

Universidad Federal de Rio Grande do Sul
Escuela de Ingeniería
Programa de Post-Graduación en Ingeniería Civil

Análisis de la energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay

Pablo Pelufo (UDELAR)

Porto Alegre
2011

Pablo Pelufo

ANÁLISIS DE LA ENERGÍA INCORPORADA DE UN EDIFICIO EN ALTURA EN URUGUAY

Tesis presentada en el Programa de Maestría Interinstitucional (MINTER) entre la Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRGS - NORIE) y la Universidad de la República (UDELAR-Farq), como parte de los requisitos para obtener el Título de “Master en Construcción de Obras de Arquitectura”. Orientación: Prof. Miguel Aloysio Sattler, Ph.D.

Porto Alegre

2011

A María Noel y a Constanza

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi orientador Miguel Sattler.

A Walter Kruk, a Tony, y a la empresa Consur.

A Adriana Vidal y a los copropietarios del edificio Copeclub CEA III.

A Carlos Formoso, Alicia Mimbacas, Joao Masuero, Eugenia Kuhn, y a los docentes del Programa de Maestría Interinstitucional de la UFRGS y de la UDELAR.

A Gabriela Pacheco, Dayna Zaclicever y Craig Jones.

A Andrea Camaño, Ariel Ruchansky y Leonardo López.

A Lucía Pelufo, Carlos Stapff, Mario Fernández, Eduardo Pellegrino, Miguel Bardier y Santiago Sevrini.

A mis padres.

A Jimena.

A técnicos de la DNE, del BCU, de OSE y de empresas privadas que han proporcionado información y ayuda para este trabajo, y cuyos nombres no supe o no recuerdo.

RESUMEN

Peluffo, Pablo. **Energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay**, 2011. 171 p. Tesis (Maestría Interinstitucional en Construcción de Obras de Arquitectura). MINTER, Universidad Federal de Río Grande del Sur (Brasil) – Facultad de Arquitectura, Universidad de la República (Uruguay), Porto Alegre, 2011.

La creciente demanda a nivel mundial, de energía proveniente en gran medida de fuentes contaminantes, genera un severo impacto ambiental. Las edificaciones consumen aproximadamente el 37 por ciento de la energía global total, durante su construcción en la forma de energía incorporada y durante su operación como energía operacional. En Uruguay, las actuales políticas de eficiencia energética están enfocadas específicamente hacia la energía operacional. En función de ello, el presente trabajo se propuso realizar un análisis energético para evaluar la relevancia de la energía incorporada en un edificio en altura en Uruguay en relación con su energía operacional, y analizar alternativas constructivas tradicionales en los rubros más significativos. La metodología consistió en desarrollar un análisis de proceso en una edificación seleccionada para calcular su energía incorporada. Se estimaron luego su energía incorporada recurrente y final, y se realizó un levantamiento de datos en el sitio, a fin de determinar la energía operacional, en el marco de un análisis energético de ciclo de vida. La encuesta incluyó información sobre la energía consumida por los usuarios en la operación de vehículo propio, la cual se utilizó como parámetro de comparación. Se comparó la energía incorporada con la energía operacional y se analizó el período de retorno energético. Se propusieron alternativas constructivas para la estructura de hormigón armado y para la mampostería de ladrillo. Se calculó la energía incorporada inicial de las alternativas propuestas, y se evaluó su incidencia en la energía incorporada total. Los valores de energía incorporada inicial demostraron ser relevantes al compararlos con la energía operacional, resultando equivalentes a aproximadamente diecinueve años de operación del edificio, y a veintiún años de consumo de combustible en vehículos propios. Se concluyó asimismo que las propuestas realizadas para la estructura representan una reducción poco significativa, en tanto que las alternativas calculadas para la mampostería fueron relevantes para la disminución de la energía incorporada total. Finalmente se sugieren líneas de trabajo para la determinación de las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la energía incorporada, así como la generación de datos a nivel nacional sobre índices energéticos y de tasas de reposición de materiales a lo largo de la vida útil de los edificios, a fin de mejorar los análisis de ciclo de vida energéticos.

Palabras llave: energía incorporada; energía operacional; alternativas constructivas

ABSTRACT

Pelufó, Pablo. **Energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay**, 2011. 171 p. Tesis (Maestría Interinstitucional en Construcción de Obras de Arquitectura). MINTER, Universidad Federal de Río Grande del Sur (Brasil) – Facultad de Arquitectura, Universidad de la República (Uruguay), Porto Alegre, 2011.

Increasing global demand for energy, supplied primarily by polluting sources, generates severe environmental impacts. Buildings consume approximately 37 percent of total global energy, during the construction phase in the form of embodied energy and during the operation phase as operating energy. In Uruguay, current policies for energy efficiency are focused specifically on operational energy. On that basis, the present study intended to perform an energy analysis to assess the significance of embodied energy of a multi storied building in Uruguay compared to parameters of operational energy, and analyze traditional constructive alternatives in the most significant items. The methodology consisted of a process analysis on a selected building to calculate its initial embodied energy. Then recurrent and final embodied energy were estimated and on site collection of data was performed to assess operational energy, in the framework of a life cycle energy analysis. The survey included data on energy consumed by users for their own vehicles operation, which was used as a comparative parameter. Embodied energy was then compared to operational energy and energy payback period was calculated. Typical constructive alternatives were proposed for reinforced concrete structure and brick masonry. Initial embodied energy of alternatives was computed, and its impact on total embodied energy was assessed. Embodied energy values proved to be significant when compared with operational energy. Results showed that embodied energy was equivalent to about nineteen years of operation of the building, and twenty one years of users' own vehicles fuel consumption. It was also concluded that the proposed alternatives for the structure did not represent a significant reduction, while for masonry meant a substantial decrease in total embodied energy. Finally lines of work were suggested for estimating carbon dioxide emissions derived from embodied energy, as well as for national data generation on materials energy intensities and materials replacement rates over the life of buildings, in order to improve life cycle energy analysis.

Keywords: embodied energy; operational energy; constructive alternatives

SIGLAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ACVE	Análisis de Ciclo de Vida Energético
AE	Análisis energético
ANV	Agencia Nacional de Vivienda
BEE	Bill of Embodied Energy
CBC	Ceniza de bagazo de caña
CIB	Conseil International du Bâtiment
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DNE	Dirección Nacional de Energía
DINAMA	Dirección Nacional de Medio Ambiente
EEA	European Environment Agency
EI	Energía incorporada
EIA	United States Energy Information Administration
EIO	Energy International Outlook
EMSD	Electrical and Mechanical Service Department Hong Kong
FARQ	Facultad de Arquitectura (Universidad de la República)
GER	Gross Energy Requirement
ICE	Instituto de la Construcción de Edificios
IEA	International Energy Agency
IFIAS	International Federation of Institutes for Advanced Study
IMM	Intendencia Municipal de Montevideo
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
MIP	Matriz insumo producto
MVOTMA	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PER	Process Energy Requirement
TEP	Toneladas equivalentes de petróleo
UNEP	United Nations Environmental Programme
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Emisiones de dióxido de carbono por región.....	26
Figura 2: Estructura del consumo energético en Uruguay, por fuente	27
Figura 3: Estructura del consumo de energía en Uruguay, por sector.....	28
Figura 4: Evolución de la matriz energética del sector industrial en Uruguay.....	29
Figura 5: Balance energético de Uruguay 2009	29
Figura 6 - Proyección de la matriz energética de Uruguay para el 2015	30
Figura 7 – Energía: Participación por fuentes y por usos en sector construcción.....	32
Figura 8 - Participación de fuentes por subsector industrial	33
Figura 9 - Energía neta por subsectores asociados a la construcción y por fuentes.....	34
Figura 10- la construcción sustentable en la mejora del medio ambiente	35
Figura 11: Impacto ambiental de las actividades de construcción	38
Figura 12: La construcción y el medio ambiente	39
Figura 13: Emisiones totales derivadas y no derivadas de la energía, por sector	41
Figura 14: Porcentajes de emisiones mundiales de gases de invernadero por sector.....	41
Figura 15 - Volumen físico de construcción de viviendas por tipología en Uruguay.	46
Figura 16 - Incidencia de la tipología en altura en la construcción de viviendas.....	47
Figura 17: Ciclo de vida de un edificio	49
Figura 18: Relación entre energía primaria y energía neta	52
Figura 19 - Niveles de análisis energéticos	54
Figura 20 - Ciclo de vida energético de un edificio	54
Figura 21 - Energía incorporada en sistemas estructurales	61
Figura 22 - Límites del sistema en el análisis de la energía incorporada	70
Figura 23 - Sectores de la Matriz insumo producto de 1983.....	72
Figura 24 - Elementos excluidos en un análisis de proceso en un edificio	75
Figura 25 - Lineamientos de la investigación.....	78
Figura 26 - Etapa A1: energía incorporada inicial	83
Figura 27 - Etapa A2: Energía incorporada recurrente.....	84
Figura 28 - Etapa B1: Energía operacional del edificio	86
Figura 29 - Etapa B2: Energía operacional de transporte de vehículo propio.....	87
Figura 30 - Superficie de obra nueva según destino en Montevideo.....	88
Figura 31: Edificio Copeclub CEA III	90
Figura 32 – Ubicación del edificio en Montevideo	91
Figura 33 - - Montevideo. Densidad de población	91
Figura 34 - Línea de tiempo de la obra.....	92
Figura 35 - Plantas edificio Copeclub	93
Figura 36 - Detalle constructivo	96
Figura 37 - Comportamiento higrotérmico de muro exterior (solución original)	102
Figura 38 - Comportamiento higrotérmico de muro exterior (alternativa 1)	103
Figura 39 - Comportamiento higrotérmico de muro (alternativa 2).....	104
Figura 40 - Clasificación de pérdidas del agua elevada	108
Figura 41 – Vida útil de edificios según el sistema constructivo	116
Figura 42 - Energía incorporada total - incidencia por rubro s/pérdidas y c/pérdidas	123
Figura 43 - Energía incorporada del hormigón estructural.....	123
Figura 44 - incidencia relativa de muros por tipo.....	124
Figura 45 - Incidencia de materiales en muros dobles	126
Figura 46 - Incidencia de materiales en muros simples.....	126
Figura 47 - energía incorporada en revoques. Incidencia relativa por tipo	127
Figura 48 - incidencia de aberturas por material	129

Figura 49 - incidencia pinturas	129
Figura 50 - Componentes y materiales de instalación sanitaria	130
Figura 51 - Incidencia de los componentes de la instalación eléctrica.....	131
Figura 52 - Distribución de la energía incorporada por pérdidas de materiales.....	132
Figura 53 - Distribución de la energía incorporada en materiales con y sin pérdidas.....	133
Figura 54 - Incidencia relativa en la energía incorporada por transporte de materiales.....	136
Figura 55 - Comparación de costo energético y costo monetario	141
Figura 56 - Consumo eléctrico anual de las unidades según tamaño del hogar	144
Figura 57 - Consumo de gas para calefacción según tamaño del hogar.....	145
Figura 58 - Período de retorno energético de la energía incorporada inicial	148
Figura 59 - Período de retorno energético de la energía incorporada total	148
Figura 60 - Relación entre energía operacional y tamaño del hogar	149
Figura 61 - Consumo de GL y electricidad por unidad de vivienda	150
Figura 62 - Distribución por unidad del consumo en combustible de vehículo propio.....	150
Figura 63 - Energía de combustible de vehículo propio y energía incorporada inicial.....	152
Figura 64 - Comparación entre solución estructural original y alternativa 1	153

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Evolución del consumo energético	25
Tabla 2 - Carga ambiental de los edificios en USA	37
Tabla 3 - Oferta de mampuestos cerámicos para muros en Uruguay	48
Tabla 4 - Comparación de sistema estructural en acero y en h.a.....	60
Tabla 5 - Comparación entre sistemas estructurales	61
Tabla 6 - Comparación de diseños de estructura en hormigón armado.....	62
Tabla 7 - Energía incorporada en soluciones de muros exteriores	64
Tabla 8 - Rubros que inciden en el rubro 43 de la MIP 2005	81
Tabla 9 - División en rubros de obra para definición de composición básica de materiales....	94
Tabla 10 - Factores de pérdidas de materiales	107
Tabla 11 - Distancia ponderada del transporte de aluminio	110
Tabla 12 - costo energético por tipo de transporte	111
Tabla 13 - Matriz energética nacional 2009	113
Tabla 14 - Vida útil de estructuras de edificios	116
Tabla 15 - Factores de reposición.....	117
Tabla 16 - Energía incorporada por rubro de obra	122
Tabla 17 - Energía incorporada en ladrillos y bloques cerámicos.....	125
Tabla 18 - Porcentaje de aluminio primario y secundario.....	127
Tabla 19 - Combustibles utilizados en aluminio secundario.....	128
Tabla 20 - Cálculo del índice energético del agua.....	131
Tabla 21 - Cálculo de la energía incorporada en el agua.....	131
Tabla 22 - energía incorporada por rubro con y sin considerar pérdidas de materiales.....	133
Tabla 23 – índices energéticos de transporte de materiales.....	134
Tabla 24 - Electricidad: insumos energéticos y producción de energía a nivel nacional.....	138
Tabla 25 - Energía incorporada directa (eléctrica)	138
Tabla 26 - Energía incorporada directa (derivados del petróleo)	139
Tabla 27 - Energía incorporada directa	139
Tabla 28 - Energía incorporada inicial total	140
Tabla 29 - Energía incorporada de deconstrucción	141
Tabla 30 - Energía operacional anual	143
Tabla 31 - Energía operacional anual per cápita	144
Tabla 32 - Energía de GLP operacional	146
Tabla 33 - Promedio de energía operacional por orientación geográfica.....	149
Tabla 34 - Energía de transporte - vehículo propio	151
Tabla 35 - Comparación entre hormigón tradicional y hormigón con CBC	154
Tabla 36 - Porcentaje de huecos de mampostería cerámica en Uruguay	155
Tabla 37 - Comparación de muros interiores - alternativa en cerámica hueca.....	155
Tabla 38 - Comparación entre soluciones de muros interiores - alternativa 1	156
Tabla 39 - Comparación entre solución de muros original y solución en placa de yeso.....	157

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. CONTEXTO -----	16
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA-----	18
1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN-----	20
1.4. OBJETIVO -----	20
1.5. OBJETIVOS SECUNDARIOS-----	20
1.6. METODOLOGIA -----	21
1.7. DELIMITACIÓN DEL ALCANCE DEL TRABAJO -----	22
1.8. LIMITACIONES -----	22
1.9. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO -----	23
2. ENERGÍA Y CONSTRUCCIÓN	25
2.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA GLOBAL-----	25
2.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA NACIONAL -----	26
2.3. ENERGÍA Y CONSTRUCCIÓN EN URUGUAY-----	31
2.4. CONSTRUCCION Y SUSTENTABILIDAD-----	35
2.4.1. Impactos ambientales de la construcción	36
2.4.2. Efectos del consumo de energía en el medio ambiente.....	39
2.4.3. Consumo de energía en la construcción	43
2.4.4. Energía y edificación en Uruguay - Marco normativo y acciones emprendidas.....	44

2.5. CONSTRUCCIÓN RESIDENCIAL EN ALTURA EN URUGUAY-----	46
3. ENERGÍA INCORPORADA	49
3.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA -----	49
3.2. ANÁLISIS ENERGÉTICO -----	51
3.2.1. Energía primaria y secundaria	51
3.3. NIVELES DEL ANÁLISIS ENERGÉTICO -----	53
3.4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ENERGETICO-----	54
3.5. LA ENERGÍA INCORPORADA EN EL ACVE -----	55
3.5.1. Fronteras del análisis de la energía incorporada en edificaciones	57
3.6. APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE ENERGÍA INCORPORADA----	58
3.6.1. Cálculo del período de retorno energético	58
3.6.2. La energía incorporada como indicador de impacto ambiental	58
3.6.3. La energía incorporada como criterio de comparación entre soluciones constructivas alternativas	59
3.7. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA ENERGÍA INCORPORADA -----	64
3.7.1. Análisis de proceso.....	64
3.7.2. Análisis estadístico	68
3.7.3. Análisis de matriz insumo producto.....	69
3.7.4. Análisis híbrido	74
3.8. ESTUDIOS A NIVEL NACIONAL SOBRE ENERGÍA INCORPORADA EN EDIFICIOS -----	76
4. METODOLOGIA	77
4.1. ABORDAJE METODOLÓGICO-----	77
4.1.1. Estrategia de investigación.....	77

4.2. LINEAMIENTOS DE LA INVESTIGACIÓN-----	77
4.3. DESCRIPCION DE LAS ETAPAS DE INVESTIGACION-----	78
4.3.1. Metodología de análisis energético	78
4.3.2. Objeto de estudio	79
4.3.3. Análisis y resultados.....	80
4.4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS ENERGÉTICO-----	80
4.4.1. Selección del método de cálculo de la energía incorporada.....	80
4.4.2. Soporte informático	82
4.5. DETERMINACION DE ETAPAS DEL ANALISIS ENERGETICO ----	82
4.5.1. Etapa A - Energía incorporada: Pasos del análisis de proceso.....	82
4.5.2. Etapa B: Determinación de parámetros de comparación	85
5. CASO DE ESTUDIO	88
5.1. SELECCIÓN-----	88
5.1.1. Criterios de selección del edificio	88
5.2. PRESENTACIÓN DEL EDIFICIO-----	89
5.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA-----	94
5.3.1. Elementos constructivos.....	94
5.4. MODELIZACIÓN -----	99
5.4.1. Modificaciones para configurar el modelo.....	99
5.5. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ALTERNATIVAS-----	99
5.5.1. Criterios de desempeño	99
5.5.2. Determinación de rubros	100
5.5.3. Estructura.....	100

5.5.4. Muros.....	101
5.6. ORGANIZACIÓN DE DATOS Y CUANTIFICACIONES -----	104
5.7. ENERGÍA INCORPORADA INICIAL -----	105
5.7.1. Energía incorporada en materiales	105
5.7.2. Energía incorporada en transporte.....	109
5.7.3. Energía incorporada en obra.....	112
5.8. ENERGÍA INCORPORADA RECURRENTE -----	115
5.9. ENERGÍA INCORPORADA DE DECONSTRUCCIÓN -----	118
5.10. ENERGÍA OPERACIONAL DEL EDIFICIO-----	118
5.10.1. Energía operacional eléctrica	118
5.10.2. Energía operacional por gas licuado de petróleo	119
5.10.3. Otras fuentes de energía operacional.....	119
5.11. ENERGÍA OPERACIONAL DE TRANSPORTE EN VEHÍCULO PROPIO-----	119
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	121
6.1. ENERGÍA INCORPORADA EN MATERIALES -----	121
6.1.1. Estructura.....	123
6.1.2. Albañilería	124
6.1.3. Aberturas	127
6.1.4. Protecciones.....	129
6.1.5. Instalaciones	130
6.1.6. Energía incorporada en el agua	131
6.2. ENERGÍA INCORPORADA EN PÉRDIDAS DE MATERIALES -----	132

6.3. ENERGÍA INCORPORADA EN EL TRANSPORTE-----	134
6.3.1. Costos energéticos de transporte por material.....	134
6.3.2. Energía incorporada en transporte de materiales	136
6.4. ENERGÍA UTILIZADA EN OBRA -----	137
6.4.1. Determinación de requerimientos energéticos de energía	137
6.4.2. Energía incorporada en obra.....	138
6.5. ENERGÍA INCORPORADA INICIAL TOTAL -----	140
6.5.1. Energía incorporada inicial por metro cuadrado	140
6.5.2. Comparación con estructura de costo monetario	140
6.6. ENERGIA INCORPORADA RECURRENTE -----	141
6.7. ENERGIA INCORPORADA DE DECONSTRUCCION -----	141
6.8. PARAMETROS DE ENERGÍA OPERACIONAL-----	142
6.9. ENERGÍA OPERACIONAL DEL EDIFICIO -----	142
6.9.1. Energía operacional total.....	142
6.9.2. Energía eléctrica operacional	144
6.9.3. Energía operacional por gas licuado	145
6.9.4. Leña	147
6.9.5. Otras fuentes de energía operacional.....	147
6.9.6. Período de retorno energético.....	147
6.10. ENERGIA OPERACIONAL DE TRANSPORTE EN VEHICULO PROPIO-----	150
6.10.1. Energía operacional de transporte en vehículo propio y energía incorporada inicial.....	152
6.11. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ALTERNATIVAS -----	152

6.11.1. Estructura.....	152
6.11.2. Mampostería.....	154
7. CONCLUSIONES.....	158
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO

La progresiva destrucción del ambiente es una problemática identificada hace ya tiempo. El cambio climático asociado al calentamiento global, el deterioro de la capa de ozono, la pérdida de biodiversidad, el agotamiento de los recursos naturales y la deforestación masiva son ejemplos de la degradación ambiental global.

La principal causa de esta situación es la actividad económica humana, que paradójicamente necesita fuertemente del ambiente para su desarrollo. Según Rees (2003), el actual consumo de recursos es superior a la capacidad productiva de los sistemas biofísicos críticos, y la generación de residuos mayor que la capacidad asimiladora de muchos ecosistemas a diferentes escalas. El eventual agotamiento de recursos minerales no renovables es discutido por algunas fuentes en función de los nuevos hallazgos y de los avances tecnológicos (SUSLICK y MACHADO, 2004).

Dentro de las actividades económicas humanas, la construcción, como actividad específica del desarrollo, genera fuertes impactos en el ambiente, a través del consumo de recursos, de generación de contaminantes, de pérdidas de tierras productivas, de grandes volúmenes de residuos, y demanda una gran cantidad de energía (LAZARUS 2005, CITY LIMITS 2002).

La generación y uso de energía se plantea como un punto crítico de la actividad humana, directamente asociada con emisiones de gases causantes del efecto invernadero, y provocando asimismo fuerte polución atmosférica, perjuicio sanitario, destrucción forestal, contaminación, perjuicios agrícolas y el agotamiento de recursos no renovables (UN-HABITAT 1991).

En particular, la reducción de las emisiones globales de gases de invernadero para prevenir el cambio climático es uno de los principales tópicos en la agenda política de muchos países (HEGNER, 2007; VELDERS, 2007). La publicación del cuarto reporte del Panel

Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) ha amplificado la percepción sobre la relevancia política de la problemática del cambio climático. El reporte plantea el aumento significativo de las emisiones de CO₂ durante las últimas décadas, y la fuerte relación entre dichas emisiones y el calentamiento global es un hecho corrientemente aceptado en la comunidad científica internacional. En el reporte se considera un aumento de dos grados centígrados como una frontera crítica para la capacidad de regulación de los ecosistemas. Lograr este límite requiere una reducción de las emisiones de CO₂ del orden del 50 al 80% para el año 2050 (IPCC, 2007).

La discusión sobre cómo lograr este objetivo está estrechamente ligada a la consecución de un sistema de energía sustentable, en la medida que gran parte de las emisiones de CO₂ están asociadas a la generación y uso de la energía (HEGNER, 2007). Y un sistema de energía sustentable no sólo pasa por sustituir fuentes de energía no renovables por renovables, sino por una estrategia de reducción del consumo total de energía (IMBODEN Y JAEGER, 1999).

Además del factor ambiental, existe a nivel nacional en Uruguay otra motivación para la búsqueda de la eficiencia energética (DNE, 2005). La misma responde a la conformación actual de la matriz energética nacional, en la que juega un papel muy importante la importación de energía. Como consecuencia de esto, las políticas energéticas son vulnerables a cambios de condiciones en dichas importaciones. Por otro lado, incluso buena parte de la oferta interna de energía, cual es la hidroelectricidad, ha presentado crecientes alteraciones en su volumen de generación en función del clima, obligando a resolver el abastecimiento mediante el aumento de la importación de energía o combustibles.

Y existe una fuerte vinculación entre la energía y la edificación, en tanto es indispensable la primera tanto para la ejecución de los edificios, como para su funcionamiento durante toda su vida útil. El sector de la construcción es uno de los mayores consumidores de energía comercial, ya sea en forma de combustibles fósiles o electricidad (DING, 2004). El consumo debido a actividades de construcción se da por un lado en el proceso específico de la obra, y por otro en la manufactura de los materiales y componentes insumos de la industria de la construcción. Materiales como el acero estructural, el hormigón armado, y el aluminio, consumen grandes cantidades de energía durante su producción, con importantes emisiones de CO₂ derivadas de los procesos de manufactura (DING, 2004).

Esta relación entre la energía y la edificación y su impacto sobre el medio ambiente ha sido extensamente estudiada. Tradicionalmente el énfasis en los trabajos estaba en el análisis de la energía operacional de los edificios (ITARD, 2009; GUMASTE, 2006), ya que se entendía que la demanda de energía para la operación de los edificios durante su vida útil era significativamente mayor que la necesaria para su construcción.

Sin embargo, esa tendencia ha sido fuertemente cuestionada por varios estudios que señalan la importancia relativa de la energía incorporada en los materiales y en los procesos constructivos (UN HABITAT 1991). Treloar (2003) plantea que la energía incorporada en edificios australianos representa el equivalente de 20 a 50 años de su energía operacional. Sostiene que si bien algunos estudios han mostrado impactos menores, esto se debe a marcos de análisis incompletos. Por otro lado, en la medida que aumentan las medidas de eficiencia energética para reducir la energía operacional, la energía incorporada cobra mayor relevancia relativa (ITARD, 2009).

Además, el concepto de energía incorporada constituye un contrapunto teórico a los abordajes convencionales de evaluación de sistemas de eficiencia energética, como la aislación térmica o las lámparas eficientes (TRELOAR, 1998). En contraposición con la evaluación económica, en la que tanto el costo inicial como el costo de operación son tenidos en cuenta a los efectos de determinar la conveniencia de un producto, la evaluación convencional de eficiencia energética no considera los costos energéticos derivados de la manufactura del producto, sino solamente los derivados de su operación.

Por otro lado, Kuhn (2006) explica que el hecho de que gran parte de la bibliografía de países europeos otorgue una especial preeminencia a la energía operacional respecto a la energía incorporada se debe a que por un lado los rigores climáticos son más significativos en dichos países, lo que implica mayores costos energéticos para lograr un grado de confort adecuado, y por otro a que en países en desarrollo, el limitado poder adquisitivo de las poblaciones inhibe el uso de sistemas de acondicionamiento artificial incluso en los casos en que la edificación no presta un grado adecuado de confort.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las alternativas tecnológicas utilizadas en la construcción no tienen todas el mismo impacto ambiental, ni son equivalentes en su consumo energético. A nivel internacional, se ha visto la

importancia de la evaluación y comparación de diferentes resoluciones constructivas de proyectos de edificación con miras a reducir la energía incorporada (GUSTAVSSON y SATHRE 2005, COLE 1999, BUCHANAN y LEVINE 1999). Los resultados señalan diferencias significativas en el consumo energético de las diferentes alternativas.

