,3

Anexos

A-6: Valores caloríficos de combustible proceso productivo (IPCC - 2006)

Combustibles usados en el horno, valor calorífico inferior [Gigajoule/ tonelada]		2007	2008	2009
Combustibles fósiles convencionales				
Carbón + antracita + carbón de desecho	[GJ/ton]	26,0	26,0	26,0
coke de petróleo	[GJ/ton]	33,8	33,8	33,8
Combustibles pesados (ultra)	[GJ/ton]	40,3	40,3	40,3
Petróleo diesel	[GJ/ton]	42,6	42,6	42,6
Gas natural	[GJ/1'000 Nm3]	52,5	52,5	52,5
Esquisto	[GJ/ton]	0,0	0,0	0,0
lignita	[GJ/ton]	0,0	0,0	0,0
Combustible fósil alternativo				
Aceite usado	[GJ/ton]	0,0	0,0	18,8

A-7: Factores de emisión (IPCC - 2006).

Factores de emisión de CO2 de los combustibles del horno (por el valor calorífico inferior)		
Combustibles fósiles convencionales		Año
Carbón + antracita + carbón de desecho	[kg CO2/GJ]	96,0
coke de petróleo	[kg CO2/GJ]	92,8
Combustible pesado (ultra)	[kg CO2/GJ]	77,3
Petróleo diesel	[kg CO2/GJ]	74,0
Gas natural	[kg CO2/GJ]	56,1
esquisto (Pizarra)	[kg CO2/GJ]	107,0
lignito	[kg CO2/GJ]	101,0
Combustibles fósiles alternativos		
Aceite usado	[kg CO2/GJ]	74,0
Neumáticos	[kg CO2/GJ]	85,0
plásticos	[kg CO2/GJ]	85,0
disolventes	[kg CO2/GJ]	74,0
impregnado de aserrín	[kg CO2/GJ]	75,0
residuos industriales mezclados	[kg CO2/GJ]	83,0
otros desechos a base de fósiles	[kg CO2/GJ]	80,0
Biomasa combustible		
lodos de depuradora (sewage sludge)	[kg CO2/GJ]	110
madera, aserrín no impregnado (wood, non ir	[kg CO2/GJ]	110
papel, cartón	[kg CO2/GJ]	110
arinas de origen animal	[kg CO2/GJ]	89
arinas de huesos de animal	[kg CO2/GJ]	89
grasa animal	[kg CO2/GJ]	89
agrícolas, orgánicos, pañales de residuos, el	[kg CO2/GJ]	110
otras biomásas	[kg CO2/GJ]	110

Anexos

Factores de emisión de las energías producidas externamente				
		2007	2008	2009
Factor de emisión para escoria comprada	[kg CO2/t cli]	862,0	862,0	862,0
CO2 por unidad de poder producida externamente	[kg CO2/MWh]	343,2	332,1	294,1

A-8: Emisiones a la atmósfera de cada matriz energética para diferentes países europeos (SimaPro, Pré Consultants, 1997).

Países	CO ₂	NO _x	SO _x (SO ₂)	POLVO
	g/MJ	g/MJ	g/MJ	g/MJ
AUSTRIA	80,40	0,155	0,327	0,089
FINLANDIA	112,00	0,265	0,616	0,120
HOLANDA	208,00	0,454	0,530	0,177
NORUEGA	1,19	0,003	0,006	0,001
PAISES NORDICOS	48,80	0,119	0,272	0,064
SUIZA	27,50	0,062	0,148	0,036
SUECIA	17,70	0,041	0,165	0,013
Europa-UCPTE	133,00	0,283	0,661	0,209
Electricity Holland	122,00	0,343	0,699	0,055
Electricity NI I	176,00	0,335	0,222	0,002

A-9: Emisiones de CO₂ matriz energética Chile (Vega y Zaror, 2010).