Sin embargo, a partir de estudios realizados en otros países en materia de energía incorporada no es posible extraer conclusiones directas (SILVA, 2003). Las tecnologías constructivas propias de nuestro medio, el bajo nivel de prefabricación existente en la construcción, el importante peso relativo de productos importados (que constituye una realidad específica de cada país), cuyo transporte incide de forma particular en el cálculo de la energía incorporada respectiva, la calidad de la materia prima, el clima, los procesos de manufactura y los tipos de combustibles impiden el traslado mecánico de datos sobre la energía incorporada en las edificaciones (COLE y ROUSSEAU 1992). Incluso trabajos realizados a nivel regional, al tiempo que señalan la relevancia de la evaluación comparativa de las tecnologías constructivas, denotan importantes diferencias entre las utilizadas en las regiones estudiadas respecto a nuestro país (SATTLER, KUHN y DE SOUZA, 2009).

Actualmente en Uruguay, las principales variables que atiende la construcción de vivienda de interés social son de orden económico y social. Las edificaciones en nuestro medio pueden calificarse como “pre-oil crisis” (MIMBACAS et al. 2009), es decir que no paran mientes en los gastos energéticos involucrados. Se estima que los edificios consumen en nuestro país el 38% del total de energía consumida. Una importante razón que limita la promoción del énfasis en los aspectos ambientales resulta de la escasez de estudios en el plano nacional sobre la sustentabilidad de las tecnologías y soluciones constructivas utilizadas en el país, en particular en lo que concierne a los aspectos de energía incorporada. La perspectiva de la eficiencia energética ha sido recientemente abordada pero siempre desde la energía operacional (PICCION et al., 2009, BLANCO, 2009, MIMBACAS, 2009).

Otra característica observada en los estudios comparativos de soluciones constructivas alternativas, es que generalmente apuntan a edificaciones de baja altura. Esto habilita la comparación entre numerosas alternativas que no son fácilmente trasladables a tipologías en altura (SATTLER, KUHN y DE SOUZA, 2009; OFFIN, 2010; GUSTAVSSON y SATHRE, 2005).

En Uruguay la ejecución de edificaciones en altura tiene una incidencia significativa en el total del metraje construido. Aproximadamente el 60% de las viviendas nuevas construidas entre los años 200 y 2009 corresponden a una tipología de cuatro o más niveles (INE, 2011). De ese porcentaje, la mitad son torres con ascensor, en general de diez pisos. Y a su vez, la construcción residencial representó en el período referido algo más del 70% de la edificación total ejecutada.

Esta construcción en altura en el Uruguay se realiza casi exclusivamente con tecnología de hormigón armado. Las diferencias entre las soluciones constructivas se encuentran a nivel del diseño estructural del hormigón, así como de los materiales utilizados para los cerramientos, divisiones interiores, instalaciones y terminaciones.

En función de todo lo expuesto, se entiende que la evaluación de la energía incorporada en la producción de estas edificaciones, así como el análisis de las diferentes soluciones utilizadas, aportará otra dimensión a la toma de decisiones sobre soluciones constructivas, e incluso tipológicas y urbanas, y permitirá determinar aspectos significativos con miras a reducir el consumo energético.

1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué relevancia tiene la energía incorporada inicial en un edificio en altura en Uruguay, respecto a su energía operacional? ¿Cuál es el potencial de reducción de dicha energía considerando soluciones constructivas alternativas tradicionales?

1.4. OBJETIVO

Comparar la energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay respecto a su energía operacional. Evaluar alternativas constructivas en rubros específicos desde la perspectiva de su incidencia en la energía incorporada inicial.

1.5. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Evaluar la energía operacional del edificio.

- Determinar los elementos constructivos responsables de la mayor parte de la demanda energética en la construcción del edificio.
- Evaluar la relevancia de los valores de energía incorporada hallados con respecto a un parámetro externo a la construcción.
- Identificar disponibilidad de datos en el contexto uruguayo en materia de energía incorporada de productos de la construcción.

1.6. METODOLOGIA

Se definen tres etapas de investigación. En una primera etapa, se selecciona el método de cálculo de la energía incorporada, en base a la revisión bibliográfica realizada, optándose por el análisis de proceso. Se plantea la estrategia de relevamiento de datos para el cálculo de la energía incorporada, y se detallan las etapas del cálculo de la energía incorporada en materiales, en transporte y directa. En esta etapa se presenta la estrategia de relevamiento de datos para el cálculo de la energía operacional y se explica cómo se realizó el cómputo. Se determina asimismo un parámetro externo a la construcción para evaluar la significación relativa de los valores calculados.

En una segunda etapa, se establecen los criterios de selección de una edificación sobre la cual realizar el análisis. Se presenta la edificación elegida y se caracteriza su solución constructiva. Se modeliza esta solución a efectos del cálculo. Se determinan los elementos constructivos sobre los que se propondrán alternativas y se determinan las soluciones constructivas alternativas.

En una tercera etapa, se presentan los resultados del cálculo de la energía incorporada inicial. Se analiza la incidencia relativa de los diferentes rubros de obra, y en particular la incidencia de los materiales en cada uno de ellos. Se evalúa el transporte y las pérdidas de materiales. Se calcula la energía incorporada de las soluciones alternativas y se comparan con los resultados obtenidos para la solución original.

Se presentan los resultados del cálculo de la energía operacional por tipo de fuente y total. Se analizan características del consumo. Se compara la energía operacional con la energía incorporada inicial. Se presentan los resultados del consumo de combustible para vehículos

propios y se analiza la relevancia de la energía incorporada en la construcción respecto a este parámetro.

1.7. DELIMITACIÓN DEL ALCANCE DEL TRABAJO

Dentro del análisis energético del ciclo de vida para una edificación, se enfoca el estudio de la energía incorporada inicial y de su energía operacional. No se incluyó la estimación de las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la energía incorporada y operacional.

A nivel transversal a la cadena del ciclo de un edificio, la investigación se realizó considerando la mayor parte de los materiales y componentes de obra y la propia actividad de la construcción, pero en forma longitudinal a la cadena no se siguió un análisis “corriente arriba” de cada uno de los elementos. Se recurrió en cambio a una revisión bibliográfica para obtener información sobre índices energéticos y propiedades específicas de materiales y componentes.

Fueron considerados los materiales y componentes efectivamente incorporados a la obra. Quedaron excluidas por tanto las cuotapartes de aquellos materiales utilizados para la construcción pero no incorporados a la obra, que son reutilizados a lo largo de varias obras (encontrados, herramientas, maquinaria, etc.).

No se consideró la cuotaparte de servicios administrativos, financieros, de seguros, etc., que como indica Treloar (1998), desde un punto de vista estricto forman parte de los insumos energéticos. Tampoco fue considerada la cuotaparte de energía incorporada derivada de las obras de infraestructura urbana necesarias para la viabilidad de la construcción en estudio.

No se incluyó el eventual gasto energético debido a la diferencia de ingesta calórica del personal debido a las características de la actividad de obra.

1.8. LIMITACIONES

El estudio enfoca un aspecto específico de la sustentabilidad, cual es la eficiencia energética. A su vez, este aspecto es analizado solamente desde la sustentabilidad ambiental.

Para la mayoría de los componentes de obra no se halló información sobre su contenido energético, por lo que se calcularon en función de los índices energéticos de materiales.

Tomemos como ejemplo el componente del punto anterior, una abertura de aluminio. Para el cálculo de la energía incorporada se descompuso en base a la perfilería utilizada y se sumaron los metros lineales de cada perfil identificado. Se multiplicaron dichos valores por el peso por metro lineal de cada perfil, según información del fabricante de perfiles, y se obtuvo la masa total de aluminio. Se multiplicó la masa por el índice energético del aluminio, y se realizó un procedimiento similar para los burletes de goma. Se sumaron los totales de cada rubro y se llegó a un valor de contenido energético para la abertura. Sin embargo, todavía en lo que respecta a costo energético incorporado en materiales, queda sin contabilizar la energía requerida por la herrería para armar la abertura, así como las pérdidas de aluminio en cortes, aserrado, etc.

En el curso del trabajo se vio la inviabilidad de descomponer en materiales simples algunos rubros complejos, como es el caso del sistema de transporte mecánico vertical, o el sistema de bombeo de agua. En la revisión bibliográfica de bases de datos, no se halló información sobre contenido energético para dicho tipo de rubros tratados en forma global. Por tanto, dichos rubros quedan explícitamente fuera del cálculo de energía incorporada inicial total.

Ante la no disponibilidad de un protocolo estandarizado para la medición de la energía incorporada, no se realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos y los revisados en la bibliografía.

No se dispuso de soporte informático específico adecuado a los requerimientos de esta investigación.

1.9. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Se plantea una estructura en siete capítulos. En este primer capítulo se presenta el contexto general en el que se inserta la temática abordada, se define el problema y se justifica la investigación, se plantean los objetivos, se presenta sumariamente la metodología, delimitaciones, limitaciones generales, así como la presente estructura del documento

En el segundo capítulo se realiza una revisión bibliográfica sobre energía y construcción, y sobre los aspectos ambientales relacionados. Se plantea la situación en Uruguay en materia de energía, construcción y desarrollo sustentable.

En el tercer capítulo se aborda el análisis energético y específicamente la energía incorporada. Se revisa su pertinencia como indicador ambiental. Se profundiza en los métodos del análisis de la energía incorporada y su aplicabilidad.

En el cuarto capítulo se presenta el abordaje metodológico y la estrategia de investigación. Se describe el diseño de la misma y las etapas previstas para el análisis.

En el capítulo quinto, se presenta la edificación seleccionada para el estudio, se caracteriza su solución constructiva y se modeliza para el análisis. Se proponen soluciones constructivas alternativas en rubros determinados.

En el capítulo seis se presentan y analizan resultados sobre la energía incorporada. Se comparan los valores obtenidos con los resultados de las soluciones alternativas. Se presentan y analizan los resultados sobre energía operacional y sobre la energía utilizada por los usuarios para el transporte con vehículo propio, y se comparan con la energía incorporada inicial.

En el capítulo siete se plantean conclusiones y consideraciones finales, y eventuales posibilidades para futuros estudios.

2. ENERGÍA Y CONSTRUCCIÓN

2.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA GLOBAL

El consumo de energía a nivel mundial crece en forma sostenida. A pesar de advertencias y compromisos, los modelos de desarrollo vigentes demandan cantidades crecientes de energía. Según la EIA, proyectando las características de la demanda actual hacia el futuro, se prevé que para el 2035 el consumo habrá alcanzado un aumento global del 49% respecto a la situación en 2007, con un fuerte aumento de la incidencia relativa de los países fuera de la OECD (Energy International Outlook 2010). Dichos países, entre los que se encuentra Uruguay, aumentarán su demanda energética en el período un 73% en conjunto, con una incidencia preponderante de los países del sureste asiático (ver tabla 1).

Tabla 1 - Evolución del consumo energético (en cuatrillones de Btu)

	2007	2015	2020	2025	2030	2035
América del Norte	123,7	124,3	129,4	134,9	140,2	146,3
Asia	166,8	199	229,6	260,3	291,7	323,6
Europa y Eurasia	133,8	134,4	137,2	141,2	144,3	148,4
Medio oriente	25,1	32,9	36,5	39,1	41,8	45,7
Africa	17,8	20,8	22,5	24,6	26,5	29
América del Sur y Central	28	32,1	35,5	38,7	42,2	45,7
Total mundial	495,2	543,5	590,7	638,8	686,7	738,7

(fuente: adaptado de EIO 2010)

De acuerdo a estas proyecciones, el aumento del consumo energético seguirá básicamente ligado a fuentes no renovables de energía. En particular en el sector industrial, que es el que en términos absolutos consume mayor cantidad de energía de fuentes renovables no eléctricas, la participación de estas fuentes pasará del 7% al 8% para el 2035 (EIO 2010).

Consecuentemente, las emisiones de dióxido de carbono aumentaran en el período señalado un 43%, con una incidencia relativa creciente de los países en desarrollo (figura 1).

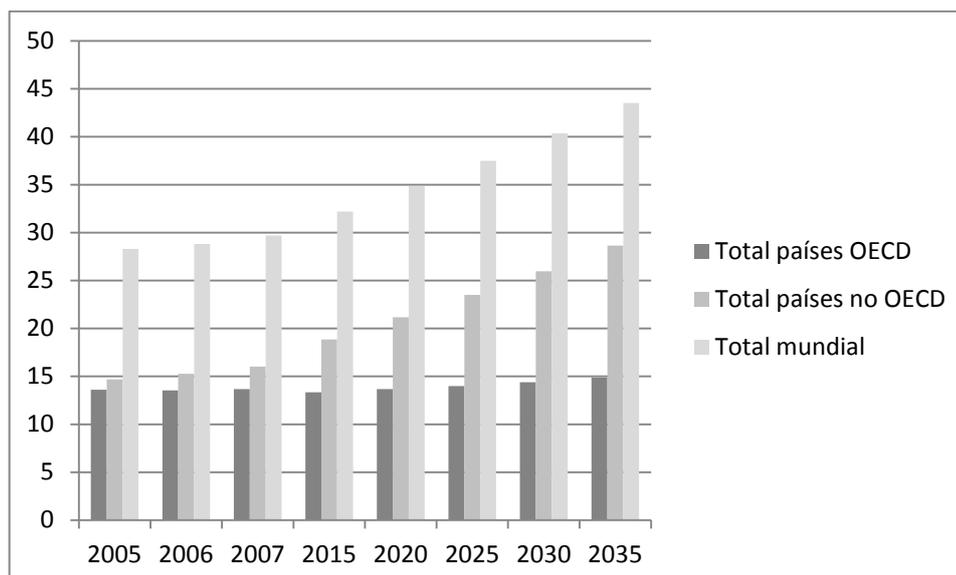


Figura 1: Emisiones de dióxido de carbono por región (en millones de toneladas métricas) (adaptado de EIO 2010)

2.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA NACIONAL

A nivel de fuentes de energía, Uruguay posee actualmente una frágil situación energética en función de su dependencia de combustibles importados (PORTENOY, 2009; CANABAL y ACHKAR, 2009). El consumo final energético provino a nivel nacional, al año 2008, de las siguientes fuentes: petróleo (46%), electricidad (22%), leña y carbón vegetal (15%), residuos de biomasa (15%) y gas natural (2%) (BLANCO, 2009) (ver figura 2). A su vez, si bien la electricidad es principalmente hidro generada, existe una cuotaparte que está constituida por termoelectricidad. Las centrales termoeléctricas generadoras de dicha cuotaparte funcionan básicamente con derivados del petróleo, y su participación relativa está aumentando con las cada vez más frecuentes sequías.

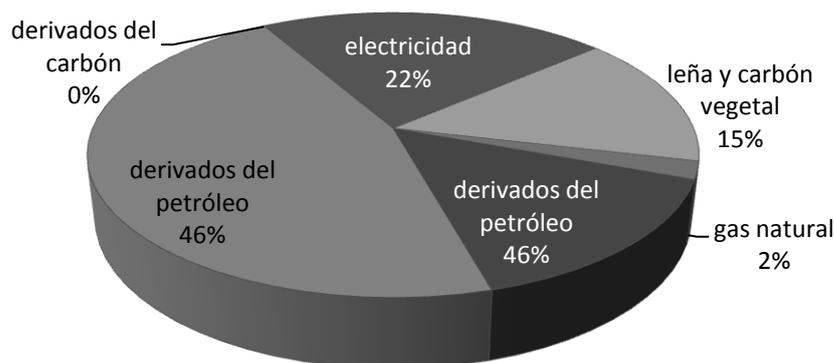


Figura 2: Estructura del consumo energético en Uruguay, por fuente (BLANCO, 2009)

Existen también una central generadora de electricidad alimentada con biomasa, pero su producción se orienta en buena medida a las necesidades de la empresa de celulosa Botnia, responsable de su instalación. Cabe acotar que la disminución relativa del petróleo y el aumento de la biomasa respecto al año 2005 (53% y 2% respectivamente en dicho año) son producto básicamente de la instalación de dicha procesadora de celulosa en nuestro país (PRESIDENCIA ROU, 2009). Asimismo es de notar que la totalidad del petróleo consumido es importado, y la capacidad hidroeléctrica del país está casi totalmente aprovechada. De acuerdo a Blanco (2009), la importación de petróleo en el año 2008 constituyó el 27% de las importaciones totales y fue equivalente al 40% de las exportaciones totales.

Esta situación de vulnerabilidad se refleja en varios aspectos. Uruguay desde hace varios años importa gas natural desde Argentina. Sin embargo no es posible realizar proyecciones estables para dicho abastecimiento (DNE, 2006), el cual es directamente afectado por el aumento de las necesidades energéticas del vecino país. Con Brasil, sigue en marcha la ejecución de las obras de conexión entre San Carlos y Candiota, para la importación de energía eléctrica. Esta energía provendrá de la usina termoeléctrica Presidente Médici, situada cerca de la frontera uruguaya. Desde hace años se está monitoreando en Uruguay las eventuales afectaciones ambientales provocadas por las emisiones debidas a la combustión de carbón en dicha usina. Si bien no se han constatado dichas afectaciones, se ha realizado en forma reciente la ampliación de la planta a 796MW (RÓTULO, 2006). El requerir energía producida por esta central podría restringir la capacidad de reclamar por daños ambientales derivados de la misma. Con Paraguay también existen negociaciones avanzadas para la compra de energía, pero las trabas argentinas al pasaje de dicha energía a través de su territorio no ha permitido hasta el presente la concreción de esta solución (Diario el País, 27/7/2011).

Con respecto a la estructura del consumo energético, de acuerdo con información estadística de la DNETN (BLANCO, 2009), el consumo final energético por sector en el año 2008, corresponde en primer lugar al sector industrial con un 33% de la energía final, luego a transporte (29%), residencial (23%), sector comercial y de servicios, y sector agro-pesquero (figura 3).

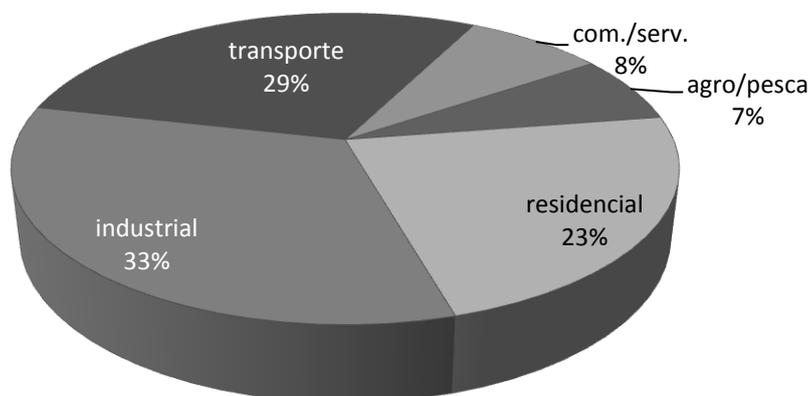
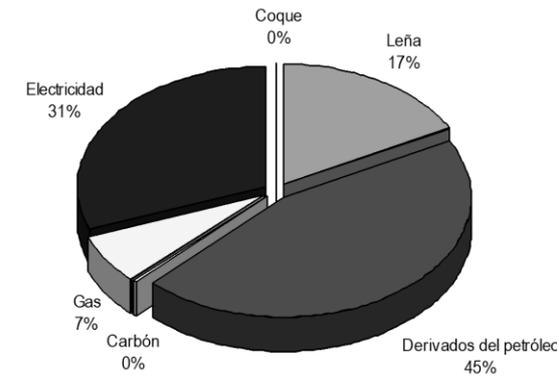
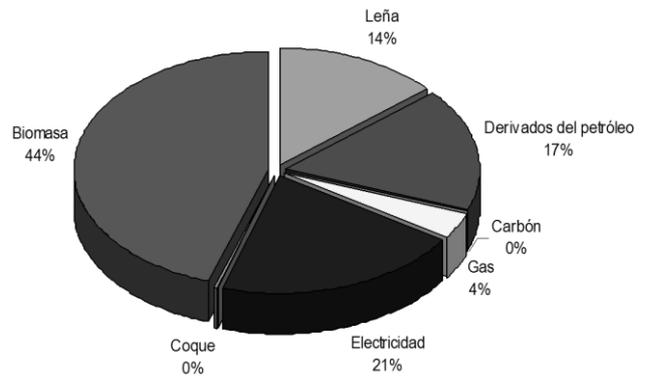


Figura 3: Estructura del consumo de energía en Uruguay, por sector (BLANCO, 2009)

Cada uno de estos sectores presenta a su vez una matriz específica. El sector industrial, principal sector de demanda energética, es el único consumidor de energía generada por biomasa, y el principal consumidor de leña. Sin embargo, debido a las características del consumo de biomasa ya señaladas, la matriz energética del sector, tal como se muestra en la figura 4, y como aparece en el balance energético nacional 2009 (figura 5), no es representativa del resto de los emprendimientos industriales. La potencia de generación de electricidad de la central de Botnia es de 110 MW aprox., de los cuales la propia planta consume 80 MW. Además se prevé que esta característica se acentúe aún más en corto plazo cuando esté en funcionamiento la central generadora de otra procesadora de celulosa que se está instalando en el país. La central de Montes del Plata, que funcionará con licor negro, tendrá una capacidad instalada de 160 MW, de los cuales la planta consumirá alrededor de 100 MW.



Matriz energética del sector industrial en Uruguay año 2000



Matriz energética del sector industrial en Uruguay año 2008

Figura 4: Evolución de la matriz energética del sector industrial en Uruguay (DNETN, 2008)

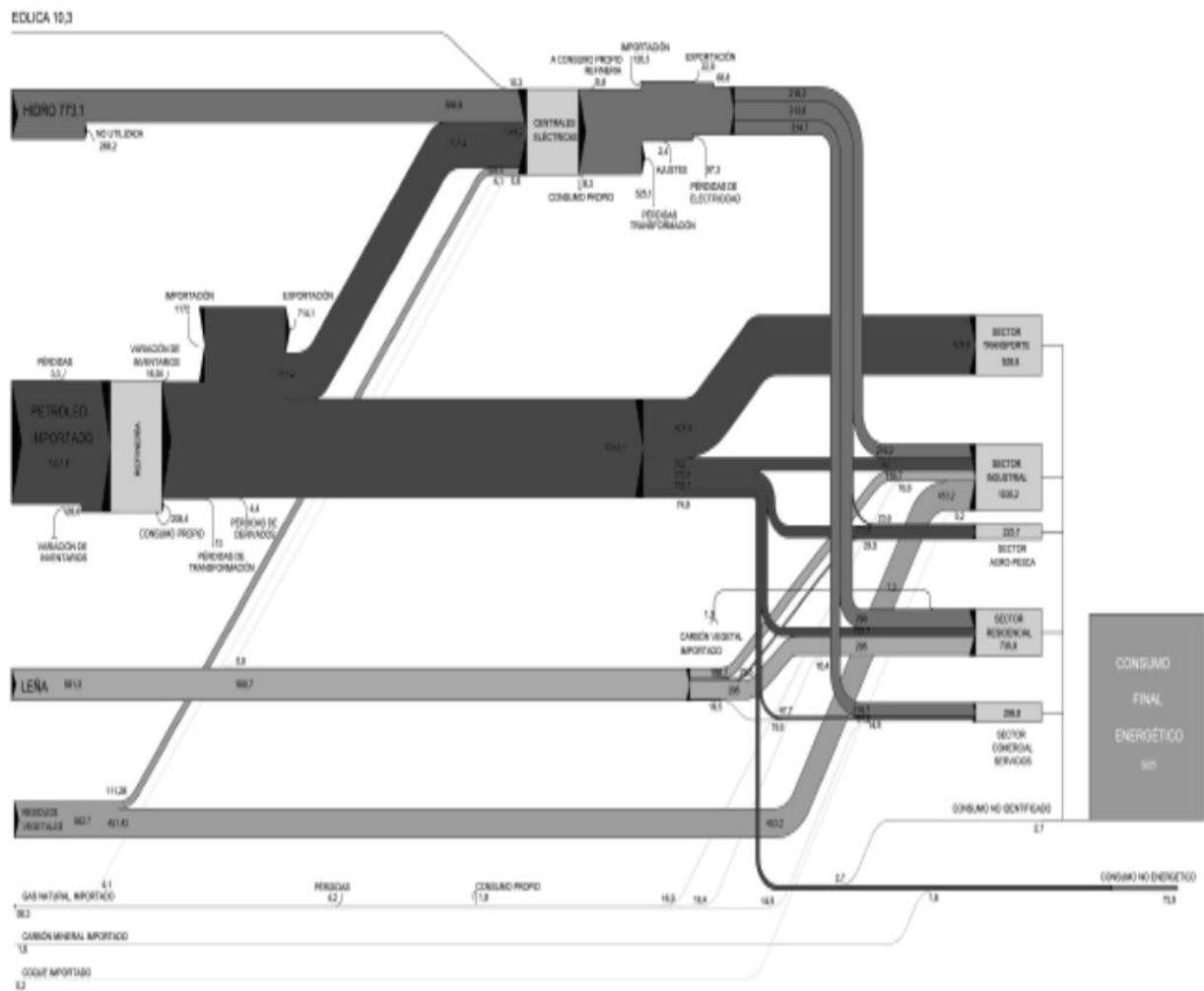


Figura 5: Balance energético de Uruguay 2009 (DNETN)

En el diagrama de flujo de energía del balance energético nacional 2009 ya referido (figura 5) se observa claramente la relación entre las fuentes de energía analizadas con los sectores de consumo, y su incidencia relativa. En los últimos años el consumo ha aumentado en todos los sectores y de todas las fuentes (a excepción del gas natural). El consumo final total de energía del país pasó de 1939,7 ktep en el año 1990 a 2364,6 ktep en el año 2005, llegando a 3107,2 ktep en el año 2008. En el año 2007, la importación de petróleo representó el 20 % del total de las importaciones del país. En el año 2005, se invirtió U\$S 1 millón diario para producir electricidad y en el año 2008 este valor aumentó a U\$S 5 millones diarios (PORTENOY, 2009). El aumento de la demanda, principalmente de energía eléctrica, se ha enfrentado mediante compra de energía a países vecinos, y recientemente se ha comenzado con fuentes renovables eólica y biomasa.

En función de la situación actual y de las acciones que promueve el Ministerio de Industria y Energía, Canabal y Achkar (2009) proyectan la situación de la matriz energética a cinco años, en diferentes escenarios (figura 6). El primero continuaría la tendencia evolutiva histórica de la matriz, el segundo incorpora las modificaciones consecuencia de las acciones planteadas por la Dirección de Energía y Tecnología Nuclear, y proponen un tercero que implicaría estrategias más radicales.

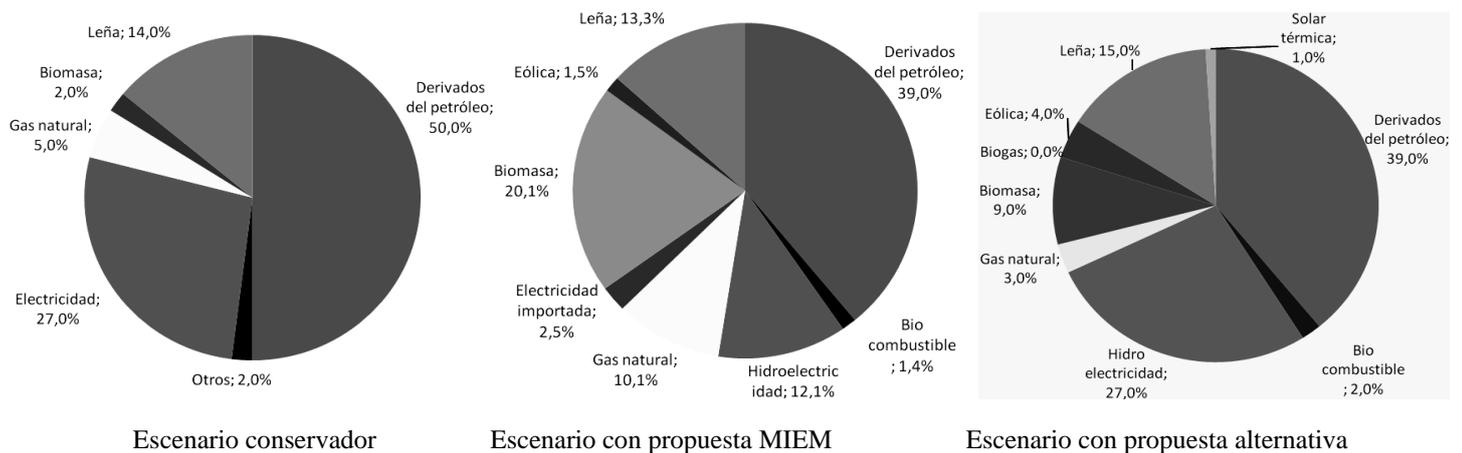


Figura 6 - Proyección de la matriz energética de Uruguay para el 2015 (basado en CANABAL y ACHKAR, 2009)

Como se visualiza en el gráfico, aún en el caso del escenario más favorable del estudio planteado, la matriz energética mantiene una fuerte dependencia con respecto a fuentes externas de energía, y en particular de derivados del petróleo. Teniendo en cuenta que dicho escenario favorable estaría optimizando las potencialidades con que cuenta el Uruguay en

materia energética, la conclusión es que la promoción de una matriz más sustentable no pasa solamente por la modificación de las fuentes de energía para suplir la demanda planteada y proyectada, sino en atacar el aumento de la demanda (CANABAL y ACHKAR, 2009, PORTENOY, 2009; BLANCO, 2009).

Esto se ha realizado por un lado en forma no sistemática, en tiempos de déficit hídrico, a través de medidas restrictivas obligatorias en el sector público sobre la iluminación y horarios de trabajo, y voluntarias en el sector privado, que se suspendían al recobrase la capacidad de generación de energía (PORTENOY, 2009).

Sin embargo, por otro lado, en forma reciente, la reducción de la demanda energética se ha comenzado a promover a través de medidas para lograr prácticas más eficientes en el uso de la energía. Desde ese punto de vista, esta eficiencia puede ser vista como una fuente energética adicional. Se estima un potencial de ahorro del 2% del consumo energético total acumulativo anual (MIEM 2009).

2.3. ENERGÍA Y CONSTRUCCIÓN EN URUGUAY

En el análisis de la energía asociada a la construcción en Uruguay, se distinguen tres sectores: el sector de la construcción propiamente dicho, es decir aquel que incluye específicamente los procesos industriales directamente asociados a la obra, sin considerar los sectores industriales de producción de insumos de construcción; el sector compuesto por las industrias ligadas a la construcción; y el sector de transporte.

El sector de la construcción, a nivel de fuentes secundarias, presenta una preponderancia del gas oil, con más del 80% del consumo total, y en segundo lugar la energía eléctrica con un 18% (DNE, 2008). El resto está constituido por otros derivados del petróleo (figura 7).

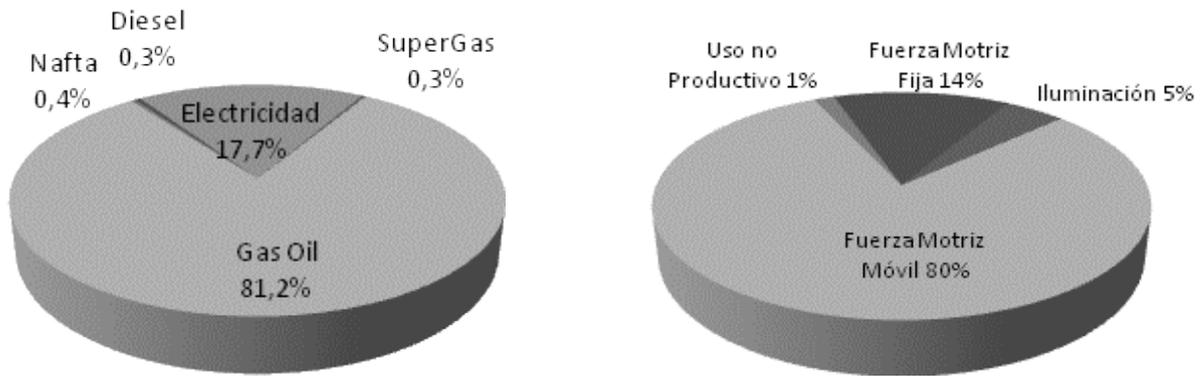


Figura 7 – Energía: Participación por fuentes y por usos en el sector construcción en Uruguay (DNE, 2008)

A nivel de consumo de energía por usos, el principal en este sector es la fuerza motriz móvil. Este factor está acentuado en los datos estadísticos disponibles por el hecho de que en la agregación de los mismos se incluyen las obras viales.

Con respecto a los subsectores industriales asociados a la construcción, se consideraron los siguientes: cemento, cerámica, metálicas básicas, vidrio, química, caucho y plástico, madera y maquinarias y equipos. Se observa que en los sectores más relacionados con la construcción (cemento, cerámica, metálicas), y que representan la mayor parte del consumo energético, los combustibles fósiles constituyen un gran porcentaje, con excepción de la madera, que tiene un alto componente de residuos de biomasa. En cambio, las industrias manufactureras tienen una vinculación menos directa con la construcción (caucho y plástico, química, maquinarias y equipos), presentan una incidencia mucho mayor de la energía eléctrica (ver figura 8).

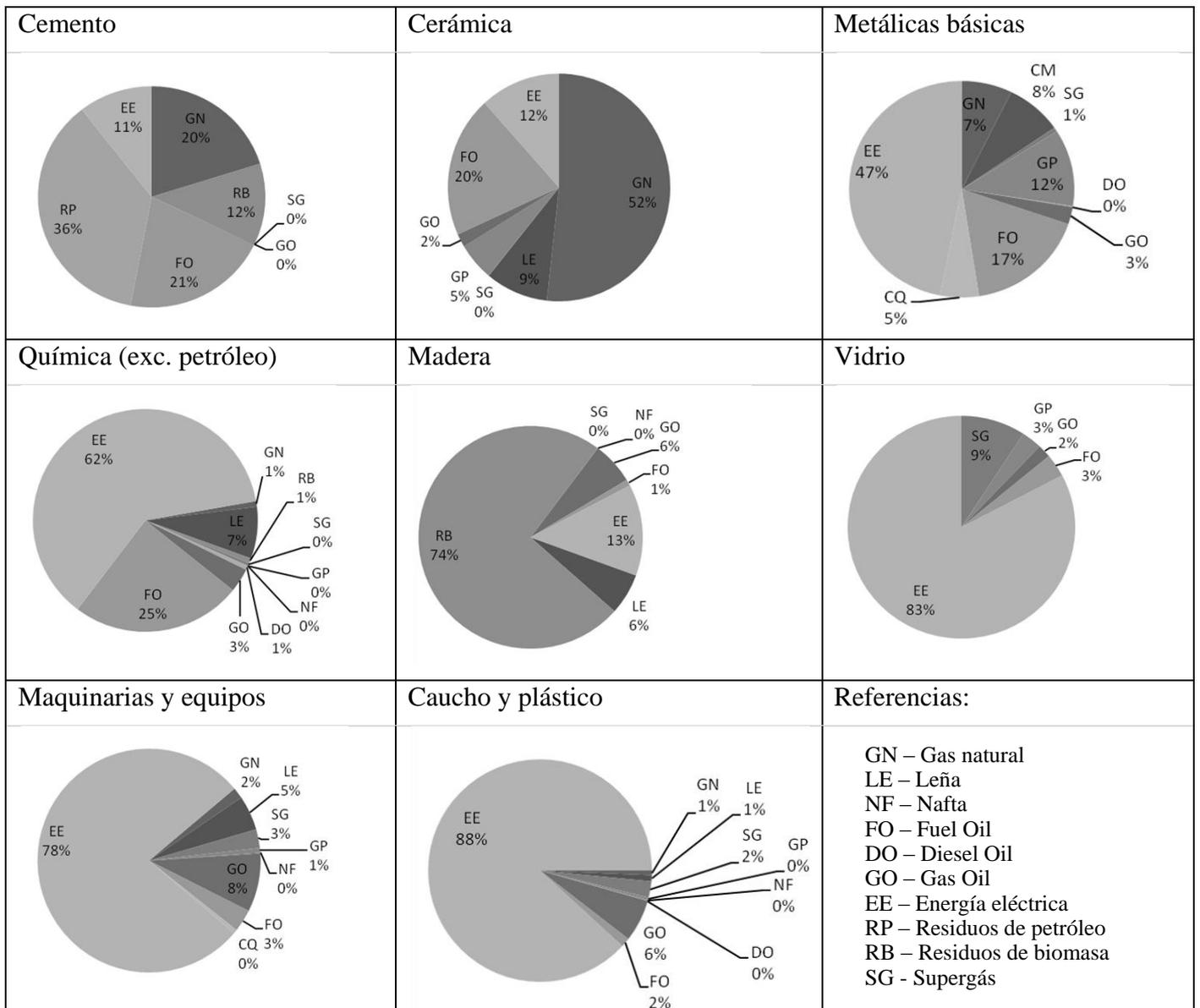


Figura 8 - Participación de fuentes por subsector industrial (en base a datos de la DNE, 2008)

En la comparación entre los subsectores identificados, se observa que en términos absolutos la industria más demandante de energía es la del cemento, que es la más estrechamente ligada a la construcción (figura 9). Solamente esta industria representa el 43% del total de los subsectores relacionados, y el 13,6% del total del sector industrial total.

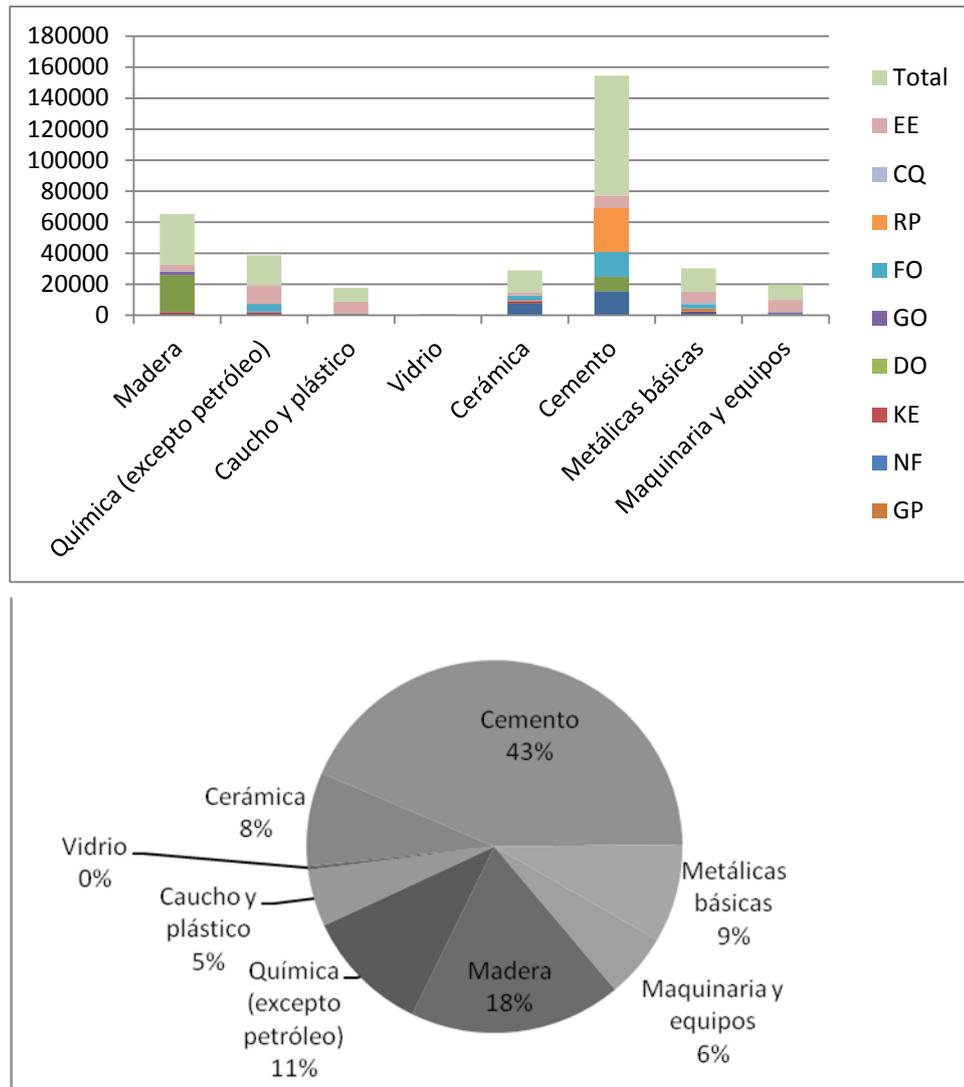


Figura 9 - Consumo de energía neta por subsectores asociados a la construcción y por fuentes (en Tep) (en base a datos de la DNE, 2008)

El sector transporte en Uruguay, significa un 29% de la demanda energética total, con un requerimiento exclusivo en el año 2006 de combustibles fósiles (DNE, 2006). El 35,6% del consumo en este sector corresponde al subsector de carga, cuya matriz energética a nivel de fuentes es de aproximadamente un 90% de gasoil y un 10% de nafta.

Esto implica que tanto el sector específico de la construcción como los sectores relacionados con él, presentan un consumo mayoritario de combustibles fósiles. Por tanto, las medidas que se adopten a efectos de reducir la energía incorporada en la obra redundará directamente en la reducción de emisiones. Además, como se planteará más adelante, la energía incorporada es utilizada como indicador de impacto ambiental. En los casos de utilización de energías no renovables, dicho indicador adquiere más relevancia.

2.4. CONSTRUCCION Y SUSTENTABILIDAD

La construcción sustentable es considerada un modo para la industria de la construcción de contribuir al esfuerzo de lograr un desarrollo sustentable, y de enfocar la responsabilidad de esta industria hacia el cuidado del medio ambiente.

Por un lado, la construcción juega un rol importante en la economía, con un 10% de la economía global dedicada a la construcción, y un 40% de los materiales que integran el flujo económico mundial (HILL y BOWEN, 1997). Juega asimismo un rol principal en proporcionar infraestructura para el desarrollo económico. Es por tanto esencial en todos los aspectos del desarrollo. Sin embargo, dado que tiene un significativo impacto sobre los recursos naturales, debe compartir las responsabilidades de trabajar por un futuro más sustentable (figura 10).

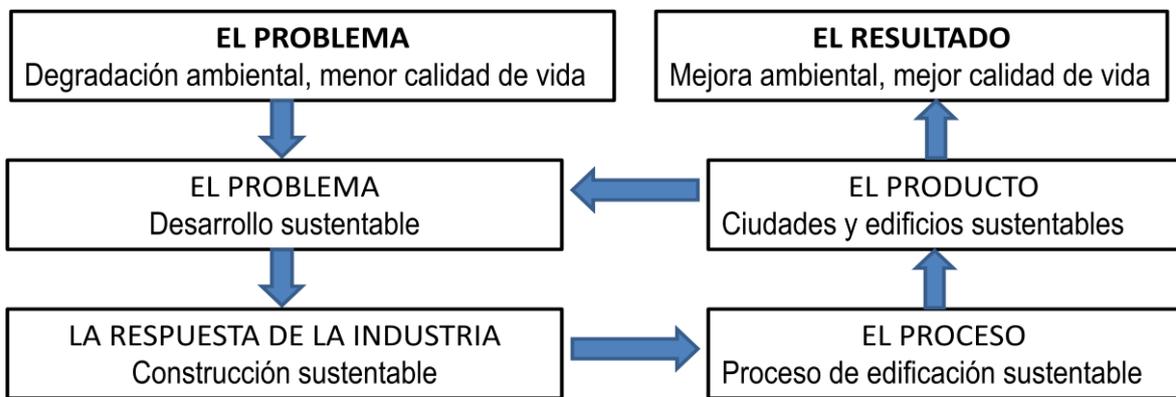


Figura 10- la construcción sustentable en la mejora del medio ambiente (adaptado de Huovila, 2010)

El desarrollo sustentable fue definido en la Comisión Mundial del Medio Ambiente en 1987 como: “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”. Construcción sustentable fue definida en la Primera Conferencia sobre Construcción Sustentable como: “la creación y mantenimiento responsable de un entorno edificado saludable, basado en principios ecológicos y por medio de un uso eficiente de los recursos” (HUOVILA, 1999).

Si bien la discusión enfatiza lo ecológico, Huovila (1999) plantea que la consecución de una construcción ecológica y económicamente sustentable habilita el logro de una construcción social y culturalmente sustentable.

La progresiva implementación de un desarrollo sustentable implica diversos abordajes. El gobierno británico propone los siguientes criterios a la hora de tomar decisiones: ubicar a las personas en el centro, tomar perspectivas a largo plazo, tomar en cuenta costos y beneficios, aún los que no son fácilmente mensurables monetariamente, crear un sistema económico solidario y abierto a nivel internacional, combatir la pobreza y la exclusión social, respetar los límites medioambientales, utilizar el principio de precaución, utilizar el conocimiento científico, tener mecanismos transparentes, con información, participación y acceso a la justicia, y que el que contamine, pague (Sustainable Construction Brief, 2004).

Dado que la construcción está, como veíamos, ligada al desarrollo económico, no se trata solamente de salvar el mundo, sino también de lograr un ambiente confortable para la humanidad. Por tanto, construcción sustentable no implica un alto total a la modificación irreversible del medio ambiente, sino que el grado de conversión debe estar adecuado a las capacidades asimilativas y regenerativas de los ecosistemas, lo cual no es actualmente el caso (REES, 2003).

Para el logro de una construcción sustentables se manejan diversas estrategias, entre las que se cuentan el diseño y la *lean construction* para minimizar desperdicios, la minimización del consumo de energía en los procesos de construcción y durante la operación del edificio, evitar poluir, preservación y aliento de la biodiversidad, conservación de los recursos hídricos, respeto hacia las personas y el medio ambiente local, monitoreo y reporte (Sustainable Construction Brief, 2004).

2.4.1. Impactos ambientales de la construcción

A finales de los años 60 y comienzos de los 70 comenzó la inquietud sobre la capacidad de los ecosistemas para soportar las siempre crecientes actividades económicas. En todo el mundo, la industria de la construcción es responsable por altos niveles de polución como resultado de la energía consumida para la extracción de materia prima, procesamiento y transporte. Los métodos industrializados de construcción, basados en el uso extendido de materiales con alta energía incorporada como aluminio, cemento, hormigón y acero, deben ahora adecuarse a nuevas directivas para la protección del ambiente. La industria de la construcción, al tiempo que fundamental para toda sociedad, es también responsable de la protección ambiental (DING, 2004). El aumento proyectado de la población mundial desde 6500 millones en 2005 a 9000 millones en 2035 (FERNANDEZ-SOLIS, 2008 apud DIXIT,

LAVY Y CULP, 2010), traerá aparejado un considerable aumento en las actividades de construcción, y por tanto de sus efectos sobre el ambiente.

Está creciendo la preocupación por el impacto que tienen las actividades del sector de la construcción en el medio ambiente y en la salud humana. La construcción y el medio ambiente están intrínsecamente ligados y es inevitable que esta industria se encuentre en el centro de la preocupación sobre impacto ambiental (DING, 2004). Levin (1997) refiere que los edificios son responsables por entre el 15% y el 45% de la carga ambiental total para las ocho categorías principales del ACV (análisis del ciclo de vida). La tabla 2 muestra una estimación de dichos impactos según data de Estados Unidos, aunque la proporción se mantiene similar en el resto del mundo (LEVIN, 1997). En la Unión Europea, el sector de la construcción y las edificaciones son responsables del 40% de la carga ambiental total (KHASREEN, BANFILL Y MENZIES, 2009), y en el Reino Unido, el sector residencial (construcción y ocupación) consume el 40% de la energía primaria en el país.

Tabla 2 - Carga ambiental de los edificios en USA

Uso de recursos	% del total	Emisiones contaminantes	% del total
Materias primas	30	Emisiones atmosféricas	40
Energía	42	Efluentes líquidos	20
Agua	25	Desperdicios sólidos	25
Tierra	12	Otros residuos	13

(fuente: LEVIN, 1997)

A pesar de que el período de construcción es comparativamente corto en relación a otras etapas de la vida del edificio, tiene varios efectos significativos sobre el ambiente (DING, 2004) (figura 11). Y los impactos derivados de actividades constructivas no se dan solamente en la fase inicial de producción del edificio, sino también en los procedimientos de mantenimiento y recuperación edilicia y en la fase de disposición final (Figura 12).

El impacto ambiental del uso de recursos no comprende solamente la limitada disponibilidad de recursos no renovables, sino que también abarca los derivados de los procesos de extracción. La extracción de recursos naturales causa cambios irreversibles en el ambiente natural rural y costero (CASTELLI y SPALLASSO, 2007). La subsecuente transferencia de estas áreas a sitios geográficamente dispersos no solamente conduce a mayores consumos de energía sino que también aumenta la cantidad de materia particulada en la atmósfera (DING, 2004).