SISTEMA GENERACIÓN	Kg CO ₂ / MWh
SING	1084
SIC	461

A-10: Energía Transporte directo, cargadores frontales (elaboración propia, 2010)

Cálculo de energía aportada por el transporte directo (cargadores frontales)				
Tiempo	Consumo de petróleo [Litros]	Densidad 15°C [kg/lit]	PCI [MJ/KG]	Energía aportada [MJ]
Mensual [Media geométrica]	2.692,7	0.85	42	96.129,03
Anual	32.811,0	0.85	42	1.171.352,70

Anexos

A-11: Energía Transporte directo, camiones mixer (elaboración propia, 2010)

Cálculo de energía aportada por el transporte directo (camiones mixer)				
Tiempo	Consumo de petróleo [Litros]	Densidad 15°C [kg/lit]	PCI [MJ/KG]	Energía aportada [MJ]
Mensual [Media geométrica]	36.003,9	0.85	42	1.285.339,67
Anual	445,941.0	0.85	42	15,920,093.70

A-12: Cálculo de la energía eléctrica utilizada en el funcionamiento de las plantas dosificadoras (elaboración propia, 2010)

Cálculo de energía eléctrica.			
Tiempo	Consumo	Factor de conversión	Energía aportada [MJ]
Mensual [Media geométrica]	21.855,8	3.6	78.680,88
Anual	275.727,2	3.6	992.617,92

A-13: densidades material y producto (elaboración propia, 2010)

MATERIALES	DENSIDAD [TON/M3]
Arena	1.55
Grava	1.47
Gravilla	1.44
Aditivos	VARIABLE
Agua	1
Hormigón	2.55

A-14: Rangos de resistencias hormigones ICE (ICE, 2011)

RANGOS DE RESISTENCIA DE HORMIGONES PREMEZCLADOS	
R-1	16/20 [Mpa]
R-2	20/25 [Mpa]
R-3	25/30 [Mpa]
R-4	28/35 [Mpa]
R-5	32/40 [Mpa]
R-6	40/50 [Mpa]

Anexos

A-15: porcentajes estimados de consumo energético por actividad del ciclo de vida del hormigón premezclado (Häkkinen, T.; Vares, S.; 1998)

Transporte de materias primas %	5
Producción de hormigón %	16
Transporte de producto %	7
Total de % de energía utilizada	28

A-16: Tabla de cálculos y supuestos a contrastar ICE (elaboración propia, 2011)

Rango de hormigones	Base de datos "University BATH"		MJ/KG	KG CO2/ KG
	Energía contenida	Emisiones de co2		
R1 [Mpa]	MJ/KG	KG CO2/ KG	MJ/KG	KG CO2/ KG
R1 [Mpa]	0.70	0.093	0.20	0.03
R2 [Mpa]	0.74	0.100	0.21	0.03
R3 [Mpa]	0.78	0.106	0.22	0.03
R4 [Mpa]	0.82	0.112	0.23	0.03
R5 [Mpa]	0.88	0.123	0.25	0.03
R6 [Mpa]	1.00	0.141	0.28	0.04

A-17: Comparación de energías contenidas ICE - (elaboración propia, 2011)

Comparación entre base de datos ICE e investigación.		
Unidades	MJ/KG	[MJ/M3 anual]
Datos del ICE	0.23	547.21
Datos de la investigación	0.134	342.21

Anexos

A-18: Comparación de emisiones de CO2 ICE (elaboración propia, 2011)

Comparación entre base de datos ICE e investigación.		
Unidades	[KG CO2/ KG]	[KG CO2/ M3 anual]
Datos del ICE	0.03	74.88
Datos de la investigación	0.0101	25.85

A-19: Valores de poderes caloríficos utilizados (elaboración propia, 2011)

Poderes caloríficos			
Tipo energía	Unidad medida	PCI	PCS
Madera	Kj/Kg	14.400	19.000
Aserrín	Kj/Kg	13.400	13.400
C. Coque	Kj/Kg	29.300	33.700
Pellet	Kcal/kg	4.000	4.500
Gas licuado	Kcal/kg	10.734	11.660
Diésel	Kcal/kg	10.165	10.900

A-20: entradas desde la tecnosfera para la producción de 1 kWh en Chile (CNE, 2010).