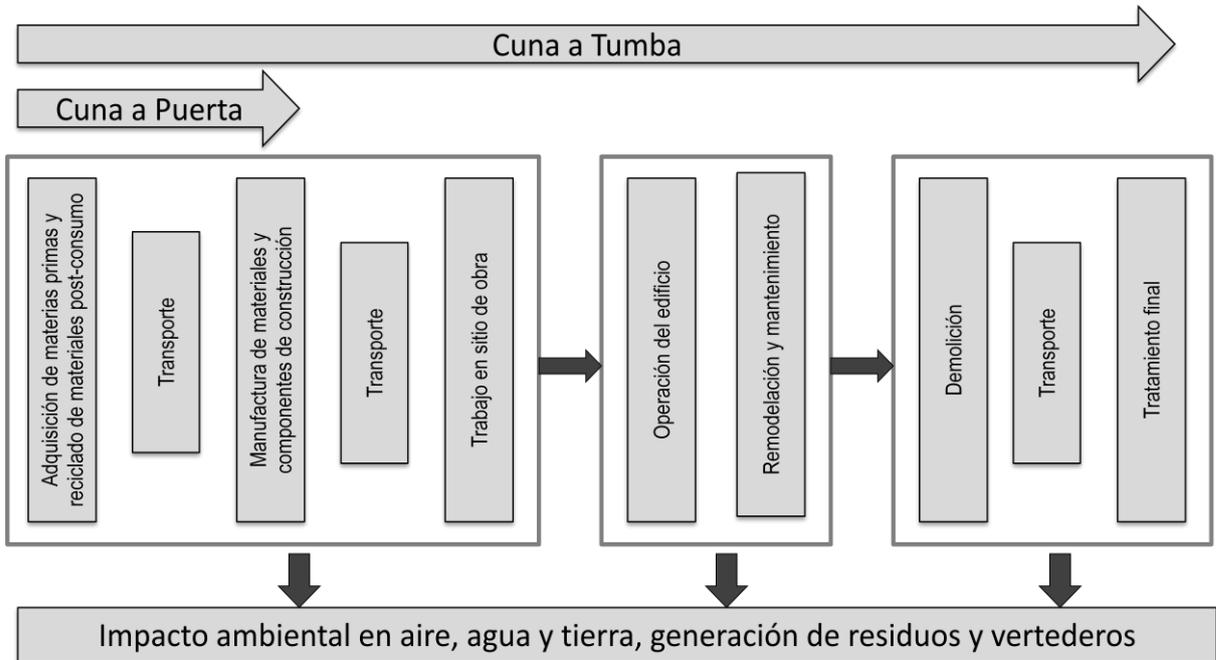


Figura 11: Impacto ambiental de las actividades de construcción
(adaptado de KHASREEN, BANFILL, MENZIES, 2009)

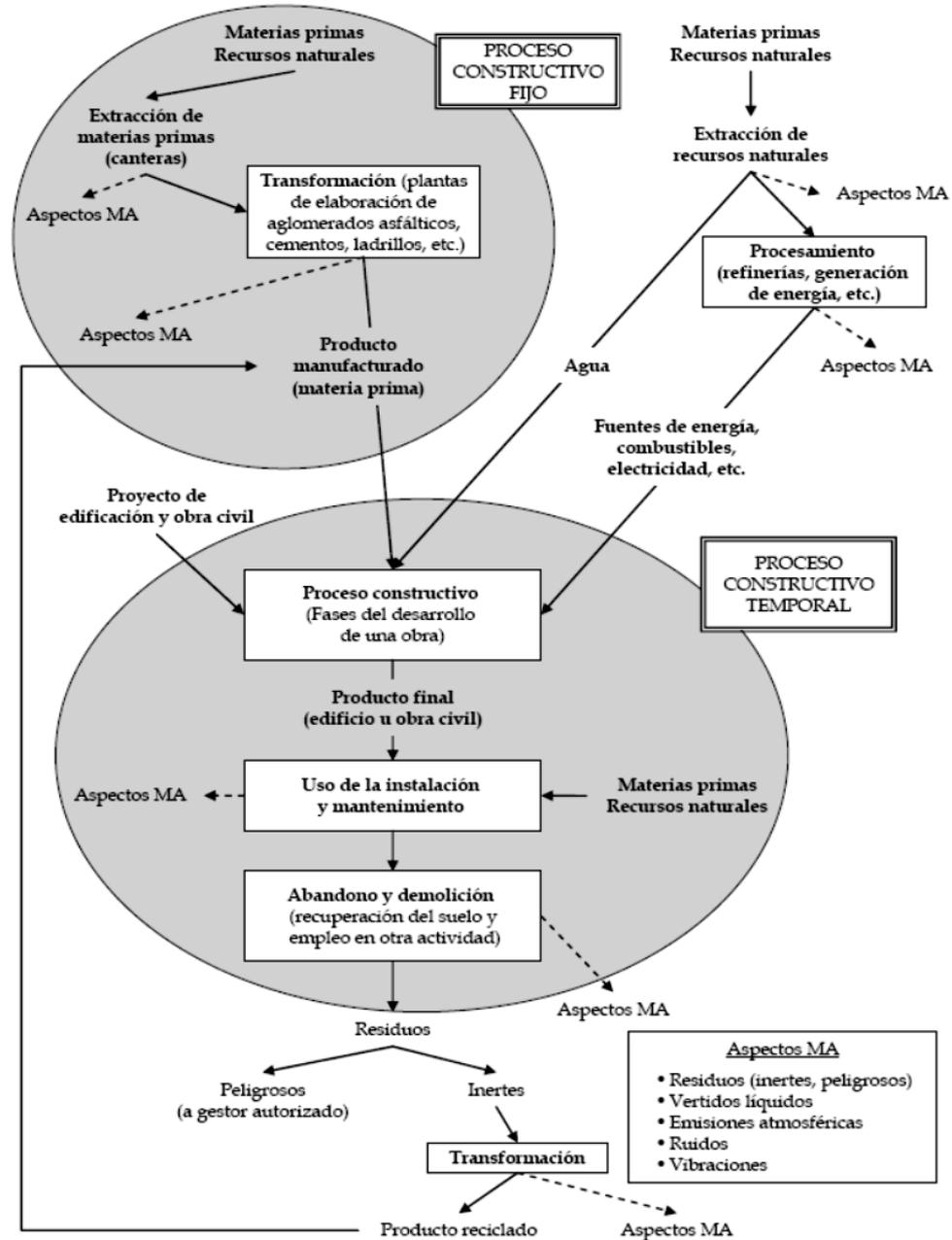


Figura 12: La construcción y el medio ambiente (PERQUIS Y MARQUINA, 2002)

2.4.2. Efectos del consumo de energía en el medio ambiente

Hoy en día la mayor parte de la energía mundial es generada con carbón, petróleo, gas natural, potencia nuclear e hidráulica. Desde la crisis energética de los años 70, ha existido una creciente preocupación sobre las reservas mundiales de recursos energéticos no renovables, y sobre los efectos de la combustión de combustibles fósiles y biomasa. La producción de carbón podría aumentarse, pero a un gran costo medioambiental y de salud humana. Las

previsiones consignadas en el International Energy Outlook (US EIA, 2010) La energía hidráulica está creciendo en popularidad, pero su capacidad ronda el 20% de la energía eléctrica a nivel mundial. Con respecto al petróleo y al gas natural, nuevas reservas deberán ser halladas para mantener el nivel de consumo actual, y se estima que en un futuro cercano se alcanzará el pico de consumo, que decaerá rápidamente.

Las energías renovables, solar, eólica, mareomotriz, undimotriz, geotérmica y nuclear están siendo utilizadas para suplementar la proporcionada por combustibles fósiles. Sin embargo, el almacenamiento a gran escala de estas energías aún constituye un desafío (Singh, 2008).

La producción y uso de la energía se ha convertido en fuente de preocupación ambiental. La investigación ha demostrado que su producción está relacionada con la degradación del ambiente. En la actualidad, los gobiernos y las empresas involucradas en la producción de energía no consideran apropiadamente los costos impuestos a la sociedad en términos de daños a la salud, y al medio ambiente natural y social (pérdidas de cosechas, destrucción forestal, contaminación).

Un informe del Banco Mundial (2000) da cuenta de cómo la contaminación aérea contribuye a la muerte prematura, bronquitis crónica, enfermedades respiratorias, muerte infantil. La contaminación del aire ha provocado pérdidas a los países en desarrollo por cerca del 6% de su producto bruto interno (BANCO MUNDIAL, 2000).

Asimismo, dicho informe plantea la pérdida de tierras agrícolas derivada de la producción de energía, debido a la contaminación, a la extracción minera de combustibles minerales y a las modificaciones de las corrientes de agua por las represas hidroeléctricas.

Por otro lado, la producción de energía contribuye al calentamiento global a través del dióxido de carbono (por ejemplo, de la quema de gas en el refinamiento de petróleo, particularmente en los países en desarrollo, y en varios casos, como es el del Uruguay en particular, de las centrales termoeléctricas), metano (debido a pérdidas de gas natural, compuesto básicamente por metano), óxido nitroso. Aproximadamente el 80% de los gases de invernadero emitidos por actividades humanas, está relacionado con la producción y uso de energía (EEA, 2006) (figura 14). En la figura 13, sólo la franja superior corresponde a emisiones no relacionadas con la energía.

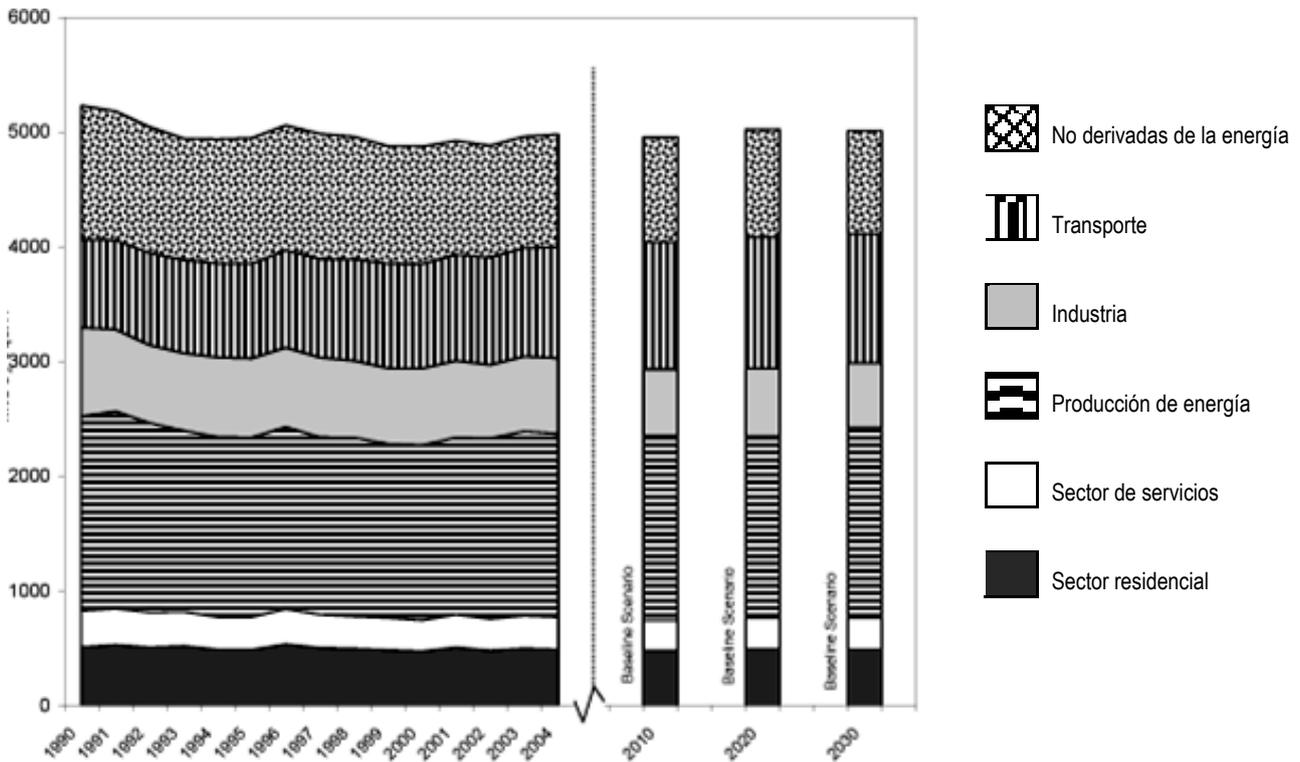


Figura 13: Emisiones totales de gases de invernadero derivadas y no derivadas de la energía, por sector (en toneladas métricas de CO2 equivalentes) (adaptado de EEA, 2006)

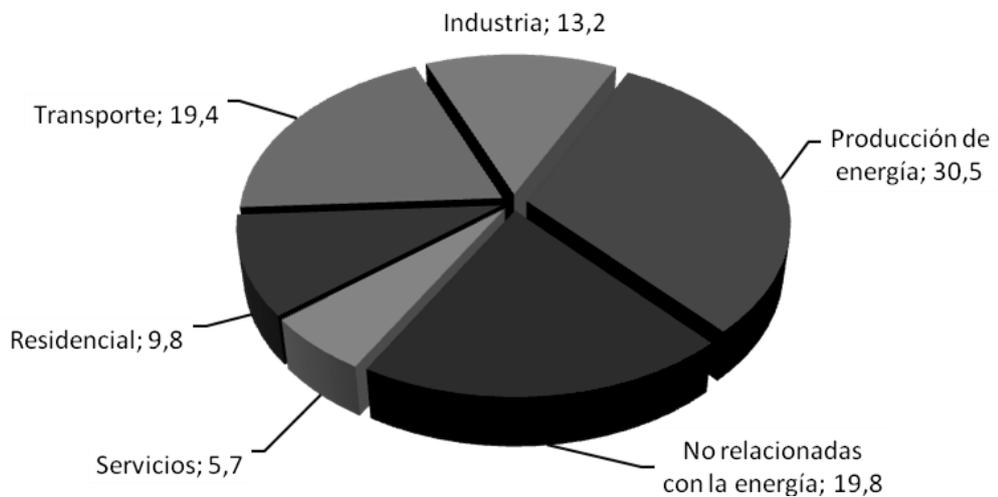


Figura 14: porcentajes de emisiones mundiales de gases de invernadero por sector (datos de EEA, 2009)

Se predice un aumento de la temperatura para fin de este siglo de entre uno y tres y medio grados Celsius, con consecuencias muy importantes en el nivel del mar, ecosistemas, agricultura, reservas de agua dulce y asentamientos humanos. La publicación del cuarto

reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) ha amplificado la percepción sobre la relevancia política de la problemática del cambio climático. El reporte plantea el aumento significativo de las emisiones de CO₂ durante las últimas décadas; la fuerte relación entre dichas emisiones y el calentamiento global es un hecho corrientemente aceptado en la comunidad científica internacional. En el reporte se considera un aumento de dos grados centígrados como una frontera crítica para la capacidad de regulación de los ecosistemas. Lograr este límite requiere una reducción de las emisiones de CO₂ del orden del 50 al 80% para el año 2050 (IPCC, 2007).

La reducción de las emisiones globales de gases de invernadero para prevenir el cambio climático es uno de los principales tópicos en la agenda política de muchos países (HEGNER, 2007).

La discusión sobre cómo lograr este objetivo está muy conectada al tema de conseguir un sistema de energía sustentable, en la medida que gran parte de las emisiones de CO₂ están asociadas a la generación y uso de la energía (HEGNER, 2007). Y un sistema de energía sustentable no sólo pasa por la sustitución de fuentes de energía no renovables por renovables, sino por una estrategia de reducción del consumo total de energía (IMBODEN Y JAEGER, 1999).

Las energías renovables también deben ser evaluadas en relación con su impacto ambiental. El hecho de que las energías sean renovables no significa que sean inocuas ambientalmente (VÁZQUEZ, 2001). En el caso de la energía hidroeléctrica, hay una gradual colmatación de los embalses por los sedimentos, así como una mayor evaporación por el aumento de superficie de agua, que disminuye gradualmente la capacidad energética. Además se la cuestiona gravemente por el sumergimiento de tierras cultivables y el desplazamiento de poblaciones de las zonas anegadas (World Watch Institute, 2010), así como por la modificación de napas freáticas, alteración de ecosistemas locales que fomentan en algunos casos el desecamiento del bosque, disminución del caudal de los ríos dificultando la agricultura y la ganadería. Incluso se está analizando el posible rol que juega el peso de millones de toneladas de agua en zonas aledañas a fallas tectónicas, en la actividad sísmica (Fernandez Muerza 2007).

Con respecto a la leña, si bien debe sufrir un proceso de combustión con emisión de CO₂, se considera que dicha emisión es equivalente al CO₂ absorbido durante el período de

crecimiento vegetal. Además no producen compuestos sulfurados ni nitrogenados y la emisión de partículas sólidas es mínima (PENDONES, 2003). Pero la inocuidad ambiental solamente se logra con bosques manejados sustentablemente. Esa no es con frecuencia la realidad, grandes cantidades de monte nativo y selvas se consumen al margen de políticas de mantenimiento y de tasas de renovación naturales.

Así pues, si bien no pueden plantearse como equivalentes los efectos globales del consumo de combustibles fósiles, con los efectos locales y regionales de estas fuentes mencionadas, esta limitación opera para la cuantificación absoluta de los impactos ambientales, pero no como un indicador primario de los mismos, y no inhabilita la comparación relativa entre soluciones constructivas alternativas, ni la toma de decisiones en materia de eficiencia energética.

2.4.3. Consumo de energía en la construcción

Existe una fuerte vinculación entre la energía y la edificación, en la medida en que es indispensable la primera tanto para la ejecución de los edificios, como para su funcionamiento durante toda su vida útil. Los edificios consumen energía y otros recursos desde su diseño y construcción, durante su operación y en el momento de su demolición final. En cada etapa, son consumidas diferentes cantidades de energía, con su correspondiente carga de contaminación.

Los edificios actuales dependen del suministro de energía, al punto que si los combustibles que la proveen no estuvieran disponibles, los edificios quedarían inoperables o inhabitables (DING, 2004). La energía es utilizada para calefacción, ventilación, enfriamiento e iluminación, así como para transporte vertical y bombeo. En términos relativos, la porción de energía que demandan las edificaciones es considerable. En Estados Unidos, representa aproximadamente el 40% de la energía total consumida (tabla 3), y en Gran Bretaña la incidencia es aún mayor (FAY, 1999).

De acuerdo al World Resources Institute (2007), la producción de energía comercial mundial ha crecido un 30 por ciento entre 1990 y 2005, con un aumento de la participación relativa de los combustibles fósiles (International Energy Agency, 2007). Y la industria de la construcción es uno de los mayores consumidores de energía comercial, ya sea en forma de combustibles fósiles o electricidad (DING, 2004). El consumo derivado de las actividades de construcción se da por un lado en el proceso específico de la obra, y por otro en la manufactura de los materiales y componentes insumos de la industria de la construcción.

Materiales como el acero estructural, el hormigón armado, y el aluminio, consumen grandes cantidades de energía durante su producción, con importantes emisiones de CO₂ derivadas de los procesos de manufactura

A pesar de ello, la investigación tradicionalmente ha estado más enfocada hacia el análisis de la energía operacional de los edificios (TRELOAR, 1998, ITARD, 2009), debido en parte al hecho de que gran parte de la investigación se realiza en países desarrollados, con una matriz energética fuertemente basada en combustibles fósiles y situados generalmente en regiones con inviernos rigurosos, y a que se entendía que la demanda de energía para la operación de los edificios durante su vida útil era significativamente mayor que la necesaria para su construcción, al punto que ésta podía ser despreciada. Sin embargo, esa tendencia ha sido recientemente fuertemente cuestionada por estudios que han planteado la importancia del consumo de energía en los diferentes procesos de obra que requiere una edificación (UN HABITAT 1991), no sólo en su producción inicial, sino en su mantenimiento y deconstrucción final. La energía no se limita a los procesos directos en la obra, sino que incluye la demandada por la producción de los insumos de construcción y los transportes asociados. Treloar (2003) sostiene que la energía incorporada en las edificaciones en Australia representa el equivalente de 20 a 50 años de su energía operacional. Kuhn (2006) por su parte, plantea que la energía incorporada en la construcción de un conjunto de viviendas en Brasil resulta equivalente a diecisiete años de energía eléctrica operacional de las mismas viviendas. Por otro lado, la abundante investigación sobre energía operacional de las edificaciones ha llevado a la consecución de edificios muy eficientes energéticamente, para los cuales la importancia relativa de su energía incorporada aumenta considerablemente.

De esto se desprende que la sola mejora en la eficiencia energética de las edificaciones no resulta en el máximo potencial de reducción de consumo de energía, ya que hay una parte sustancial del consumo de energía en la cadena de producción de materiales, componentes y servicios para la construcción.

2.4.4. Energía y edificación en Uruguay - Marco normativo y acciones emprendidas

El marco normativo creado recientemente para promover la eficiencia energética en nuestro país, está orientado en numerosos aspectos hacia el uso de las edificaciones.

La ley de Energía Solar Térmica (2009), está expresamente orientada a las nuevas edificaciones y a los productos necesarios para equiparlas.

La ley de Uso Eficiente de la Energía declara de interés nacional el uso eficiente de la energía con el propósito de asegurar la competitividad de la economía nacional, contribuir con el desarrollo sostenible del país y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. A su vez, la Ley busca incorporar a la eficiencia energética como un componente de la política energética del país generando una institucionalidad con un horizonte de largo plazo y permitiendo sustentar las acciones en esta materia, generando sistemas de incentivos para la eficiencia energética. (DNETN, 2009).

A nivel departamental, en el 2009 se aprobó la Reglamentación municipal de aislación térmica, “Normas para edificios destinados a viviendas”, que plantea parámetros mínimos de desempeño referentes a la aislación térmica de techos y paredes en viviendas, así como prescripciones en los huecos de fachada y protecciones solares para los cerramientos vidriados exteriores. Apunta a la reducción de la demanda de energía para acondicionamiento térmico, promoviendo el uso eficiente de la energía en el departamento y contribuyendo a un desarrollo sostenible y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (IMM, 2009).

Asimismo se llevan a cabo acciones a través de programas públicos. El programa de Eficiencia Energética, de alcance nacional, está orientado a mejorar el uso de la energía por parte de los usuarios finales de todos los sectores económicos. Dentro de este programa, se realizó un contrato entre el MIEM y UNIT, el cual tiene como cometido la creación de normas, entre otras, relativas a la eficiencia energética en edificios, las cuales servirán como referente para el establecimiento de reglamentaciones de eficiencia energética. El programa, entre otros objetivos, contempla la generación de normas constructivas que apuntan a la eficiencia energética en edificaciones (PORTENOY, 2009).

El programa de Normalización y Etiquetado, desde el año 2006, se propone elaborar normas y especificaciones técnicas para clasificar, de acuerdo a su grado de eficiencia, productos y equipos que consumen energía.

El programa Nacional de Cambio Climático, a cargo de la DINAMA, fue creado en 1994 para cumplir con los compromisos asumidos por el país en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kyoto. Incluye el proyecto para la

sustitución parcial de combustibles fósiles por cáscara de arroz en el proceso de fabricación de cemento, Cementos Artigas SA, con la reducción de 98.000 toneladas de CO₂ en 10 años (PORTENOY, 2009).

A nivel privado, la Sociedad de Arquitectos del Uruguay tiene desde el año 2004 una Comisión de Eficiencia Energética cuyo objetivo es difundir entre los arquitectos la necesidad de tener en cuenta aspectos vinculados a la eficiencia energética en la edificación, tanto desde el punto de vista del diseño como de la construcción y su uso posterior. La idea es concientizar que la profesión de arquitectos no es ajena al compromiso con las generaciones futuras por el cuidado ambiental, uno de los desafíos más importantes de nuestros tiempos (PORTENOY, 2009).

Como se desprende de lo referido ut supra, la concreción de acciones en el plano de la energía es reciente en nuestro país, y el énfasis en lo que hace a las edificaciones está puesto específicamente en el período de operación de las mismas.

2.5. CONSTRUCCIÓN RESIDENCIAL EN ALTURA EN URUGUAY

En Uruguay, la experimentación de sistemas constructivos no tradicionales es limitada (RECALDE y PRESTO, 2003), y orientada en general hacia la prefabricación de componentes. Las experiencias son aún más restringidas en lo que tiene que ver con edificios residenciales en altura. Los edificios en altura constituyen un segmento muy significativo de la construcción residencial (figuras 15 y 16).

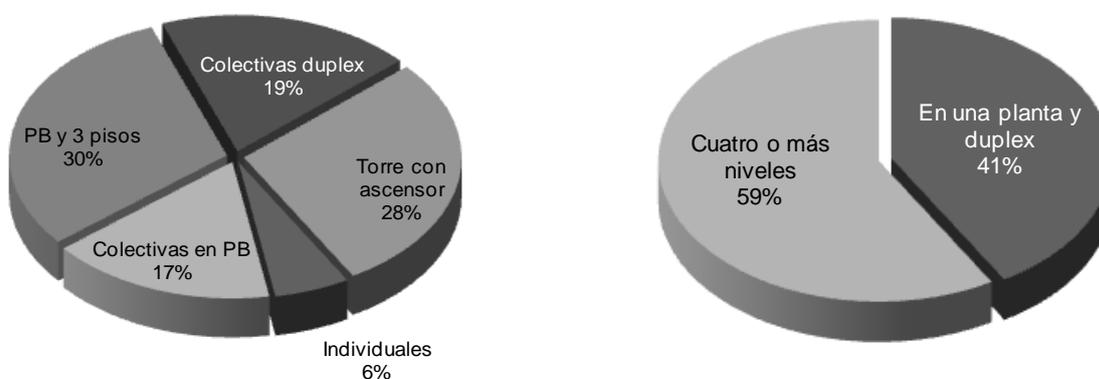


Figura 15 - Relación de volumen físico de construcción de viviendas por tipología en Uruguay. Período 2000-2008 (según datos INE, 2009)

VALOR BRUTO DE PRODUCCIÓN A PRECIOS CORRIENTES, ESTRUCTURA, VOLUMEN Y PRECIOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS NUEVAS, SEGÚN SEMESTRE Y TIPOLOGÍA
Montevideo, Segundo Semestre 2010

TIPOLOGIAS DE VIVIENDA	V.B.P \$ corrientes	Importancia de cada tipo en %	Superficie construida m ² fictos	Precio por m ² \$
SEGUNDO SEMESTRE 2010				
T O T A L				
	2.321.448.618	100,00	108.890	21.319
1 Económica en planta baja	14.144.197	0,61	825	17.144
2 Económica duplex (1)	-	-	-	17.372
3 Mediana (dúplex o no)	16.031.904	0,69	574	27.938
4 Suntuaria con calefac. (dúplex o no).	205.402.787	8,85	5.829	35.240
5 Colectivas económicas en p.b. s/infraestr. (1)	5.904.832	0,25	394	14.998
5a Idem 5 con infraestructura propia (1)	1.613.111	0,07	77	21.035
6 Colec.econ.o med.PB y 3 s/asc.s/infraestr. (1)	5.607.304	0,24	392	14.305
6a Idem 6 con infraestructura propia (1)	13.679.494	0,59	850	16.103
7 Colec.econ.o medianas duplex s/infraestr(1)	68.148.098	2,94	3.925	17.361
7a Idem 7 con infraestructura propia	12.445.473	0,54	616	20.220
8 Torre económica con ascensor	82.022.878	3,53	5.694	14.404
9 Torre mediana con ascensor	333.007.472	14,34	22.317	14.922
10 Torre suntuaria con ascensor y calefac.	1.563.441.069	67,35	67.399	23.197

Figura 16 - Incidencia de la tipología en altura en la construcción de viviendas (INE, 2011)

Éstos se realizan, salvo excepciones puntuales, con estructura, entrepisos y cerramientos superiores en hormigón armado, muros exteriores en mampostería e interiores en mampostería o placas de yeso.

La carencia de una industria siderúrgica de escala, la conveniencia económica de sistemas con uso intensivo de mano de obra, la altura limitada de los edificios (mayoritariamente en 27 y 31 metros, de acuerdo al Plan de Ordenamiento Territorial, IM) promueven la continuidad del uso del hormigón armado en las estructuras.

Los tipos estructurales en hormigón armado más utilizados para edificios residenciales en altura, de acuerdo a las luces involucradas son losa maciza, viga y pilar, y losa maciza y pilar.

Los muros exteriores de edificios en altura son realizados en su gran mayoría con mampostería cerámica. Los muros interiores, si bien aún son resueltos mayoritariamente con mampostería cerámica, la alternativa de tabiquería con placas de yeso es cada vez más

difundida. En la edición de 1995 de la publicación de tablas y ábacos para el cálculo estructural de la Facultad de Arquitectura, a nivel de cerramientos verticales opacos se listan cargas exclusivamente de soluciones en mampostería cerámica (ICE – FARQ, 1995). Lo mismo sucede con la tabla de rendimientos de materiales publicada por el mismo instituto (ICE – Farq, ,1981). La Intendencia de Montevideo recién en el año 2010 modificó la norma de muros divisorios entre unidades de propiedad horizontal para admitir tabiques de placas de yeso (art. D.3366.1 Digesto departamental).

Existen varias alternativas dentro de los mampuestos cerámicos, y si bien han sido analizados en varias propiedades (Fontana, 2011), no existen datos sobre su energía incorporada.

Tabla 3 - Oferta de mampuestos cerámicos para muros en Uruguay
(FONTANA, 2011)

TIPO	PESO	DIMENSIONES	RENDIMIENTO	
Denominación	Kgf	cm	cantidad por m2	
Ladrillo de campo	2,5	5 x 11 x 24	tizón = 120	soga = 60
Ladrillo de máquina	2,8	5,5 x 12 x 25	tizón = 120	soga = 60
Ladrillo rejilla	3,3	12 x 12 x 25	tizón = 64	soga = 32
Rejillón	5,1	12 x 17 x 25	tizón = 40	soga = 30
Ticholo 2 bocas	2,25	7 x 12 x 25	plano = 52	canto = 32
Ticholo 4 bocas	3,6	10 x 12 x 25	plano = 40	canto = 32
Ticholo 6 bocas	4,85	12 x 17 x 25	plano = 32	canto = 24
Ticholo 8 bocas	3,8	10 x 12 x 25	plano = 36	canto = 32
Ticholo 10 bocas	5,4	12 x 25 x 25	plano = 32	canto = 16
Ticholo Tabicol	4,25	7 x 25 x 25		canto = 16
Ticholo Gigante	8,5	17 x 25 x 25		canto = 16
T. Doble gigante	11,7	25 x 25 x 25		canto = 16

3. ENERGÍA INCORPORADA

3.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

. El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología para evaluar las cargas ambientales de procesos y productos durante todo su ciclo de vida (KHASREEN, BANFILL y MENZIES, 2009). La norma ISO 14040 la define como una técnica para evaluar los aspectos ambientales y potenciales impactos asociados a un producto (PROKOPY, 2010).

La evaluación incluye la totalidad del ciclo de vida de un producto (cradle to grave), proceso o sistema, abarcando la extracción y procesamiento de materias primas, manufactura, transporte y distribución; uso, reuso, mantenimiento, reciclado y disposición final (SCHENCK, 2000) (figura 17).

El ACV intenta dar una medida del impacto ambiental global de un producto (HAKKINEN, 1994 apud FAY et al. 2000). A partir de la información cuantitativa, a menudo se establecen valoraciones cualitativas a efectos de desarrollar un indicador único que permita la comparación directa entre productos (FAY et al. 2000, SCHENCK, 2000).

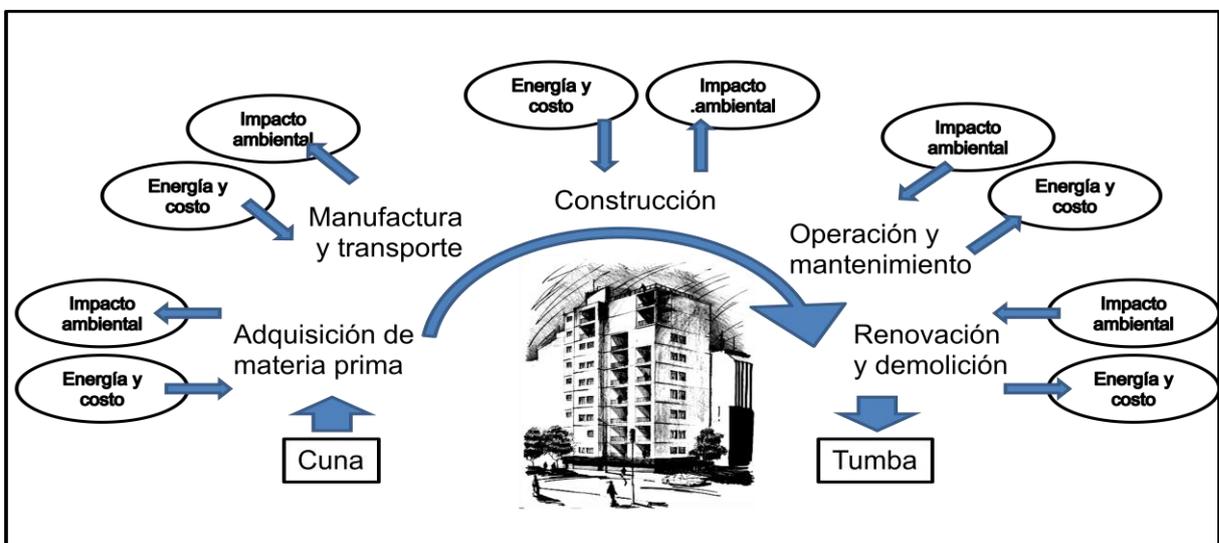


Figura 17: Ciclo de vida de un edificio (basado en EMSD Hong Kong, 2009)

Sin embargo, esta metodología presenta asimismo una serie de problemas. El ACV de las edificaciones está menos avanzado que en otras industrias (KHASREEN, BANFILL y MENZIES, 2009).

Uno de los problemas es el propio edificio, cuya producción es complicada y cuyo período de vida es prolongado, con etapas a futuro que se establecen en base a supuestos. Hay poca estandarización en el sector de la construcción, por lo que existen importantes carencias de registro de información. Se hace difícil, por la naturaleza de la industria de la construcción, generar bases de datos internacionales disponibles para todos los usuarios, que puedan hacer comparables los estudios de ACV (KHASREEN, BANFILL y MENZIES, 2009). Debería contarse con un marco, un protocolo y herramientas de conversión que permitieran la comparación entre dos estudios de ACV, que fueran internacionalmente aceptados.

Las bases de datos actualmente disponibles no presentan transparencia, y la mayoría está basada en materiales simples y locales, pero no en componentes o compuestos. Existe una necesidad de producir bases de datos locales que tengan la posibilidad de convertir sus resultados en una forma comparable a nivel internacional.

En general, no es posible comparar directamente dos estudios de ACV para edificios, debido a diferencias de objetivo, campo, metodología e información utilizada. Existen muchos más estudios sobre impactos de materiales y componentes de las edificaciones que sobre el proceso total de la construcción de edificios (KHASREEN, BANFILL y MENZIES, 2009).

Es muy difícil considerar el impacto ambiental total de los edificios porque las trece categorías de impacto (consumo de energía, potencial de calentamiento global, generación fotoquímica de ozono, consumo de agua, degradación de recursos bióticos, acidificación, toxicidad humana, generación de desperdicios, eco-toxicidad, eutroficación, emisiones aéreas, consumo de recursos, otros impactos) son medidas en unidades diferentes. La simple adición de impactos es insuficiente y es necesario reducir todos a una misma escala común, para luego aplicar factores de ponderación que den cuenta de su importancia relativa. La metodología BRE, por ejemplo, propone normalizar las emisiones de cada categoría de impacto comparándolas con las emisiones de un ciudadano europeo promedio, y generando así un único número carente de dimensión. Este número es multiplicado por un factor de ponderación (o factor de valoración según la ISO 14040) obtenido a través de la consulta a un panel de diez expertos, y escalando los valores a cien. Así, los impactos ambientales son

rankeados según su importancia percibida, adjudicando la mayor proporción del puntaje a las emisiones de CO₂ equivalentes. Otros abordajes con sistema similar tienden a ser subjetivos y tanto la normalización como la ponderación relativa son variables, y los resultados terminan siendo susceptibles de manipulación.

Los ACV son costosos (CONWAY-SCHEMPF, 2008), insumen mucho tiempo, son muy complejos y la información necesaria no siempre está disponible. Para algunos productos en particular como una edificación, un ACV implicaría la evaluación cientos de subproductos y materiales, de los más de cuarenta mil insumos existentes para la construcción (STERNER, 2002). Khasreen, (et al., 2009), frente a esta situación observa por un lado la necesidad de realizar estudios para establecer el efecto de materiales alternativos en la performance energética del edificio, y la óptima relación entre ellos. Por otro lado, plantea la inexistencia de este tipo de estudios en países en desarrollo, considerándolo un tema de urgencia en función del potencial que la industria de la construcción tiene en los mismos.

3.2. ANÁLISIS ENERGÉTICO

Toda actividad de transformación o transporte implica el uso de energía en alguna forma. La comprensión de los flujos energéticos es necesaria para establecer cómo se consume la energía. La determinación de la energía requerida para la producción de un bien o de un servicio, a través de formas de evaluación sistemáticas, constituye el análisis energético.

La IFIAS (Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados), define el análisis energético como la determinación de la energía consumida en el proceso de obtención de un bien o servicio dentro de la estructura definida de convenciones o de la aplicación de informaciones obtenidas de ese modo (WILTING, 1996).

3.2.1. Energía primaria y secundaria

La energía comercial es medida en el punto de entrada a la propiedad. La energía utilizada por el consumidor es conocida como “energía entregada”. Sin embargo, una considerable cantidad de energía es utilizada para producir la energía entregada, y dicha cantidad varía según el tipo de energía entregada y según el modo de producirla (FAY et al. 2000) (figura 18).

La energía primaria es la que se encuentra presente en la naturaleza. El procesamiento de esta energía para producir “energía entregable” está directamente asociado a las emisiones de CO₂,

o a otro tipo de impactos ambientales. Por tanto, la energía primaria es un indicador más real de las implicaciones ambientales que la energía entregada (FAY et al 2000), y es el que debería utilizarse en el análisis de la energía incorporada (HAYNES, 2010).

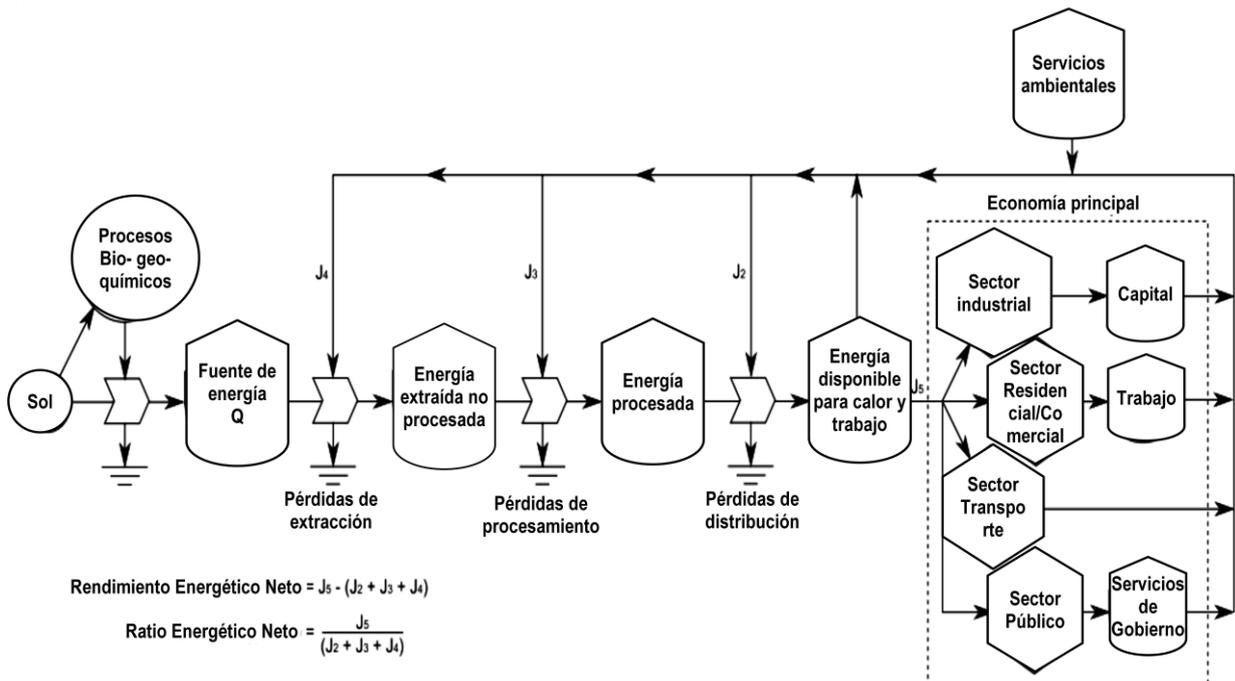


Figura 18: Relación entre energía primaria y energía neta (adaptado de MURPHY et al., 2011)

Para el caso particular de la energía eléctrica, existe la discusión, como propone Øvergaard (2008) sobre si se trata de energía primaria o energía secundaria, planteando que es relevante para su clasificación la fuente que la produce. Por tanto se entiende más apropiado, cuando la fuente básica de producción de energía eléctrica es renovable, plantear la diferencia entre energía bruta, y energía neta, siendo la primera aquella a la que no se le han deducido las pérdidas por transformación, transporte, transmisión, almacenamiento y la energía no utilizada, y energía neta aquella que sí tiene dichas deducciones.

Requisitos energéticos de energía

En el cálculo propuesto por la IFIAS para el Requerimiento energético total, son computadas las conversiones de energía primaria a secundaria. Para estas conversiones se definen coeficientes denominados requisitos energéticos de energía, que expresan las cantidades de unidades de energía primaria utilizadas para generar una unidad de energía secundaria,

expresadas en MJ/MJ. Los valores de dichos REE serán siempre mayores o iguales a la unidad, caso éste que significaría una eficiencia en la conversión del 100% (TAVARES, 2006). El coeficiente inverso del REE será la tasa de eficiencia energética (WILTING, 1996). Cada tipo de energía tendrá su propio REE.

3.3. NIVELES DEL ANÁLISIS ENERGÉTICO

El valor total de energía necesario para la obtención de un producto o servicio es denominado Requerimiento Bruto de Energía, o en inglés, Gross Energy Requirement (GER), y se expresa como cantidades de energía por unidad de masa o de producto. En contraposición, el Requerimiento de Energía de Proceso o Process Energy Requirement (PER), enfoca la energía directamente demandada por el proceso de producción.

La IFIAS define cuatro niveles de análisis energético, con grados diferentes de inclusión de factores de demanda energética (figura 19).

Un primer nivel que contiene los requisitos de energía del proceso, y que se presentan en términos de energía secundaria. Sus límites estarían definidos por la etapa "gate to gate", es decir que sólo incluyen los consumos dentro de la fábrica. Corresponderían aproximadamente al 50% del GER. Un segundo nivel incluye la energía directa consumida en la extracción u obtención de las materias primas, así como los requerimientos de energía primaria de la energía directa del primer nivel. Sumado al valor del primer nivel, responderían por hasta un 90% del GER (TAVARES, 2006). El tercer nivel agrega los requerimientos energéticos para la obtención de los bienes de capital, como máquinas, locación y medios de transporte necesarios al proceso. Finalmente un cuarto nivel de análisis que incorpora los requisitos energéticos de los bienes de capital necesarios para fabricar los bienes de capital del tercer nivel. En todos los niveles deben considerarse además las contribuciones derivadas de los transportes.

De acuerdo a estas categorías de análisis, el IFIAS consideraría óptimo, en términos de viabilizar la investigación en procesos complejos, la consideración de la energía incorporada como la correspondiente a los requerimientos energéticos de los dos primeros niveles (IFIAS, 1975).

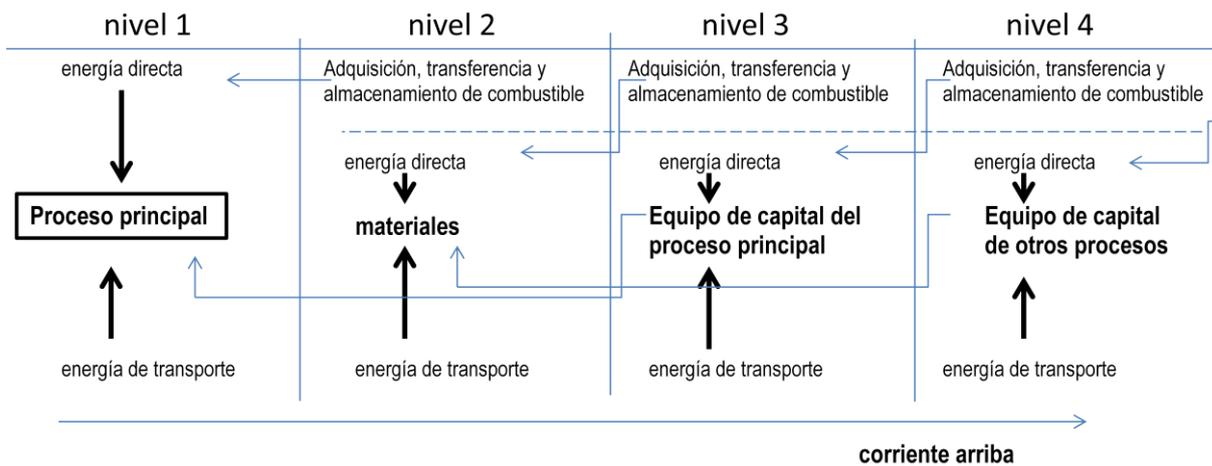


Figura 19 - Niveles de análisis energéticos (IFIAS, 1974)

3.4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ENERGÉTICO

Un análisis de ciclo de vida energético (LCEA por sus siglas en inglés), es una forma simplificada aunque significativa para la conducción de un análisis de impactos ambientales. Con base en los análisis de ciclo de vida, este tipo análisis energético aborda específicamente los datos de consumo energético directo e indirecto. No utiliza el enfoque multianálisis del ACV, pero permite evaluar aspectos ambientales importantes como las emisiones de gases de invernadero. Al tener una estructura más simple que la del ACV, demanda menores costos y tiempos de elaboración (figura 20).

El objetivo del ACVE no es el de sustituir un método de evaluación ambiental exhaustivo cual es el ACV, sino facilitar la toma de decisiones en materia de eficiencia energética y de impactos ambientales asociados al consumo de energía.

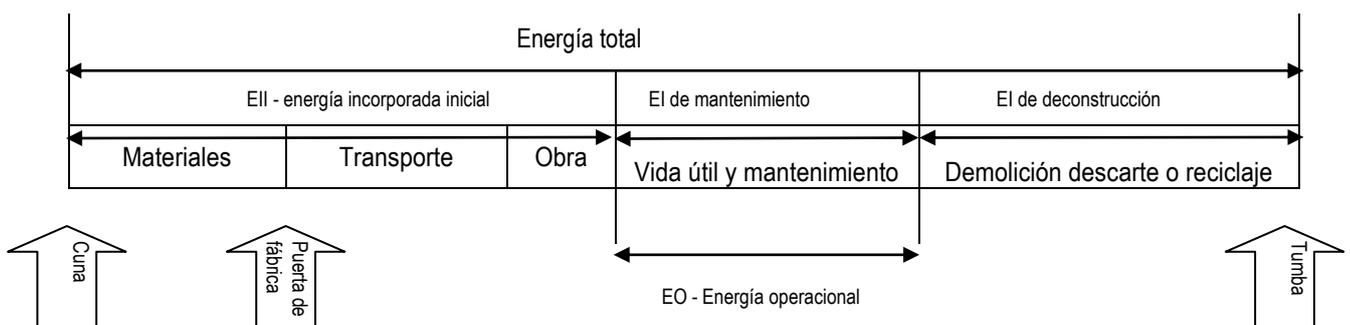


Figura 20 - Ciclo de vida energético de un edificio (adaptado de TAVARES, 2006)

3.5. LA ENERGÍA INCORPORADA EN EL ACVE

A lo largo de toda su vida útil, la edificación consume energía operacional, constituida por la energía necesaria para operar y hacer habitables a los edificios. Consiste básicamente en calefacción, enfriamiento, ventilación, iluminación, cocción, transporte vertical y bombeo.

Por otro lado, y presentándose en forma no constante pero sí recurrente a lo largo de la vida del edificio, se encuentra la energía incorporada. Ding (2004) plantea que la energía incorporada está presente en todas las etapas de vida de la edificación, y la clasifica según dichas etapas.

Energía incorporada inicial es definida como el conjunto de los insumos energéticos utilizados en la adquisición de materias primas (minería, etc.), su procesamiento y manufactura, el transporte de todos los productos de construcción a la locación y el proceso de construcción. Según Cole (1999) se identifica en ella a su vez un componente directo y otro indirecto.

Energía incorporada directa, o requerimientos energéticos de proceso es la energía que se usa para transportar los productos de construcción al sitio y la consumida dentro de los límites de la locación de obra. Para el caso de la industria de la construcción, la energía directa incluye la energía utilizada en el proceso de construcción (TRELOAR, 1998). Fay (2000) la plantea como aquella energía que es adquirida por el constructor en la locación de la obra y fuera de la misma para permitir las actividades de construcción, administración y transporte bajo su control, incluyendo a subcontratos.

Energía incorporada indirecta es la que se usa para adquirir, procesar y refinar las materias primas y manufacturar los materiales de construcción, ensamblar los componentes, incluyendo los transportes relacionados con esas actividades. Dicho de otra manera, la energía indirecta comprende la energía directamente incorporada en los insumos del proceso de construcción, a través de sus respectivos procesamientos y la energía directa incorporada en insumos a dichos procesos, y así sucesivamente. Por tanto, la energía indirecta comprende una cadena de requerimientos de energía directa que conduce corriente arriba hasta la materia prima en su situación natural (TRELOAR, 1998).

Energía incorporada recurrente o de mantenimiento es la energía consumida para mantener, reparar, restaurar, reformar la edificación o sustituir materiales, componentes o sistemas

durante la vida de un edificio. Se suele estimar mediante factores de reemplazo (en años) para los elementos principales de la edificación (FAY et al., 2000).

Energía incorporada final o de deconstrucción es la energía consumida para disponer de la construcción una vez acabada su vida útil, incluyendo los trabajos de demolición, desmontaje y transporte de materiales. La ecuación de cálculo de ciclo de vida energético puede resumirse en:

$$E_{c.v.} = E_{i.in.} + (E_{i.rec.} + E_{op.}).V + E_{i.d.}$$

Donde

$E_{c.v.}$ – es la energía total del ciclo de vida,

$E_{i.in.}$ – es la energía incorporada inicial,

$E_{i.rec.}$ – es la energía incorporada recurrente anualizada,

$E_{op.}$ – es la energía operacional anual,

V – es la vida útil estimada en años, y

$E_{i.dem}$ – es la energía incorporada en la disposición final

Los valores de energía resultantes, según recomendación de IFIAS (1997), son informados en joules. Las unidades funcionales más aceptadas para la información de resultados finales del análisis son GJ/m².

A su vez, la energía incorporada inicial puede calcularse como la suma de tres factores:

E_{mat} , E_{transp} y E_{obra} , siendo el primero el valor de la demanda energética derivada del procesamiento de los materiales, el segundo la energía insumida en los transportes de los materiales a la obra, y el tercero, la energía incorporada en el predio durante el proceso de construcción.

La energía de manufactura de materiales puede calcularse (ADALBERTH, 1997) como:

$$E_{mat} = \sum_{i=1}^n m_i.(1 + w_i/100).M_i$$

Donde:

n = número de materiales,

i = material considerado,

m_i = total del material i utilizado en la edificación (ton),

w_i = factor de desperdicio de material i durante a obra (%), y

M_i = requerimientos energéticos de fabricación del material de construcción i (GJ/ton).

3.5.1. Fronteras del análisis de la energía incorporada en edificaciones

El requerimiento bruto de energía o GER incluye, como ya se planteó, todos los procesos demandantes de energía que directa o indirectamente sean necesarios para la elaboración de un producto.

Sin embargo, en el caso del análisis de energía incorporada de construcciones, no es viable en la práctica abarcar todos los factores, y deben establecerse fronteras de análisis. Se enumeran a continuación una serie de factores que son discutidos en la literatura revisada con respecto a su inclusión en el análisis de la energía incorporada en las edificaciones.

En lo que hace al procesamiento de materiales, se plantea el problema de truncamiento de la cadena hacia atrás (IFIAS, 1974; CRAWFORD y TRELOAR, 2003; LENZEN y WACHESMANN, 2004). que se verá específicamente en la descripción del análisis de proceso.

Con respecto al transporte, se discute su relevancia y las dificultades para su cálculo (YOURHOME, 2008; THOMPSON y SORVIG, 2000). En particular existen diversas posiciones relativas al transporte de personal de obra (IFIAS, 1974; COLE, 1999).

Asimismo, se cuestiona la significación de la energía incorporada en la demolición del edificio (FAY et al., 2000). Asociado a este aspecto, está el tema de cómo debe contabilizarse el reciclaje de materiales y componentes, ya por su potencial de reciclabilidad, a través de la incidencia de material reciclado efectivamente utilizado (Tucker et al., 1993; HAMMOND y JONES, 2008), o calculando la energía necesaria para reciclar los materiales que tengan dicha capacidad (DING, 2004).

Finalmente, se plantea en la bibliografía la incidencia de los servicios administrativos y de la infraestructura urbana, y las dificultades de abordar estos aspectos desde el análisis energético (TRELOAR, 1998).

3.6. APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE ENERGÍA INCORPORADA

El análisis de la energía incorporada los insumos de energía sobre la construcción (u otro producto) durante la vida útil del mismo, y los correspondientes a su disposición final. Es una forma de la evaluación de la construcción particularmente relevante para la industria, debido a los esfuerzos que en eficiencia energética se han desarrollado en las últimas décadas (FAY et al. 2000). Se analizan a continuación aplicaciones del análisis de la energía incorporada.

3.6.1. Cálculo del período de retorno energético

Un aspecto relevante en el ACVE es el cálculo del período de retorno energético, que equivale al tiempo de consumo de energía operacional necesario para igualar a la energía incorporada inicial (TAVARES, 2006). La comparación de la energía incorporada de un edificio con su energía operacional puede ser utilizada para demostrar los beneficios de estrategias que apunten a optimizar la energía operacional o la incorporada como el “energy payback period”, es decir el período de amortización de inversiones energéticas durante la construcción que disminuyen la energía operacional (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA, 2000, WILSON y YOUNG, 1995 apud KHASREEN, BANFILL y MENZIES, 2009).

3.6.2. La energía incorporada como indicador de impacto ambiental

El análisis energético, en particular de la energía incorporada es utilizado como indicador de impacto ambiental (ACQUAYE, DUFFY y BASU, 2009). Su función no es sustituir a métodos más amplios de evaluación ambiental, como el ACV, sino facilitar la toma de decisiones con respecto a la eficiencia energética (FAY et al. 2000). Aunque el requerimiento energético es un indicador parcial a nivel de impacto ambiental, ha sido considerado especialmente adecuada para la evaluación de las edificaciones (LEWIS y GERSTAKIS, 2001; KIBERT, 2008).

En metodologías complejas con indicadores múltiples e interdependientes, son necesarios criterios para ponderar “trade-offs” entre las diversas variables, sus intensidades respectivas y su ponderación. Debe decidirse cómo se compensan las emisiones de dióxido de carbono o de azufre, con el agotamiento de recursos, la toxicidad o la facilidad de reciclaje (ASHBY, SHERCLIFF, CEBON, 2007).