Origen	kWh
carbón	0,3
Gas natural	0,2
petróleo	0,12
Hidroeléctrica	0,35
ERNC	0,02
Biomasa	0,01

Anexos

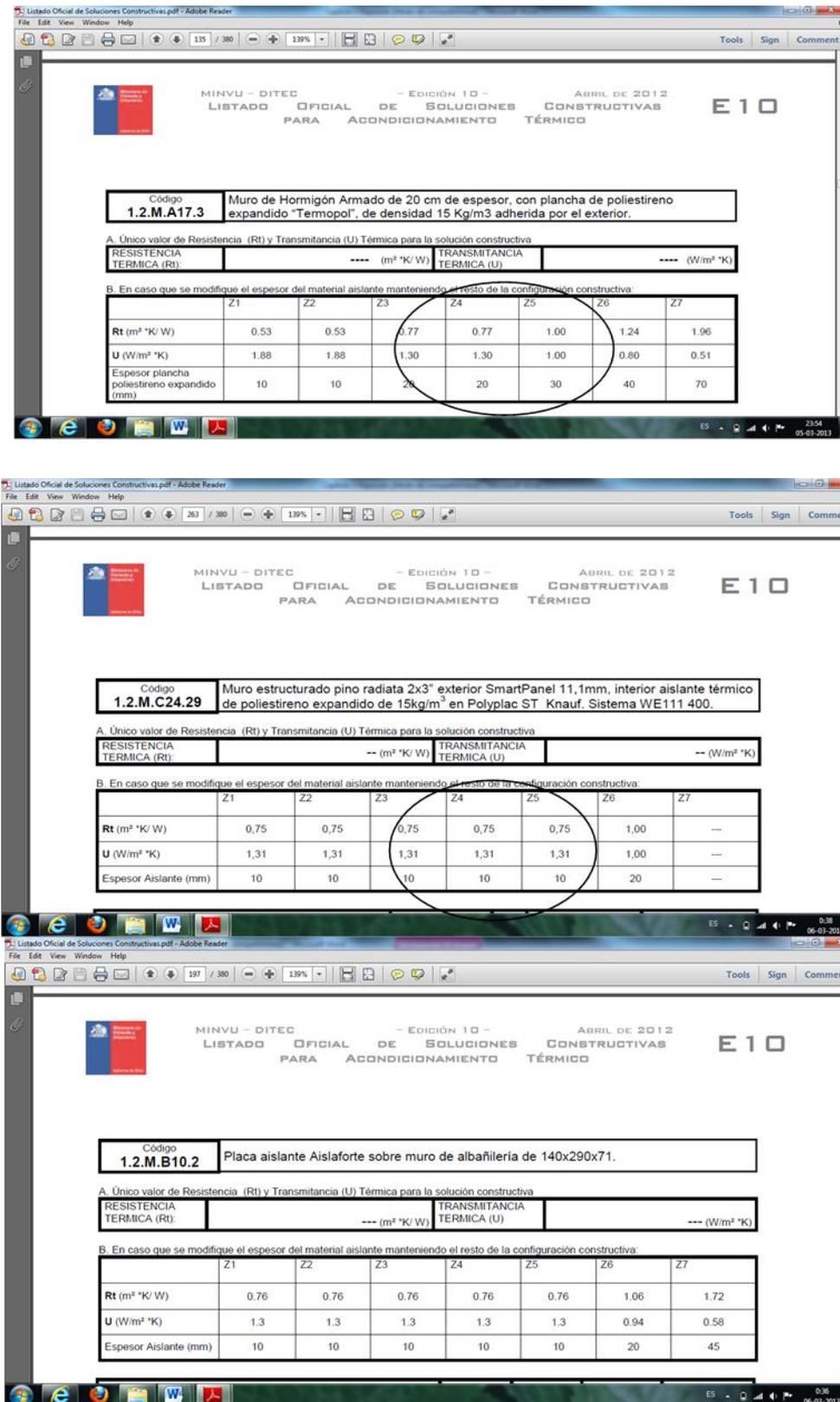
A-21: entradas desde la tecnosfera para la producción de 1 kWh en España (Zabalza, 2010).

Origen	kWh
Gas natural	0,232
Carbón, antracita	0,217
nuclear	0,20
Hidroeléctrica	0,11
Eólica	0,1
Cogeneración de turbina de gas	0,06
Carbón, lignito	0,03
Fuel-oil	0,02
Cogeneración ciclo orgánico Rankine (ORC)	0,01
Hidroeléctrica reversible	0,01
Cogeneración motor de biogas	0,006
Gas industrial	0,003
Solar fotovoltaica	0,002

A-22: Datos para el cálculo de Huella de Carbono (Zaror, 2010).