Esta percepción ha llevado a esfuerzos para condensar la eco información sobre la producción de un material a un sola medida o indicador, normalizando y ponderando cada fuente de tensión para darle al diseñador un ranking numérico simple. El uso de un indicador singular ha sido criticado en base a la falta de acuerdo en factores de normalización o ponderación, al error inherente a la simplificación que conlleva (SANTOLI, 2005) y a que el método es opaco cuando el valor indicador no tiene una significación física simple. Sin embargo, a nivel internacional existe un punto de acuerdo, constituido por el protocolo de Kyoto, que en 1997 comprometió a las naciones suscriptoras a reducir progresivamente sus emisiones de dióxido de carbono (ASHBY, SHERCLIFF, CEBON, 2007). Pero el consumo de energía y el CO₂ están íntimamente relacionados, hay una lógica en basar decisiones de proyecto en el consumo de energía o en las emisiones de CO₂ (ASHBY, SHERCLIFF, CEBON, 2007; ESTEVAN, 1998).

Lewis y Gertsakis (2001) evalúan simplicidad, costo y efectividad de los indicadores de sustentabilidad más conocidos, el Índice de Desarrollo Humano, la huella ecológica (Rees y Wackernagel 1996), el MIPS (Wuppertal), los eco-indicadores y la energía incorporada. Ésta resulta con la mejor calificación global. Es reconocido su extenso uso en la evaluación del impacto ambiental de las construcciones (KIBERT, 2008, FLOISSAC et al., 2009; AGOSTINHO, PEREIRA y ORTEGA, 2010).

3.6.3. La energía incorporada como criterio de comparación entre soluciones constructivas alternativas

Los datos de energía incorporada obtenidos en diferentes regiones y con diferentes metodologías son difícilmente comparables, debido a la falta de protocolos de análisis (DIXIT et al., 2009; MENZIES et al., 2007; YOHANIS y NORTON, 2002). Sin embargo es ampliamente utilizado en análisis comparativos realizados en la misma investigación y con los mismos criterios. Desde esta perspectiva, el análisis de la energía incorporada permite la evaluación de soluciones constructivas alternativas completas (HONEY y BUCHANAN, 1994; BUCHANAN y LEVINE, 1999; FLOISSAC et al., 2009). Pero en muchos casos, la comparación se realiza en aspectos parciales de la edificación, proponiendo alternativas constructivas, ya sea entre sistemas estructurales (GRIFFIN, REED y HSU, 2010; GUSTAVSSON y SATHRE, 2005; WEIGHT, 2006), muros (CHANI, NAJMUDDIN y KAUSHIK, 2003; RAND, 2011; ATKINSON, 2008; OFFIN, 2010; MONTEIRO y FREIRE, 2010) o aberturas (YOHANIS y NORTON, 2002; WEIR y MUNEER, 1998). La validez de

estas comparaciones reside, además de utilizar la misma metodología, en la consideración de que las diferentes alternativas no presuponen mejoras deliberadas para obtener energías operacionales menores (SARTORI y HESTNES, 2007).

3.6.3.1. Análisis comparativos de energía incorporada para estructuras de hormigón

Los análisis comparativos de soluciones estructurales de hormigón en la bibliografía revisada, desde su energía incorporada, presentan tres alternativas básicas: comparación con otros sistemas estructurales, comparación con otros diseños del mismo sistema estructural, y comparación entre tipos de hormigones.

En la primera alternativa, los sistemas estructurales normalmente comparados con la estructura de hormigón son los de acero y los de madera. Griffin, Reed y Hsu (2010) presentan una comparación de la energía incorporada para un edificio de cuatro pisos, resuelto con diferentes diseños estructurales de hormigón y con estructura de acero. El estudio se desarrolla a partir de una sección específica de la estructura, que incluye todos los elementos estructurales involucrados en la proporción en que se encuentran en la estructura general, con excepción de las fundaciones. Los resultados obtenidos en dicho trabajo se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 - Comparación de sistema estructural en acero y en h.a.

SISTEMA ESTRUCTURAL	ENERGÍA INCORPORADA (MJ)
acero	11.171
losa sin viga	6,467

(basado en GRIFFIN, REED, HSU, 2010)

El sistema estructural en acero resulta en el estudio referido, significativamente más alto desde el punto de vista de la energía incorporada involucrada, que las soluciones en hormigón armado planteadas.

Similares resultados plantean las investigaciones de Struble y Godfrey (2004), y de Acquaye (et al., 2007), que estudia la energía incorporada de ambas alternativas estructurales para un edificio de oficinas. Los resultados obtenidos marcan una diferencia entre los sistemas de estructura de acero y de hormigón armado que es en términos relativos superior a la presentada en el estudio anterior (figura 21).

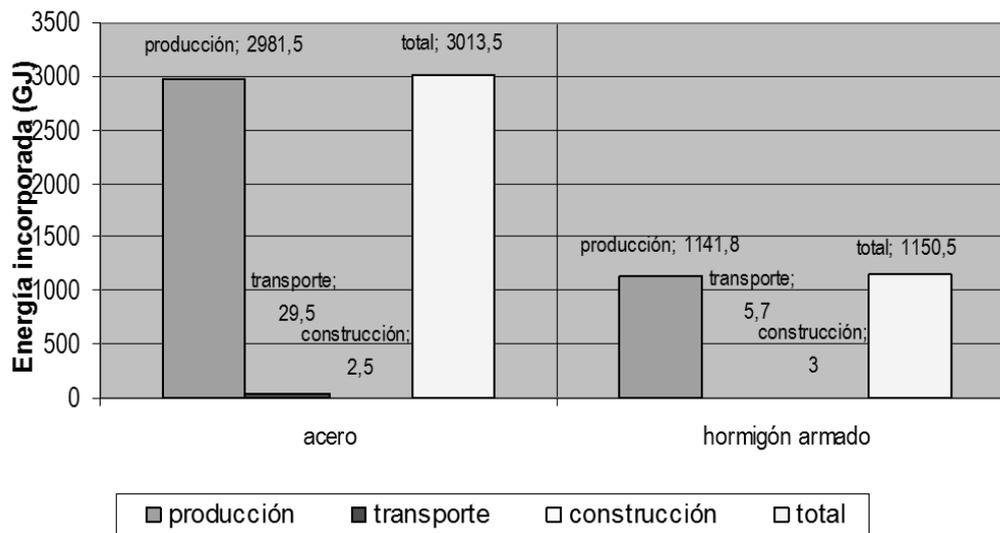


Figura 21 - Energía incorporada en sistemas estructurales (basado en ACQUAYE, DUFFY y BASU, 2007)

Buchanan y Levine (1999), comparan sistemas basados en hormigón, acero y madera, en base a datos de investigaciones anteriores (BAIRD y CHAN, 1983; HONEY y BUCHANAN 1996) con resultados favorables a la madera, en lo que hace a la energía incorporada (ver tabla 5).

Tabla 5 - Comparación entre sistemas estructurales

Material	Energía	
	(1983) GJ/m ²	(1996) GJ/m ²
Hostal		
Hormigón armado	3,7	3,2
Madera	2,7	2,1
Oficina		
Hormigón armado	5,6	4,7
Acero	6,6	4,8
Madera	3,7	3
Industria		
Acero	3,2	2,1
Madera	1,8	1,4
Vivienda		
Alta energía	5,9	4,7
Bajo costo	4,2	3,4
Baja energía	2,5	1,7
Tipica	5,1	3,9

(fuente: BUCHANAN y LEVINE, 1999)

Gustavsson y Sathre (2005) realizan un análisis comparativo de la energía incorporada en los procesos de fabricación y potencial de reutilización de los componentes del sistema estructural de hormigón y del de madera, concluyendo en el mejor balance energético en el caso de la madera.

En lo que hace a la comparación entre diseños estructurales de hormigón, Griffin (et al., 2010) realiza el análisis en una estructura tipo, con tres soluciones en hormigón armado: losa sin viga, losa con viga y losa nervada en una dirección. Concluye que diferentes diseños de estructura en hormigón armado presentan variaciones en el monto de energía incorporada resultante (ver tabla 6).

Tabla 6 - Comparación de diseños de estructura en hormigón armado

SISTEMA ESTRUCTURAL	Energía incorporada total de la estructura estudiada (MJ)	Diferencia porcentual
losa sin viga	6467	28,42%
losa con vigas	5036	0,00%
losa nervada en un dirección	5065	0,58%

(fuente: basado en Griffin, Reed y Hsu, 2010)

Yeo y Gabbai (2011) presentan un estudio de optimización de las secciones de hormigón armado desde su energía incorporada y desde los costos monetarios. Los diseños óptimos desde la perspectiva de reducción de la energía incorporada no coinciden con los óptimos desde el punto de vista de los costos (YEO y GABBAI, 2011).

Otro tipo de análisis comparativos identificados en la bibliografía para sistemas estructurales de hormigón apuntan a reducir el índice energético del hormigón utilizado. Esto se logra mediante sustituciones parciales de áridos o del cemento portland, por residuos de procesos industriales. En particular el cemento es el material que aporta mayor energía incorporada al hormigón, y diversos materiales con actividad puzolánica, residuos de procesos industriales, han sido testeados con éxito como sustitutos. En particular el humo de sílice, la ceniza voladora (PFA por sus siglas en inglés), residuo de la quema del carbón, y la escoria granulada de alto horno (GGBS por sus siglas en inglés) (Gupta et al., 2010; Obla et al., 2003; Tempest et al., 2009; HAMMOND y JONES, 2008; Ware et al., 2009). Otros materiales, residuos asimismo de procesos industriales, ha demostrado su viabilidad a nivel de

laboratorio. Estos son la ceniza de la quema de la cáscara de arroz y de la quema del bagazo de caña de azúcar (CBC) (CORDEIRO, 2006; DE PAULA et al., 2009).

Con respecto al índice energético del CBC, debe distinguirse la ceniza residual de la ceniza ultrafina. La primera, al ser el CBC el residuo de un proceso, no corresponde asignarle un índice energético propio. Esto es válido en tanto no sea preciso alterar el proceso de quema del bagazo de caña. Sin embargo, las propiedades relevantes del hormigón con sustitución parcial de ceniza residual han sido significativamente peores que el hormigón tradicional (CORDEIRO, 2006;).

Por otro lado, la molienda de la ceniza residual de bagazo de caña para lograr ceniza ultrafina, mejora sustancialmente sus propiedades puzolánicas, haciendo viable su utilización como sustituto parcial de cemento portland en un tenor de sustitución del 20% (CORDEIRO, 2006). Pero la demanda de energía del proceso de molienda queda incorporada a la ceniza. Se calcula que a nivel industrial, esta molienda significaría 70 Kwh por tonelada de ceniza, lo que equivale a 0,252 MJ/kg (CORDEIRO, 2006).

3.6.3.2. Análisis comparativos de energía incorporada para soluciones de muros

En la bibliografía se identificaron varios estudios comparativos de soluciones de muros (CHANI, NAJMUDDIN y KAUSHIK, 2003; RAND, 2011; ATKINSON, 2008; OFFIN, 2010). La comparación de soluciones no tradicionales para estos elementos se realiza normalmente en edificios de baja altura, a menudo en uno o dos niveles. Rand (2011) realiza un estudio comparativo que analiza soluciones de muros exteriores en edificios en altura, señalando la ventaja de los materiales cerámicos en relación a la energía incorporada. Se presentan en la tabla 7 resultados de dicha investigación.

Tabla 7 - Energía incorporada en soluciones de muros exteriores

Vida útil del Edificio (años)	Energía incorporada (MJ/m ²)				
	0	30	60	90	120
Muro de mampostería	395	395	395	395	395
Muro con revestimiento de mampostería	451	451	458	465	472
Muro de hormigón y hormigón prefabricado	734	734	749	765	780
Muro con revestimiento de madera	109	162	298	458	602
Muro cortina vidrio y aluminio	4562	4835	5108	5381	5655

(datos: RAND, 2011)

3.7. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA ENERGÍA INCORPORADA

Existe más de una metodología de análisis de la energía incorporada: el análisis de proceso, el análisis estadístico (BAIRD, ALCORN y HASLAM, 1997), el análisis insumo producto y el análisis híbrido. Este último se basa en una combinación del análisis de proceso y el de insumo producto. Puede dividirse a su vez entre análisis híbrido basado en el método insumo producto, y análisis híbrido basado en método de proceso (TRELOAR, 1998).

Se describen a continuación en los métodos referidos.

3.7.1. Análisis de proceso

Implica el examen sistemático de los insumos directos e indirectos de energía en un proceso. Este análisis usualmente comienza con el proceso de producción final y va hacia atrás a medida que la energía de cada material contribuyente o input de energía debe ser considerado. A pesar del tiempo que requiere, este es el método más utilizado para el análisis de energía (BAIRD, ALCORN y HASLAM, 1997).

Las definiciones comunes de análisis de proceso identifican la tarea de estudiar los insumos y productos de los sistemas con la de asignar valores de energía a los flujos del producto. La energía incorporada total comprende la energía requerida directamente por los principales procesos de manufactura y la energía indirecta incorporada en los materiales insumo del proceso.

La energía incorporada comprende por tanto una cadena de requerimientos directos. Para la construcción de un edificio por ejemplo, la energía directa puede incluir la utilizada en sitio para operar máquinas, mientras que la energía indirecta puede incluir aquella usada directamente en la manufactura del acero estructural utilizado en el edificio. La energía del acero comprendería a su vez la energía incorporada directamente en la extracción y transporte del mineral de hierro. Sin embargo, el marco de análisis es incompleto por los problemas para rastrear todos los procesos corriente arriba. El análisis de proceso comprende cuatro etapas:

- Medir los requerimientos directos de energía del proceso
- Medir el producto del proceso
- Determinar la cantidad de productos requeridos directamente por el proceso y
- Aplicar los pasos 1 y 3 a los productos cuantificados en el paso 3, y así sucesivamente.

Muchas definiciones de energía directa se enfocan en el proceso físico principal. Típicamente, la energía adquirida directamente por el establecimiento industrial para funciones auxiliares, como transporte e iluminación de áreas de depósito, están incluidas en la energía indirecta. Sin embargo, Treloar (1998) plantea que la energía directa debería incluir toda la energía adquirida para dar soporte al proceso en consideración, sin importar si es requerida para el proceso principal o para procesos auxiliares.

El cálculo de la energía incorporada para cada producto individual de un proceso, como un perfil de acero, en general no es factible debido a los requerimientos de registro de información que implicaría. Por tanto es inevitable un cierto grado de agregación. Además, el cálculo de diferentes cifras de energía incorporada para pequeños lotes puede estar sujeto a grandes variaciones debido a circunstancias puntuales (eficiencia de producción del lote, calidad de la materia prima, temperatura ambiente). Por ello, las medidas de requerimientos son tomadas a lo largo de un período extenso de tiempo y promediadas con la producción durante ese período. El resultado es una “intensidad de energía directa”, es decir energía directa por unidad de producto.

Para establecimientos industriales que producen más de un producto, la energía total consumida así como los requerimientos totales de insumo, en el período de tiempo considerado, deben ser asignados a los diferentes productos, según sus respectivos “costos”. Existen cuatro metodologías para asignar cuota partes de energía e insumos no energéticos:

- Asignar todo al producto principal

- Asignar a cada producto prorrateando en función del precio respectivo
- Asignar a cada producto prorrateando por unidades físicas
- Asignar a cada producto con base en los requerimientos marginales, es decir la energía y productos requeridos para producir una unidad más de cada producto.

Los tres primeros métodos requieren que la energía incorporada a través del capital (equipo e infraestructura) sea calculada y asignada.

El paso tres referido ut supra para el análisis de proceso, comprende la cuantificación de los insumos corriente arriba. Para hacerlo, se elaboran listas de cantidades de productos requeridos para cada elemento del edificio, midiendo ítems del edificio a partir de la documentación de construcción. Los elementos de la edificación incluyen la estructura, las aberturas, el acondicionamiento eléctrico. El análisis de energía incorporada a nivel de elementos es útil porque sistemas constructivos competitivos pueden ser comparados en un nivel funcional, independientemente de sus materiales constitutivos. Esto es preferible al estudio solamente de los materiales. Por otro lado, en el caso de trabajar con listas de cantidad de productos, deben aplicarse factores de pérdidas, lo que puede llevar a errores de cantidades respecto a la situación particular.

Los insumos de bienes y servicios en cada nivel precedente pueden ser considerados corriente arriba del proceso en consideración. Son cuantificados para permitir el cálculo de los requerimientos de energía indirecta del proceso en el paso cuatro del análisis de proceso. En cambio, el uso del producto comprende la fase posterior, o corriente abajo. Para un edificio, esta etapa consiste en la operación, mantenimiento, reforma y demolición. La energía incorporada generalmente considera los requerimientos corriente arriba. Sin embargo, la energía incorporada también está presente en los productos utilizados en las etapas posteriores a la construcción, incluso en los combustibles utilizados en la operación del edificio.

Metodológicamente, el análisis de proceso presenta a su vez limitaciones. Normalmente no se realiza el mismo esfuerzo para el paso cuatro que para los anteriores, especialmente en lo que hace a materiales básicos. Esto se debe a que es más difícil para una compañía obtener información sobre los proveedores que medir su propia actividad. Lo más frecuente en cambio es que para el análisis de productos complejos como un edificio, se recurra a fuentes previamente publicadas. Esta información puede ser de otros países, con diferente tecnología

de manufactura, matriz energética, regímenes de transporte y tipos de materias primas. Los errores debidos a trabajar con esta información no siempre son reconocidos.

Hay varias posturas en la literatura con respecto a la posibilidad de adquirir la información relevante. Baird, Alcorn y Haslam (1997) plantean que es posible conseguirla con esfuerzo y persistencia, reconociendo que existen piezas de información que no pueden ser obtenidas o bien que el seguir agregando los costos energéticos de sucesivos niveles corriente arriba, tiene escaso efecto en el requerimiento energético total (IFIAS, 1998 apud LENZEN y WACHSMANN, 2003), A su vez, pueden existir varios inputs de diversa entidad de mercaderías y servicios que no pueden ser totalmente cubiertos en detalle utilizando el análisis de proceso (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA, 2000).

Sin embargo, otras investigaciones plantean que el paso cuatro tiende a truncarse antes que sean alcanzados suficientes niveles como para alcanzar un marco de análisis suficientemente completo (TRELOAR, 1998; LENZEN y WACHSMANN, 2003), por limitaciones de tiempo y de información.

Dado que en la etapa de diseño la fuente y los tipos de materiales no han sido en general aún seleccionados, puede ser más adecuado trabajar con promedios nacionales. Sin embargo, los costos energéticos reales del proceso en análisis no coinciden en general con dichos promedios a menos que los productores de la cadena sean monopólicos. Por tanto, los análisis de proceso se consideran precisos para el sistema particular al que se asocian, pero es difícil comparar resultados entre diferentes análisis de proceso.

Sin embargo, la principal limitación del método de análisis de proceso es la carencia de completitud del marco de análisis. Por ejemplo, el marco propuesto por la Federación Internacional de Institutos para Estudios Avanzados (IFIAS por su sigla en inglés), si bien intenta resolver esta situación, aún plantea algunas lagunas respecto a varios insumos de energía del proceso (TRELOAR, 1998):

- Actividades asociadas al proceso principal, como depósito y administración
- Insumos de servicios como los bancarios, seguros, administración pública, debido al enfoque sobre los materiales
- Procesos que transforman materiales básicos en productos más complejos
- Insumos de bienes y servicios no energéticos para manufacturar la energía

Además de estos factores, es frecuente la exclusión de gran número de pequeños insumos, y en varios estudios, incluso se omite la consideración de la energía directa, en el entendido que en el caso de la construcción de edificios representa aproximadamente el 10% del total.

La energía incorporada en procesos que implican la manufactura de productos compuestos a partir de materiales es normalmente ignorada. Aún en los casos excepcionales en la que es considerada, se omiten pequeños insumos como adhesivos.

En función de estas limitaciones, la falta de completitud del marco de análisis ha sido evaluada. Para materiales de construcción se ha estimado en un 10%, pero utilizando el marco propuesto por IFIAS, que en sí es incompleto. Para el análisis de proceso de productos más complejos, como edificios, esta falta puede ser mayor, llegando, según algunos estudios hasta el 50% (LENZEN y WACHSMANN, 2003). Análisis de proceso muy detallados no son comunes, porque normalmente los valores de intensidad de energía incorporada hallados mediante análisis de insumo producto, son aplicados a los materiales básicos cuantificados. Este procedimiento es clasificado en general como análisis híbrido basado en análisis de proceso.

Asimismo, en la comparación de dos o más opciones, las carencias de marco de análisis es posible que no sean las mismas en todos los casos, lo que agrega otra fuente de error al análisis, que no es posible estimar. Hammond y Jones (2008) también plantean como problema inherente a esta metodología, que la gran cantidad de variables que operan en la obtención de datos, y la no explicitación total de las mismas en todos los casos, genera cierto nivel de incertidumbre, no habiendo ningún valor calculado que sea universalmente aceptado por todos los investigadores.

A pesar de este tipo de error señalado para el análisis de proceso, existe sin embargo acuerdo respecto a la consistencia y utilidad de la comparación de valores de energía incorporada obtenidos mediante una misma metodología.

3.7.2. Análisis estadístico

Este método utiliza estadísticas publicadas para determinar el uso de energía por parte de industrias particulares. Es un método útil si los datos son consistentes, cuidados, pertinentes y suficientemente detallados (BAIRD, ALCORN y HASLAM, 1997). El escaso avance de la investigación en nuestro medio con respecto a esta temática no proporciona estas condiciones.

Además, como sistema es inherentemente incompleto en la medida que toma en cuenta solamente los insumos que más directamente inciden en el proceso, dejando fuera una serie de insumos. Esta falla metodológica que presenta el análisis estadístico está presente también en el análisis de proceso, al punto que Treloar (1998) opta por asimilarlo a este tipo de análisis desde la perspectiva de la completitud del marco de actuación, en contraposición al análisis insumo producto.

3.7.3. Análisis de matriz insumo producto

Se basa en el análisis económico input-output propuesto por Leontief (1966), quien lo plantea como una “adaptación de la teoría neoclásica del equilibrio general al estudio de la interdependencia cuantitativa que existe entre aquellas actividades económicas que guardan entre sí una relación recíproca”. Para Leontief, las complejas interacciones que operan dentro de la economía pueden ser aproximadas por relaciones de proporcionalidad. Una tabla de insumo producto mapea las relaciones entre compartimentos de un sistema, no necesariamente económico. Las matrices de insumo producto económicas han sido utilizadas por muchos investigadores para el análisis de la energía incorporada (TRELOAR, 1998).

Se usa para modelar los flujos de productos entre sectores de una economía en la que los procesos detallados son representados por la actividad promedio de cada sector. La energía puede ser colocada como un sector más de la economía en el modelo, lo que permite el cálculo de la energía incorporada en cualquier sector. A partir de datos nacionales sobre consumo y producción industriales, es posible examinar los flujos monetarios desde y hacia los sectores económicos de producción de energía y compararlos con las cantidades conocidas de energía producida por dichos sectores, para posteriormente rastrear los flujos de energía en la economía nacional y equiparar el output monetario de cada sector con su consumo de energía, utilizando tarifas promedio de energía (BAIRD, ALCORN y HASLAM, 1997).

En la matriz inversa de Leontief, las cifras (denominados coeficientes r_{ij}) representan la cantidad en dólares del sector de la fila respectiva, requerida directa e indirectamente para hacer cada dólar de producto del sector de la columna respectiva. Estos valores se denominan coeficientes de requerimientos totales. Los requerimientos indirectos representan un serie de requerimientos directos de insumos “corriente arriba”, que teóricamente se extienden a un número infinito de transacciones (figura 22). El cálculo de la matriz inversa de Leontief simula la suma de esa teóricamente infinita serie.

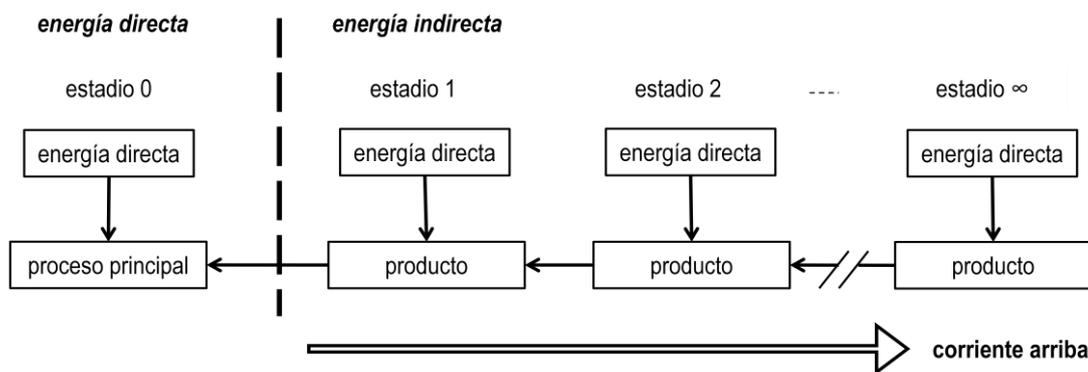


Figura 22 - Límites del sistema en el análisis de la energía incorporada (adaptado de Bousted y Hancock, 1979)

Ventajas del análisis de insumo producto para calcular la energía incorporada

La principal ventaja de este análisis es que todas las transacciones monetarias y por tanto todas las transacciones de energía dentro de la economía nacional estarían registradas (BAIRD, ALCORN y HASLAM, 1997). Implica por tanto un marco de análisis comprehensivo, tanto desde el punto de vista de considerar todos los insumos directos, como los indirectos, como se dijo más arriba. Ambas consideraciones globales son imposibles en el análisis de proceso.

Problemas del análisis de insumo producto en el cálculo de energía incorporada

A pesar de las ventajas señaladas, muchos supuestos inherentes a la elaboración de la matriz, causan errores que estarán inextricablemente imbricados en los resultados de energía incorporada deducidos utilizando el análisis insumo producto.

El primer problema deriva del supuesto de proporcionalidad, que asume que la relación entre el uso de insumos y la producción es proporcional y constante, no importando la escala y el tiempo. Esto implica que no se contemplan sustituciones de insumos, ni economías de escala.

El segundo problema parte del supuesto de homogeneidad, que asume que todos los productos de un sector requieren la misma dosificación de insumos, variando en cantidad según el supuesto de proporcionalidad. Otra forma de plantearlo es que cada actividad produce sólo un bien o conjunto de bienes homogéneos, que son obtenidos sobre la aplicación de una sola tecnología y que no son producidos por ninguna otra actividad, en otras palabras, no puede haber coproductos (CAÑO-GUIRAL, 2011).

Estos dos problemas son caracterizados también como un problema de agregación y de asignación de información (LENZEN y WACHSMANN, 2003). Esta problemática de agregación es fácilmente identificable en la matriz IO de Uruguay de 1983, la última realizada por el Banco Central del Uruguay (figura 23).

El tercer problema es el uso de información económica para modelar flujos físicos de materiales y servicios, lo que requiere traducir flujos en unidades monetarias a unidades físicas (BAIRD, ALCORN y HASLAM, 1997). El problema estriba en que esta conversión implica ciertos supuestos que no se corresponden con la realidad específica de un proceso. Los precios promedio de la energía a nivel nacional no son siempre representativos. Las tarifas energéticas pueden no representar adecuadamente las cantidades de energía en los picos tarifarios. Además, los productos no se consideran los productos no energéticos del sector proveedor de energía, como consultorías, o equipos especiales. Y por último, algunos insumos pueden integrarse sistemáticamente sin el pago correspondiente, y por ende no quedar registrados, como es el caso, por ejemplo, de productos de desecho.

Otra exclusión común que forma parte de este problema en el análisis de insumo producto es el equipo de capital. Si una transacción económica no ocurre comúnmente en el lapso de un año, como sucede con la compra de equipo de capital, entonces el flujo derivado de la amortización hacia el producto no aparecerá en las matrices de insumo producto. Estrictamente esto implica un falta de completitud del marco, aunque investigaciones lo estiman de muy poca entidad.

Clasificación de bienes y servicios en la Matriz de insumo producto 1983

Sectores		Códigos de las actividades económicas según CIIU-Rev. 2	Sectores		Códigos de las actividades económicas según CIIU-Rev. 2
Nº	Nombre		Nº	Nombre	
1	Agricultura	1110 - 1120 - 1210 - 1220	31	Limpieza y tocador	3523
2	Ganadería	1110	32	Otros productos químicos	3513 - 3521 - 3522 - 3529
3	Pesca	1301	33	Refinería de petróleo y derivados	3530 - 3540
4	Minas y canteras	2901 - 2902 - 2903 - 2909	34	Productos de caucho	3551 - 3559
5	Carnes	3111	35	Productos de plástico	3560
6	Lácteos	3112	36	Objetos de loza	3610
7	Del mar	3114	37	Vidrio	3620
8	Aceites y grasas	3115	38	Otros productos minerales no metálicos	3691 - 3692 - 3699
9	Molinería	3116	39	Industrias metálicas básicas	3710 - 3720
10	Panadería y fideoría	3117	40	Máquinas y productos metálicos	3811/12/13/19 - 3822/24/25/29
11	Azúcar	3118	41	Máquinas y artefactos eléctricos	3831 - 3832 - 3833 - 3839
12	Otras alimenticias	3113 - 3119 - 3121 - 3122	42	Material de transporte	3841 - 3843 - 3844
13	Bebidas alcohólicas	3131	43	Otras industrias manufactureras	3851 - 3852 - 3902 - 3903 - 3909
14	Vinos	3132	44	Electricidad	4101
15	Cerveza	3133	45	Gas	4102
16	Bebidas sin alcohol	3134	46	Agua	4200
17	Tabaco	3140	47	Construcción de edificios	5000
18	Textiles	3211	48	Otras construcciones	5000
19	Productos textiles	3212	49	Comercio	6100 - 6200
20	Tejidos de punto	3213	50	Restaurantes y hoteles	6310 - 6320
21	Otros productos textiles	3214 - 3215 - 3219	51	Transporte y almacenamiento	7111/12/13/14/16/21/22/23/31/32 91/92
22	Prendas de vestir	3220	52	Comunicaciones	7200
23	Curtidurías	3231	53	Servicios financieros	8101 - 8102 - 8103 - 8200
24	Productos de cuero	3233	54	Bienes inmuebles	8310
25	Calzado	3240			8321/22/23/24/25/29/30 - 9310/31/40/50/91/99 - 9412/13/14/90 - 9511/12/13/14/19/20/30/91/92/99
26	Madera y productos de madera	3311 - 3319 - 3320	55	Otros servicios	
27	Papel y productos de papel	3411 - 3412 - 3419			
28	Imprentas y editoriales	3420			
29	Químicas básicas	3511			
30	Abonos y plaguicidas	3512			

Figura 23 - Sectores de la Matriz insumo producto de 1983 (BCU, 1983)

El cuarto problema con el análisis insumo producto es el doble conteo de ciertas cantidades de energía, a partir de interrelaciones entre los sectores proveedores de energía. Es el caso por ejemplo de la energía eléctrica producida a partir de combustibles fósiles, en el que las tablas de insumo producto contarán la energía necesaria para producir la electricidad, más la electricidad generada.

Los problemas de homogeneidad y proporcionalidad podrían resolverse en cierto modo mediante tablas más desagregadas, pero los límites de viabilidad de desagregación son insuficientes para la evaluación de procesos particulares.

El problema de doble conteo se propuso resolver no considerando los aportes de energía hacia los sectores proveedores de energía y convirtiendo las cantidades de energía entregada en energía primaria. Sin embargo esto puede resultar en una sub contabilización de la energía primaria incorporada en combustibles entregados. Otro problema asociado con éste es que si un establecimiento industrial extrae, procesa y consume la energía, ésta no figurará en las tablas de insumo producto.

Otra problemática está asociada a la combustión efectiva o no de los combustibles adquiridos. Por ejemplo, si una cantidad de derivados del petróleo se comercializan para incorporarlos a productos plásticos, se estará contando dos veces, siendo muy difícil de identificar.

Estas desventajas sin embargo deben relativizarse en el contexto de la completitud del marco, pero no se lo considera un método apropiado para el cálculo de energía incorporada para un proceso individual (TRELOAR, 2000).

Cada tabla de una economía nacional tiene una serie de sectores económicos, entre los que se encuentran los sectores proveedores de energía. A su vez el producto de cada sector de la economía comprende una serie de mercancías o materias primas (“commodities”), que constituyen un segundo nivel de clasificación de productos.

Existen ciertos supuestos que deben ser realizados con respecto a las transacciones entre sectores y el mix relativo de *commodities* intercambiado. Las tablas io son generalmente elaboradas en unidades económicas. Por tanto, para vincular dicha información a unidades físicas deben hacerse supuestos de precio. Debido a este y otros supuestos y errores, el método io sólo podría ser útil para dar idea de la importancia relativa de la energía incorporada de los insumos en un proceso. Sin embargo la multiplicidad de niveles de la composición de un modelo io es ocultado por el proceso matemático por el cual el marco se completa (inversión de la matriz).

Leontief (1966) fue quien primero sugirió la aplicación del análisis io para la evaluación del impacto ambiental, siendo utilizado para el análisis de la energía incorporada, para estudios de ciclo de vida, de análisis de contaminación, y de degradación de recursos naturales.

3.7.4. Análisis híbrido

Esta metodología combina el análisis de proceso con el análisis insumo producto. El análisis híbrido intenta obtener la confiabilidad de las cifras de energía consumida para procesos particulares (análisis de proceso) con un marco del sistema teóricamente completo (análisis input-output), eliminando las debilidades inherentes a cada uno (incompletitud y errores respectivamente) (TRELOAR et al. 2000; LENZEN y WACHSMANN, 2003). Sin embargo también adolece de problemas derivados de los métodos que combina. Una deficiencia del análisis híbrido es la falta de una base de datos abarcadora y confiable del uso de energía por parte de la industria (BULLARD et al. 1978).

Treloar (2003) discrimina entre dos tipos de análisis híbrido, análisis híbrido en base a análisis insumo-producto, y análisis híbrido en base a análisis de proceso. Este último implica el cálculo de cantidades para un producto individual y la subsecuente aplicación de intensidades totales de energía calculadas utilizando análisis de insumo producto. Esto reduce los problemas de falta de completitud del marco de análisis, si bien otros pueden introducirse respecto al uso de información obtenida por análisis de proceso.

La premisa de esta metodología es que los errores del modelo de insumo producto para cada ítem particular puede ser obviado al determinar las cantidades de insumos de bienes y servicios para el proceso principal. Este método tiene a utilizarse para productos complejos, caso de las edificaciones, en las que la energía indirecta es mayor que la energía directa.

La intensidad total de energía para materiales básicos calculada utilizando el análisis de insumo producto son traducidas a unidades físicas multiplicándolas por los precios promedios de los materiales.

El problema de la falta de completitud del marco de análisis se plantea en este tipo de análisis híbrido, debido a la exclusión de los procesos intermedios para llegar desde los materiales simples a los elementos que se colocan en la obra, así como también de insumos menores (figura 24).

elemento	ítem	componente	material básico
Muros exteriores	muro cortina	marco de aluminio	aluminio
		hojas de vidrio	vidrio
		soporte de acero	acero
		sellantes	químicos
	paneles prefabricados	hormigón armado	mezcla 30MPa
		fijaciones de acero	refuerzos acero
sellantes		químicos	
Protección contra Incendios	Bomba eléctrica Motor	carcasa de acero	acero
		partes de acero	acero
		bobinados de cobre	cobre
		cobre misceláneo	cobre
		otros	otros
Puertas internas	puerta placa	estructura de madera	madera
		contrachapado madera	madera
		papel de relleno	papel
		pintura	pintura
		adhesivos	químicos

los ítems sombreados fueron incluidos, los no sombreados fueron excluidos

Figura 24 - Elementos excluidos en un análisis de proceso en un edificio (adaptado de TRELOAR, 1998)

Con respecto a la energía directa del proceso principal, existen investigaciones que la calculan a partir de un análisis de proceso y otras que la deducen a partir de análisis de insumo producto (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA, 2000).

Por otro lado, Treloar (1998) plantea que aún en estudios detallados de edificios, el número de ítems considerados raramente es mayor a cincuenta. Para aproximar la energía incorporada adicional debida a variaciones de manufactura del mismo tipo de productos, se han utilizado “coeficientes de mayor procesamiento”, como por ejemplo en el caso de productos de acero galvanizado respecto a similares de acero común. Contando con estas variaciones, el número de productos considerados aumenta.

Existen variaciones en las metodologías. Según refiere Ascione et al. (2007) el método de análisis de la energía incorporada propuesto por Slessor (1974) y Hendereen (1984) trata con la energía comercial del sistema analizado, y multiplica todos los insumos energéticos y

materiales por factores correspondientes de petróleo equivalente, computando el requerimiento de energía incorporada total como la suma de todos los insumos de petróleo equivalente, que puede ser luego convertido en unidades de energía al multiplicarlo por el valor calorífico normal del petróleo (aprox. 42J/g).

3.8. ESTUDIOS A NIVEL NACIONAL SOBRE ENERGÍA INCORPORADA EN EDIFICIOS

Los trabajos realizados en Uruguay sobre energía y construcción están enfocados a la eficiencia energética operacional (Picción, 2009; MIMBACAS, 2009; BLANCO, 2009; CANABAL y ACHKAR, 2009). Desde perspectivas económicas, ambientales o de políticas energéticas, se identificaron varios artículos y tesis desarrollados en general en el ámbito universitario.

A fin de identificar trabajos a nivel nacional sobre energía incorporada en la construcción, se realizaron diversas consultas bibliográficas. Se buscó en el BIUR (Sistema de Bibliotecas de la Udelar), en los registros bibliográficos de la RAU (Real Academia Uruguaya), y en general en la web, con resultados infructuosos.

4. METODOLOGIA

4.1. ABORDAJE METODOLÓGICO

4.1.1. Estrategia de investigación

Se realiza un estudio de caso, en el que se aplica una técnica de modelaje y simulación. Se modeliza una edificación existente, definiendo los criterios para su selección, realizando una caracterización de los aspectos constructivos, y estableciendo las modificaciones necesarias a realizar respecto a la realidad para configurar el modelo (HEGNER, 2007). El objetivo de esta modelización es el análisis de la energía incorporada inicial de la solución constructiva efectivamente empleada mediante el método de análisis de proceso, y el cálculo de la energía incorporada recurrente y de deconstrucción. Se procede luego a la elaboración de soluciones constructivas alternativas en rubros específicos y al recálculo de dichos rubros desde su energía incorporada indirecta, a efectos de realizar análisis comparativos respecto a la energía incorporada derivada de dichas modificaciones. Se completa el análisis energético de ciclo de vida con el análisis de la energía operacional del edificio a partir de una encuesta a los habitantes, y se determina un parámetro de comparación de la energía, externo a la construcción.

4.2. LINEAMIENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo puede ser dividido en etapas secuenciales. La figura 25 resume esquemáticamente estas etapas, que se detallan en el ítem siguiente.

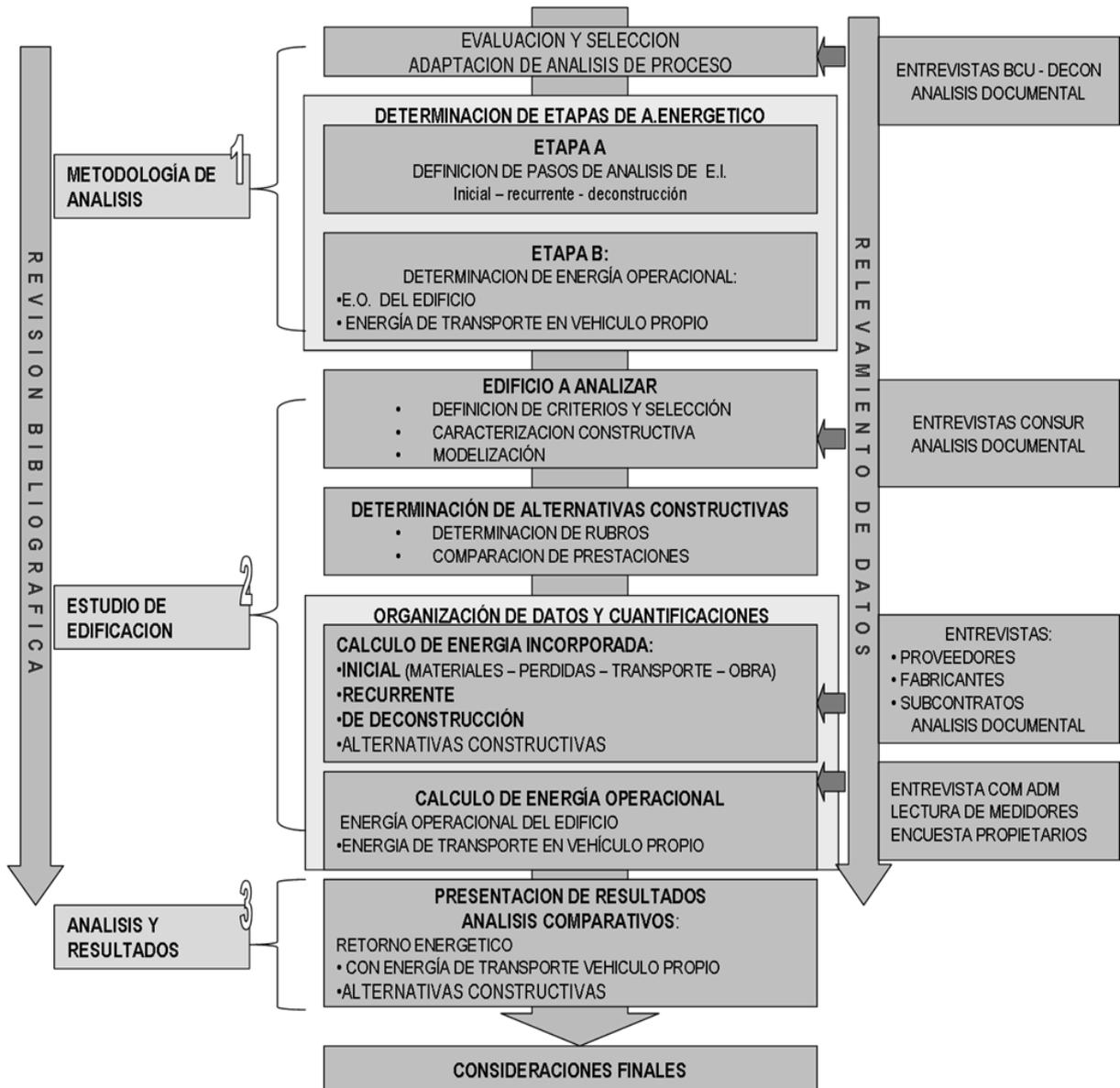


Figura 25 - Lineamientos de la investigación

4.3. DESCRIPCION DE LAS ETAPAS DE INVESTIGACION

4.3.1. Metodología de análisis energético

En primer término se evaluó la aplicabilidad del análisis insumo producto y del análisis de proceso para el cálculo de la energía incorporada inicial, optándose por éste último para realizar el análisis energético del presente trabajo. En función del método elegido, se realizan consideraciones respecto al soporte informático disponible y se informa sobre el relevamiento de datos realizado para el cálculo de la energía incorporada.

Luego se definen dos etapas principales del análisis energético. En la primera se determinan los pasos del análisis de proceso del cálculo de la energía incorporada inicial (de materiales, de transporte y la derivada del proceso constructivo), de la energía incorporada recurrente y de la energía incorporada de deconstrucción.

En la segunda etapa, se calcula la energía operacional de la edificación, y se determina un parámetro de energía operacional externo a la construcción: la energía operacional de transporte en vehículo propio. Se fundamenta la elección de este parámetro, se informa sobre el relevamiento de datos y se explica la forma de cómputo.

4.3.2. Objeto de estudio

En una primera etapa se establecen los criterios de selección del edificio. Se presenta la edificación elegida, se caracteriza su solución constructiva y se divide la obra para su análisis. Se modeliza la solución constructiva a efectos del cálculo.

Luego se determinan los elementos constructivos sobre los que se propondrán alternativas, se determinan estas alternativas constructivas y se analiza la equivalencia de sus prestaciones respecto a la solución original.

En una segunda etapa se realiza una organización de datos para el análisis. Se elaboran tablas auxiliares para el cálculo, en función de bases de datos, información de proveedores y fabricantes, revisión bibliográfica. Las tablas comprenden listados de índices energéticos de materiales, de pesos específicos por metro cúbico, por metro cuadrado o por metro lineal según los casos, de índices energéticos de medios de transporte, de proveedores, distancias y costos energéticos de transporte, de dimensiones y pesos de mampuestos, de factores de pérdidas de materiales, y de rendimientos y dosificación de materiales.

Posteriormente se procede a las cuantificaciones, según se establece en el procedimiento de análisis. Para ello se realizan planillas de cálculo para el cómputo de la energía incorporada, a través de los diversos elementos constructivos identificados para el análisis, siguiendo los pasos de cálculo que se definieron en la etapa A del diseño del análisis energético. Luego se procede al cálculo de la energía operacional del edificio y a la energía operacional del transporte en vehículo propio

4.3.3. Análisis y resultados

.En esta etapa se presentan los resultados del cálculo de la energía incorporada inicial. Se analiza la incidencia relativa de los diferentes rubros de obra, y se presentan análisis discriminados de materiales, transporte, pérdidas y energía en obra.

Se presentan los resultados del cálculo de la energía operacional por tipo de fuente y total. Se analizan características del consumo.

Se comparan la energía incorporada inicial y la energía operacional calculadas. Se presentan cálculos de períodos de retorno energético.

Se presentan los resultados del consumo de combustible para vehículos y se analiza la relevancia de la energía incorporada en la construcción respecto a este parámetro.

4.4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS ENERGÉTICO

4.4.1. Selección del método de cálculo de la energía incorporada

Para el cálculo de la energía incorporada inicial, se optó por el análisis de proceso, y se analizaron las posibilidades de aplicar el análisis insumo producto. Se realizaron entrevistas con técnicos del Banco Central del Uruguay y del Departamento de Economía de la Facultad de Ciencias Sociales, y se revisó la MIP disponible más actualizada, realizada por este último instituto. Data de 2005 y está desagregada en 56 rubros. El 43, que comprende la construcción, refiere a “Edificios; carreteras, represas, obras para telecomunicaciones y otras construcciones”. De acuerdo a lo recabado en las entrevistas, este rubro plantea un problema de agregación de obras muy disímiles, que ni siquiera pueden ser reducidas a cantidades por metro cuadrado (tendido de cables, etc.). Otros rubros, como el 39, presentan un similar problema de agregación, incluyendo “Productos de fundición de hierro y acero; aluminio y otros metales no ferrosos; instrumentos médicos, ópticos y de precisión, relojes, sus partes y piezas; productos elaborados de metal; maquinaria especial y de uso general; maquinaria de oficina, contabilidad e informática, sus partes y piezas; maquinaria y aparatos eléctricos n.c.p y sus reparaciones; equipo y aparatos de radio, televisión y comunicaciones y sus reparaciones; sus partes y piezas”.

Debido a estas limitaciones, no se entendió viable el análisis insumo producto. Por ello, no se llegó a la etapa de buscar información sobre unidades físicas de construcción y de energía para estimar costos energéticos unitarios. En la tabla 8 se presentan los rubros de la matriz IO del año 2005 que aportan al rubro 43.

Tabla 8 - Rubros que inciden en el rubro 43 de la MIP 2005

2	A.0111.9	Otros cultivos de cereales y otros cultivos n.c.p.; servicios agrícolas aplicados a estos cultivos	9
3	A.0112.0	Hortalizas y legumbres; productos de viveros; servicios agrícolas aplicados a estos cultivos	1.508
4	A.0113.0	Productos de árboles frutales, uvas, y plantas cuyas hojas o frutas se utilizan para preparar bebidas o especias; servicios agrícolas aplicados a estos cultivos	13
8	A.0200.0	Madera y otros productos de la silvicultura. Servicios conexos	183
10	C.TTTT.0	Petróleo crudo y gas natural; servicios relacionados con la extracción de dichos productos	425.954
26	D.17RT.0	Productos textiles diversos; tejidos y prendas de vestir de punto; artículos de punto y ganchillo	0
27	D.18TT.0	Prendas de vestir; adobo y teñido de pieles	32.492
29	D.1920.0	Calzado y sus partes	51
30	D.20TT.0	Productos de aserrado y otros artículos de madera, excepto muebles	774.268
31	D.210T.0	Papel y cartón y sus productos	583
32	D.22TT.0	Diarios, revistas y publicaciones periódicas; impresiones en general y reproducción de grabaciones	1.842
33	D.23TT.0	Productos de la refinación del petróleo y combustible nuclear	2.042.414
34	D.24RT.0	Abonos y compuestos de nitrógeno; plaguicidas y otros productos químicos de uso agropecuario	25
36	D.24UT.0	Sustancias químicas básicas, excepto abonos; productos de limpieza y tocador; pinturas y productos de revestimiento, tintas de imprenta y masillas; otros productos químicos y fibras manufacturadas	513.829
37	D.25TT.0	Productos de caucho y plástico	630.688
38	D.26TT.0	Artículos de vidrio, de cerámica y de arcilla	3.655.490
39	D.RRTT.0	Productos de fundición de hierro y acero; aluminio y otros metales no ferrosos; instrumentos médicos, ópticos y de precisión, relojes, sus partes y piezas; productos elaborados de metal; maquinaria especial y de uso general; maquinaria de oficina, contabilidad e informática, sus partes y piezas; maquinaria y aparatos eléctricos n.c.p y sus reparaciones; equipo y aparatos de radio, televisión y comunicaciones y sus reparaciones; sus partes y piezas	2.124.026
40	D.SSTT.0	Vehículos automotores, remolques, semiremolques y contenedores; partes y piezas elaboradas para los mismos; embarcaciones, material rodante para ferrocarriles, aeronaves y sus reparaciones; bicicletas y ciclomotores; otros equipos de transporte n.c.p.	5.174
41	D.UUTT.0	Muebles de todo tipo de material (excepto de cerámica, hormigón y piedra y muebles para uso médico); joyas, instrumentos musicales, artículos de deporte, juguetes, otros n.c.p.; reciclamiento	4.216
42	E.TTTT.0	Energía eléctrica; gas por cañería; suministro de vapor y agua caliente; agua potable	20.141
43	F.45TT.0	Edificios; carreteras, represas, obras para telecomunicaciones y otras construcciones	12.870.160
44	G.TTTT.0	Servicios de venta de vehículos automotores y motocicletas, sus partes, piezas y accesorios; venta al por menor de combustible para automotores; servicios de mantenimiento y reparación de vehículos automotores, de motocicletas y de sus partes, piezas y accesorios; otros servicios comerciales al por mayor, otros servicios comerciales al por menor, servicios de reparación de efectos personales y enseres domésticos	2.537.623
45	H.55TT.0	Servicios de alojamiento y de suministro de comidas y bebidas	41
46	I.60TT.0	Servicios de transporte de carga por vía terrestre; servicio de transporte por tuberías; transporte de pasajeros por vía terrestre	430.607
47	I.RRTT.0	Servicios de transporte de pasajeros y de carga en embarcaciones de cabotaje, transoceánicas y de vías interiores, y por vía aérea; servicios complementarios y auxiliares de transporte; servicios de agencias de viaje	66.030
48	I.64TT.0	Servicios postales, de mensajería y de telecomunicaciones	25.803
49	J.TTTT.0	Servicios de intermediación financiera	1.073.720
50	K.70TT.0	Servicios inmobiliarios	17.828
51	K.RRTT.0	Servicios de alquiler de maquinaria y servicios prestados a las empresas	748.548
52	L.75TT.0	Servicios de seguridad social de afiliación obligatoria; servicios de Gobierno Central excepto enseñanza y salud; servicios de Gobiernos Departamentales	38.975
55	O.TTTT.0	Servicios de alcantarillado, eliminación de desperdicios, saneamiento y protección del medio ambiente; servicios de organizaciones empresariales, profesionales, sindicatos, religiosas, políticas, y de otras asociaciones n.c.p.; servicios relacionados con radio y televisión (excluye radio y televisión para abonados); servicios de cinematografía, teatros; actividades de agencias de noticias; actividades culturales; actividades deportivas y otras actividades de esparcimiento; lavanderías, peluquerías, pompas fúnebres y otras actividades de servicios n.c.p.	7.776
		Total insumos nacionales	28.050.017
		Importaciones	4.675.960
		Total insumos	32.725.977

(fuente: Facultad de Ciencias Sociales, 2005)

4.4.2. Soporte informático

Ciertas herramientas informáticas disponibles para el cálculo de energía incorporada como BEE (TING, 2006) o ATHENA, no se entendieron adecuadas para el análisis a desarrollar en este trabajo. En el dato que proporcionan, a partir sólo de cantidades de componentes de obra, están incluidas cuotapartes del costo energético del transporte y de la puesta en obra. No permiten discriminar entre ciertos materiales y las bases de datos de índices energéticos que utilizan no admitirían sustituciones. En algunos aspectos, como soluciones constructivas, selección de situación climática, unidades de medida, materiales considerados, hay implícita una adaptación a circunstancias propias de las regiones en las que fueron creados.