	%C	PCI (MJ/kg)	Kg CO2/kg combustible
Gas Natural	75	48	2,75
Gas Licuado	82	47	3,01
Gasolina	85	45	3,12
Diesel	85	42	3,12
Fuel Oil	85	40	3,12
Carbón mineral	68-75	26-32	2,49-2,75
Madera seca	50	17	1,83

Anexos



A-23: Fichas Soluciones del Listado Oficial Soluciones Constructivas (MINVU, 2012)

Anexos

cemento	288,75	1.090,90	303,03	240,53
Componentes constitutivos de maquinaria	-	118,68	32,97	31
gasoil	-	118,68	32,97	31
Total	2.538,55	1.522,10	422,81	288,19

Material:	poliestireno expandido	Unidad:	m2	
Descripción:	Plancha de poliestireno expandido EPS según, UNE-EN 13163 de 10 mm de espesor, de 100 kPa de tensión a la compresión, de 0,3 m2.K/W de resistencia térmica, con una cara lisa y canto liso			
Consumo	Peso	Coste energético		Emisión CO2
	Kg	MJ	kwh	Kg
Componentes constitutivos de materiales	0,2	23,4	6,5	3,45
poliestireno expandido	0,2	23,4	6,5	3,45
Total	0,2	23,4	6,5	3,45

Material:	poliestireno expandido	Unidad :	m2	
Descripción:	Plancha de poliestireno expandido EPS según, UNE-EN 13163 de 20 mm de espesor, de 60 kPa de tensión a la compresión, de 0,5 m2.K/W de resistencia térmica, con una cara lisa y canto liso			
Consumo	Peso	Coste energético		Emisión CO2
	Kg	MJ	kwh	Kg
Componentes constitutivos de materiales	0,3	35,1	9,75	5,18
poliestireno expandido	0,3	35,1	9,75	5,18
Total	0,3	35,1	9,75	5,18

Material:	poliestireno expandido	Unidad :	m2	
Descripción:	Plancha de poliestireno expandido EPS según, UNE-EN 13163 de 10 mm de espesor, de 60 kPa de tensión a la compresión, de 0,25 m2.K/W de resistencia térmica, con una cara lisa y canto liso			

Anexos

Consumo	Peso	Coste energético		Emisión CO2
	Kg	MJ	kwh	Kg
Componentes constitutivos de materiales	0,15	17,55	4,88	2,59
poliestireno expandido	0,15	17,55	4,88	2,59
Total	0,15	17,55	4,88	2,59

Material :	Vidrio		Unidad :	m2	
Descripción:	Vidrio luna incolora de espesor 5 mm				
Consumo	Peso	Costo energético		Emisión CO2	
	Kg	MJ	kwh	Kg	
Componentes constitutivos de materiales	12,5	198,75	55,21	11,75	
vidrio	12,5	198,75	55,21	11,75	
Total	12,5	198,75	55,21	11,75	

Material:	Ladrillo Cerámico		Unidad:	m3	
Descripción:	Pared estructural a dos caras vistas de 14 cm de espesor, de ladrillo perforado, HD, R-25, de 290x140x75 mm, a dos caras vistas, categoría I, según norma UNE-EN 771-1, colocado con mortero de cemento CEM II, de dosificación 1:0,25:3 (15 N/mm2) y con una resistencia a compresión de la pared de 9 N/mm2				
Consumo	Peso	Coste energético		Emisión CO2	
	Kg	MJ	kwh	Kg	
Componentes constitutivos de materiales	1.276,86	3.010,86	836,35	274,57	
agua	31,31	0,19	0,052	0,0091	
árido	208,22	31,23	8,68	1,67	
cal	18	86,8	24,11	14,94	
cemento	70,45	266,17	73,94	58,69	
cerámica	948,87	2.626,47	729,58	199,26	
Componentes constitutivos de maquinaria	-	1,7	0,47	0,25	
eléctrica	-	1,7	0,47	0,25	
Total	1.276,86	3.012,56	836,82	274,82	

Anexos

Material:	Mortero para albañilería	Unidad :	sacos	
Descripción:	Mortero para albañilería, clase M 10 (10 N/mm2)			
Consumo	Peso	Costo energético		Emisión CO2
	Kg	MJ	kwh	Kg
Componentes constitutivos de materiales	1.000,00	875,6	243,22	173
árido	800	120	33,33	6,4
cemento	200	755,6	209,89	166,6
Total	1.000,00	875,6	243,22	173

Material:	Ventana de Aluminio	Unidad:	Unidad	
Descripción:	Ventana de aluminio lacado blanco, elaborada con perfiles de precio medio, clasificación mínima 3 de permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación mínima 8A de estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación mínima C4 de resistencia al viento según UNE-EN 12210			
Consumo	Peso	Costo energético		Emisión CO2
	Kg	MJ	kwh	Kg
Componentes constitutivos de materiales	7,16	1.367,19	379,77	201,09
aluminio lacado	5,44	1.185,05	329,18	174,2
masilla de poliuretano	0,2	3,92	1,09	0,58
masilla de silicona	0,055	1,1	0,31	0,16
neopreno	1,48	177,12	49,2	26,14
Total	7,16	1.367,19	379,77	201,09

Material:	Ventana de PVC	Unidad:	Unidad	
Descripción:	Ventana de PVC no plastificado, clasificación mínima 3 de permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación mínima 8A de estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación mínima C3 de resistencia al viento según UNE-EN 12210			

Anexos

Consumo	Peso	Costo energético		Emisión CO2
		Kg	MJ	
Componentes constitutivos de materiales	10,51	718,59	199,61	97,68
acero galvanizado	2,77	115,61	32,12	8,68
masilla de poliuretano	0,2	3,92	1,09	0,58
masilla de silicona	0,055	1,1	0,31	0,16
neopreno	1,48	177,12	49,2	26,14
PVC	6,01	420,84	116,9	62,12
Total	10,51	718,59	199,61	97,68

A-26: Materiales extraídos de la base de datos de Inventory Of Carbon & Energy (ICE Versión 2.0, 2011)

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY				
Materials	Embodied Energy & Carbon Coefficients			Comments
	EE - MJ / kg	EC - kgCO2/kg	EC - kgCO2e/kg	
				EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
Cement				
Mortar (1:3 cement:sand mix)	1,33	0,208	0,221	Values estimated from the ICE Cement, Mortar & Concrete Model
Mortar (1:4)	1,11	0,171	0,182	
Mortar (1:5)	0,97	0,146	0,156	
Mortar (1:6)	0,85	0,127	0,136	
Mortar (1:½:4½ Cement:Lime:Sand mix)	1,34	0,2	0,213	
Mortar (1:1:6 Cement:Lime:Sand mix)	1,03	0,145	0,155	
Plaster				
General (Gypsum)	1,8	0,12	0,13	Problems selecting good value, inconsistent figures, West et al believe this is because of past aggregation of EE with cement.
Plasterboard	6,75	0,38	0,39	See Ref [WRAP] for further info on GWP data, including disposal impacts which are significant for Plasterboard.
Zinc				
General	53,1	2,88	3,09	Uncertain carbon estimates, currently estimated from typical UK industrial fuel mix. Recycled content of general Zinc 30%.
Virgin	72	3,9	4,18	
Recycled	9	0,49	0,52	
Concrete				
1:03:06	0,63	0,084	0,09	Non-structural mass concrete.
1:04:08	0,54	0,069	0,074	
Aggregate				
General (Gravel or Crushed Rock)	0,083	0,0048	0,0052	Estimated from measured UK industrial fuel consumption data.
Steel				
Main data source: International Iron & Steel Institute (IISI) LCA studies (www.worldsteel.org)				
UK (EU) STEEL DATA - EU average recycled content - See material profile (and Annex on recycling methods) for usage guide				
General - UK (EU) Average Recycled Content	20,1	1,37	1,46	EU 3-average recycled content of 59%. Estimated from UK's consumption mixture of types of steel (excluding stainless). All data doesn't include the final cutting of the steel products to the specified dimensions or further fabrication activities. Estimated from World Steel Association (Worldsteel) LCA data.
Virgen	35,4	2,71	2,89	

Anexos

A-27: Factores de Emisión CO-E por tipo de combustible (Fissore y Colonelli, 2009)

Combustible	CO _{2-E} (kg/kWh)
Gas licuado	0,228
Gas natural	0,202
Queroseno	0,260
Leña (*)	0,430
Electricidad	0,307

* En la práctica internacional, en algunos casos, el factor de emisión por leña no se considera, ya que se supone que el árbol ha absorbido la misma cantidad de CO₂ equivalente durante su vida, que la que va a liberar cuando se queme.