Por ello, se optó por elaborar planillas de cálculo en Excel, que se adaptaron a las características de la información de cada material considerado. Estas planillas remiten a tablas y permiten la fácil modificación de índices energéticos y factores de pérdidas para incorporar información más precisa, así como el agregado de materiales no tenidos en cuenta, etc. (ver apéndice 1).

4.5. DETERMINACION DE ETAPAS DEL ANALISIS ENERGETICO

.Se presentan a continuación las etapas del análisis energético a desarrollar, así como los insumos de datos necesarios en cada uno de los pasos consignados.

4.5.1. Etapa A - Energía incorporada

ETAPA A1 – ENERGÍA INCORPORADA INICIAL

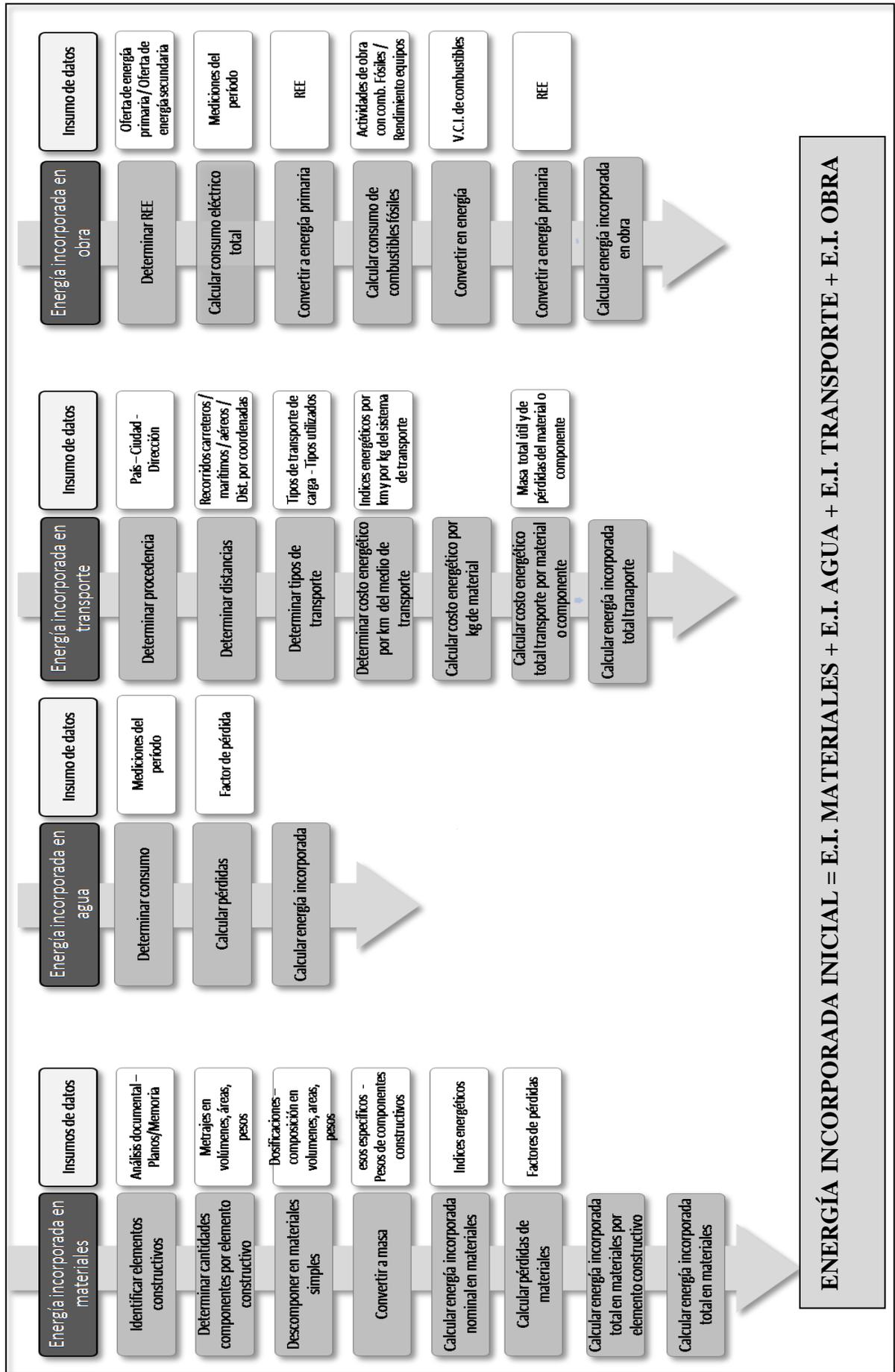


Figura 26 - Etapa A1: energía incorporada inicial

ETAPA A2 – ENERGÍA INCORPORADA RECURRENTE

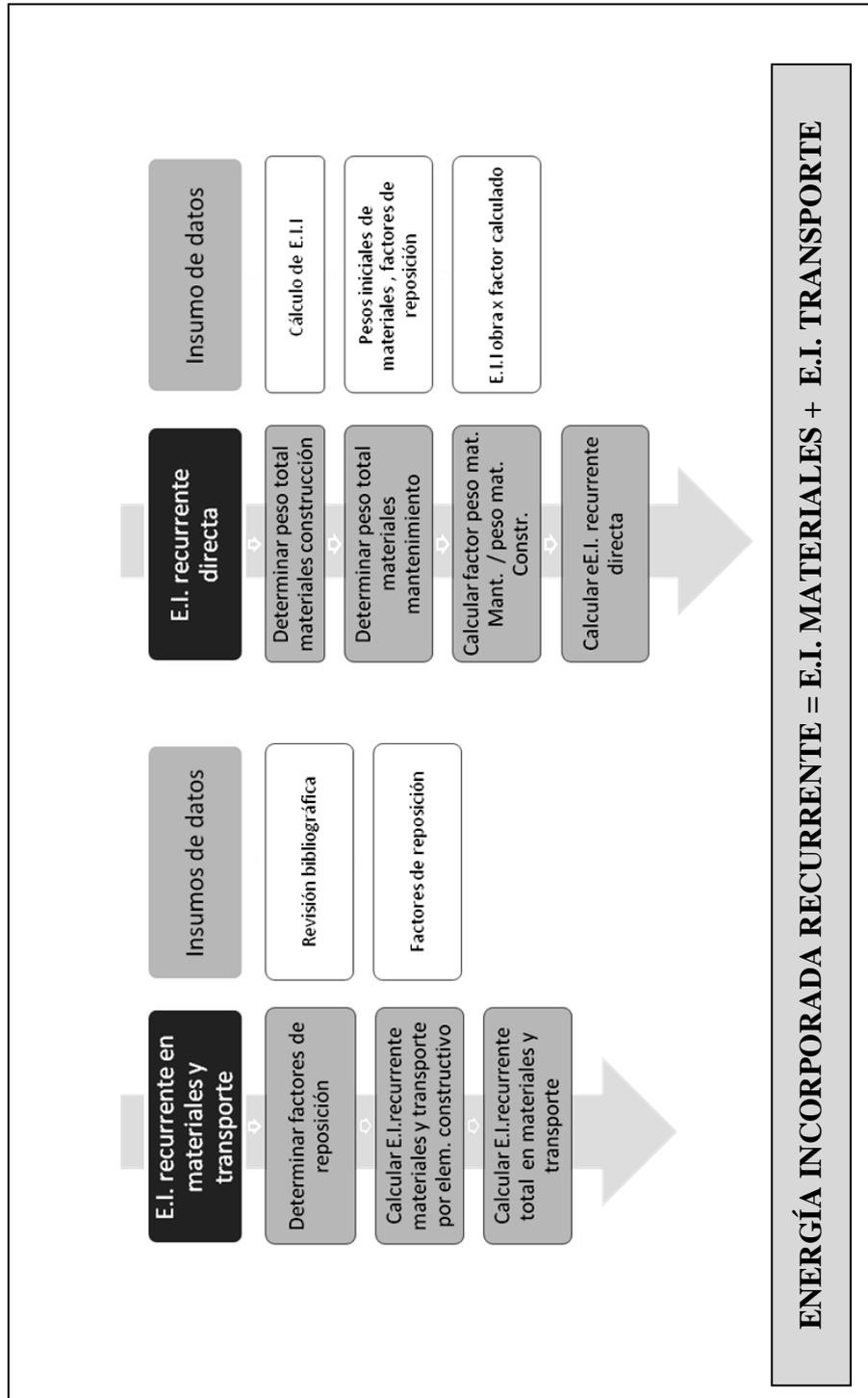


Figura 27 - Etapa A2: Energía incorporada recurrente

4.5.2. Etapa B - Determinación de parámetros de comparación

Según lo expuesto en el punto 3.4.1., el período de retorno energético es un parámetro ampliamente utilizado y valorado para aportar a la toma de decisiones en lo que hace a eficiencia energética (WILSON y YOUNG, 1995 apud KHASREEN, BANFILL y MENZIES, 2009). Los estudios que destacan la relevancia de la energía incorporada en las edificaciones, normalmente se basan en su comparación con la energía operacional correspondiente (CSIRO, 2003). Su utilidad no se limita a establecer la significación relativa de la energía incorporada total, sino a evaluar la incidencia de estrategias de ahorro energético a través de inversiones en la mejora de la construcción (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA, 2000).

En el presente trabajo se busca evaluar la relevancia de la energía incorporada inicial desde dos aspectos. Por un lado, la comparación de la energía incorporada con la energía operacional puede dar cuenta de carencias de enfoque en las políticas nacionales de eficiencia energética en edificaciones. Estas, como se analizó, están hoy en día enfocadas a la energía operacional.

Por otro lado, se pretende evaluar la significación de los valores obtenidos de energía incorporada con un parámetro externo a las edificaciones, que pueda aportar a la toma de decisiones en materia de eficiencia energética. El transporte como sector es un gran consumidor de energía, y se entiende conveniente poder establecer comparaciones de consumos efectivos derivados de este sector y ligados al edificio, y la energía incorporada analizada.

En función de ello, se determina la energía operacional de los usuarios del edificio (etapa B1) en el marco del análisis en energético del ciclo de vida del edificio, y la energía de combustible en la operación de vehículos individuales por parte de los mismos usuarios (etapa B2).., como parámetro externo a la construcción, de comparación de la relevancia relativa de los valores de energía considerados.

Para estos cálculos, se definen a continuación, al igual que en el ítem anterior se hizo para la energía incorporada inicial, los pasos de cálculo y los insumos de datos necesarios.

ETAPA B1 – ENERGÍA OPERACIONAL DEL EDIFICIO

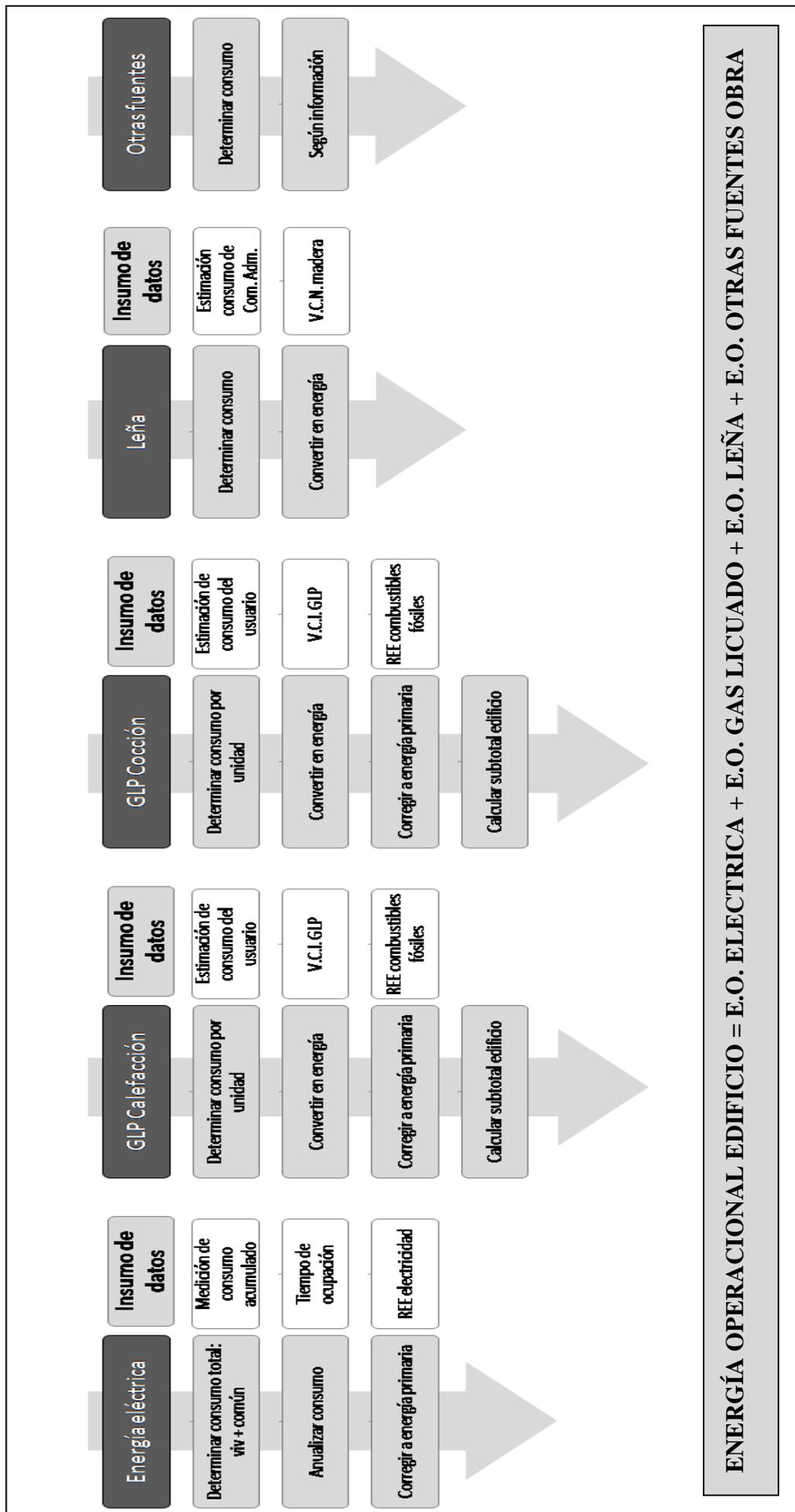


Figura 28 - Etapa B1: Energía operacional del edificio

ETAPA B2 - ENERGIA OPERACIONAL DE TRANSPORTE - COMBUSTIBLE VEHICULO PROPIO

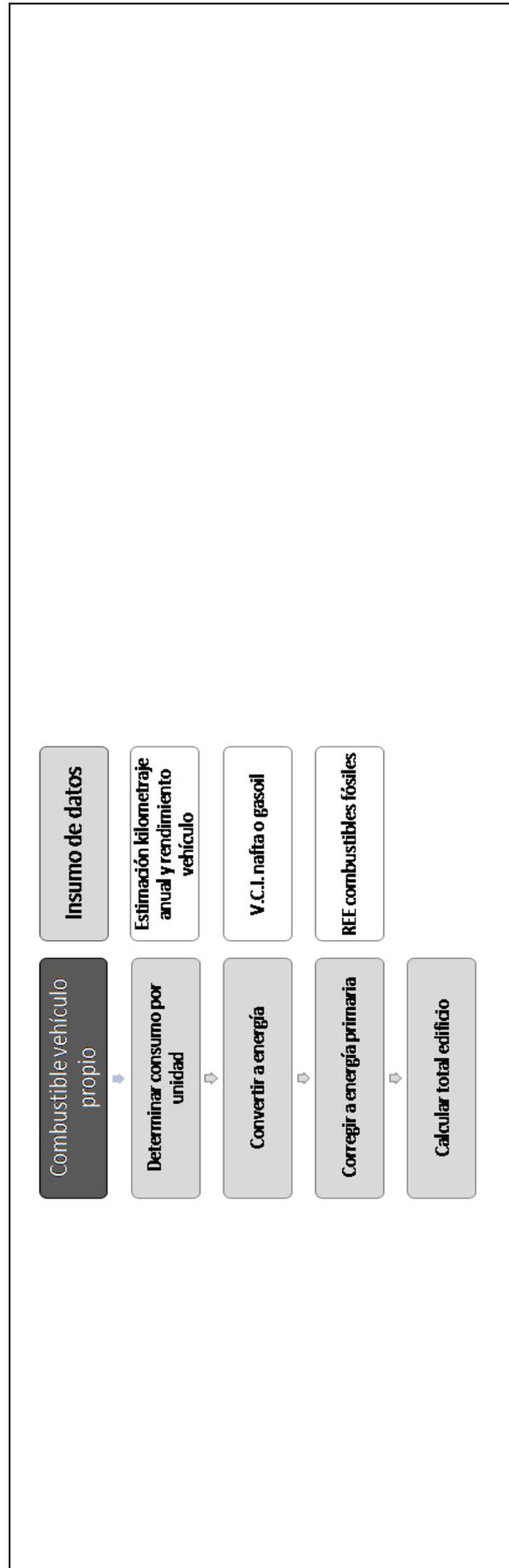


Figura 29 - Etapa B2: Energía operacional de transporte de vehículo propio

5. CASO DE ESTUDIO

5.1. SELECCIÓN

Los criterios de selección del edificio a estudiar se enfocaron en su representatividad, y en la disponibilidad de información. La representatividad buscada es respecto a la realidad nacional, por un lado, y por otro respecto al tipo de proyectos que maneja la Agencia Nacional de Vivienda, organismo público que tiene en el Uruguay el rol de brazo ejecutor de las políticas nacionales de vivienda, y en el que me desempeño profesionalmente

5.1.1. Criterios de selección del edificio

Destino: edificio residencial

El sector residencial es, en Uruguay, el que involucra mayor metraje construido, con una franca evolución ascendente a partir del año 2003 (ver figura 30). Además, la Agencia Nacional de Vivienda, organismo en el que me desempeño profesionalmente, gestiona específicamente la construcción de edificios de vivienda.

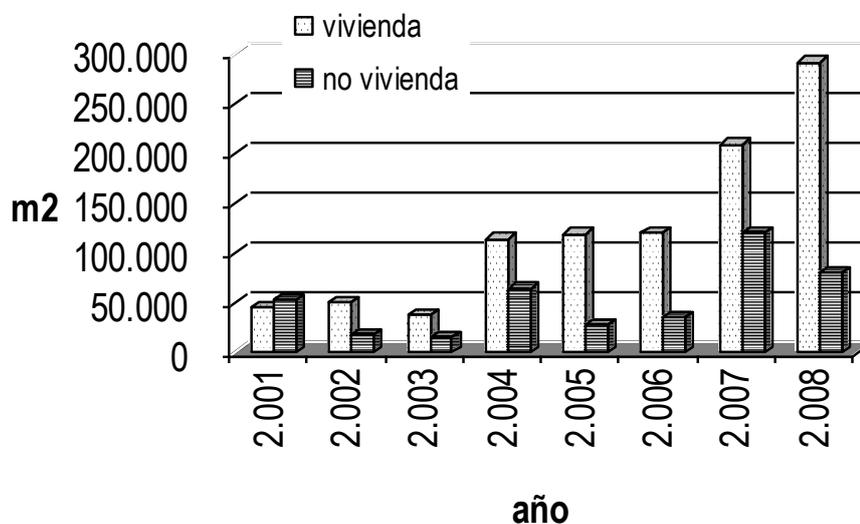


Figura 30 - Superficie de obra nueva según destino en Montevideo (según datos de la IMM)

Categoría: media

La vivienda de categoría media, es, dentro del sector de la construcción residencial, la más extensa en superficie construída (INE, 2009). A su vez el reglamento de producto de la ANV prescribe características de la vivienda que enmarcan dentro de esta categoría.

Sistema constructivo tradicional

Con respecto a las características constructivas, se requería una edificación que hubiera sido ejecutada utilizando tecnología y sistemas constructivos tradicionales, lo cual abarca las características de la gran mayoría de la obra que se realiza en nuestro medio.

Tipología en altura

Se buscó asimismo que fuera una construcción en altura, en función de su importancia relativa en la cantidad de viviendas construidas en el Uruguay. Además se intenta aportar a la discusión sobre esta opción tipológica desde una perspectiva ambiental.

Información disponible

Se enfocó a una obra terminada, a efectos prácticos del trabajo, pero que su ejecución fuera reciente, dado el interés en la utilidad de los resultados para la evaluación de obras futuras. También se requería la existencia de datos organizados sobre la obra necesarios para desarrollar el presente trabajo, y una empresa dispuesta a brindar su ayuda para el mismo.

5.2. PRESENTACIÓN DEL EDIFICIO

La obra seleccionada de acuerdo a los criterios enumerados es un edificio de viviendas en régimen cooperativo (Copeclub CEA III), financiado con crédito del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Esto significa que es producto de la política pública actual en materia de vivienda de interés social.



Figura 31: Edificio Copeclub CEA III

El edificio está ubicado en la zona céntrica de Montevideo, zona de mayor densidad de población. Es un edificio de planta baja y diez pisos construido con tecnología tradicional, con estructura de hormigón armado. La construcción fue realizada por la empresa CONSUR, la cual, a través de sus integrantes, brindó en forma generosa toda la información requerida a lo largo del estudio, aún cuando en ocasiones esta información no estuviera al alcance inmediato. Con una antigüedad de cinco años aproximadamente, el edificio presenta las ventajas de ser una obra reciente y por tanto con la información vigente sobre su proceso de construcción, y a su vez de tener un historial de uso sostenido que permite analizar la energía operacional con datos reales.



Figura 32 – Ubicación del edificio en Montevideo (imagen satelital Google maps)

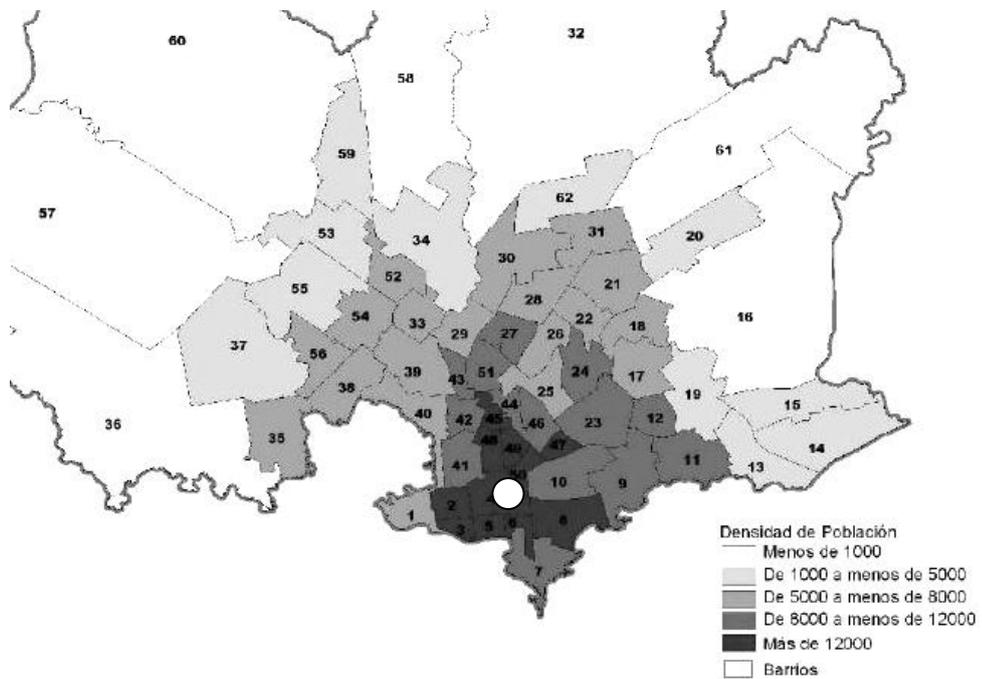


Figura 33 - - Montevideo. Densidad de población (INE, 2004)

5.2.1.1.Histórico

De acuerdo a datos del Departamento de Desarrollo de Programas de la ANV, el primer avance de obra corresponde a diciembre de 2003, y el último a octubre de 2006. La ocupación del edificio por parte de sus usuarios, al tratarse de una cooperativa, se produjo en un lapso breve de tiempo durante el mes de noviembre de 2006 (ver figura 34).

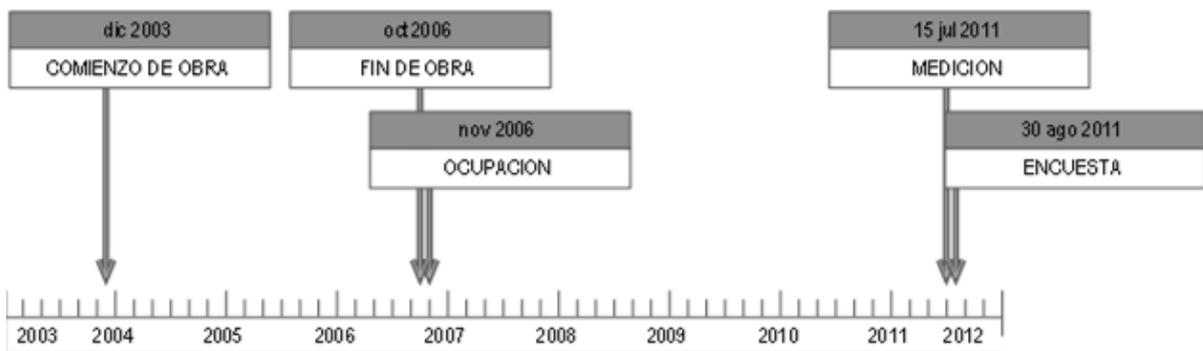


Figura 34 - Línea de tiempo de la obra

5.2.1.2.Programa

El programa consta de 41 apartamentos en total; 12 apartamentos de 3 dormitorios, 29 apartamentos de 2 dormitorios. Cuenta con un salón de usos múltiples, y patio con parrillero. Se desarrolla en planta baja y 10 plantas altas (ver planos en figura 35).

5.2.1.3.Estado actual de ocupación

El número de habitantes en el edificio actualmente es de 95 personas, lo que hace un promedio de 2,32 habitantes por unidad. Este promedio es algo menor al tamaño medio de hogar en el área urbana de Montevideo (2,8 personas por hogar), pero similar a la media de los quintiles superiores de ingreso (INE, 2004, MIDES, 2006). Una de las unidades está temporalmente vacía.

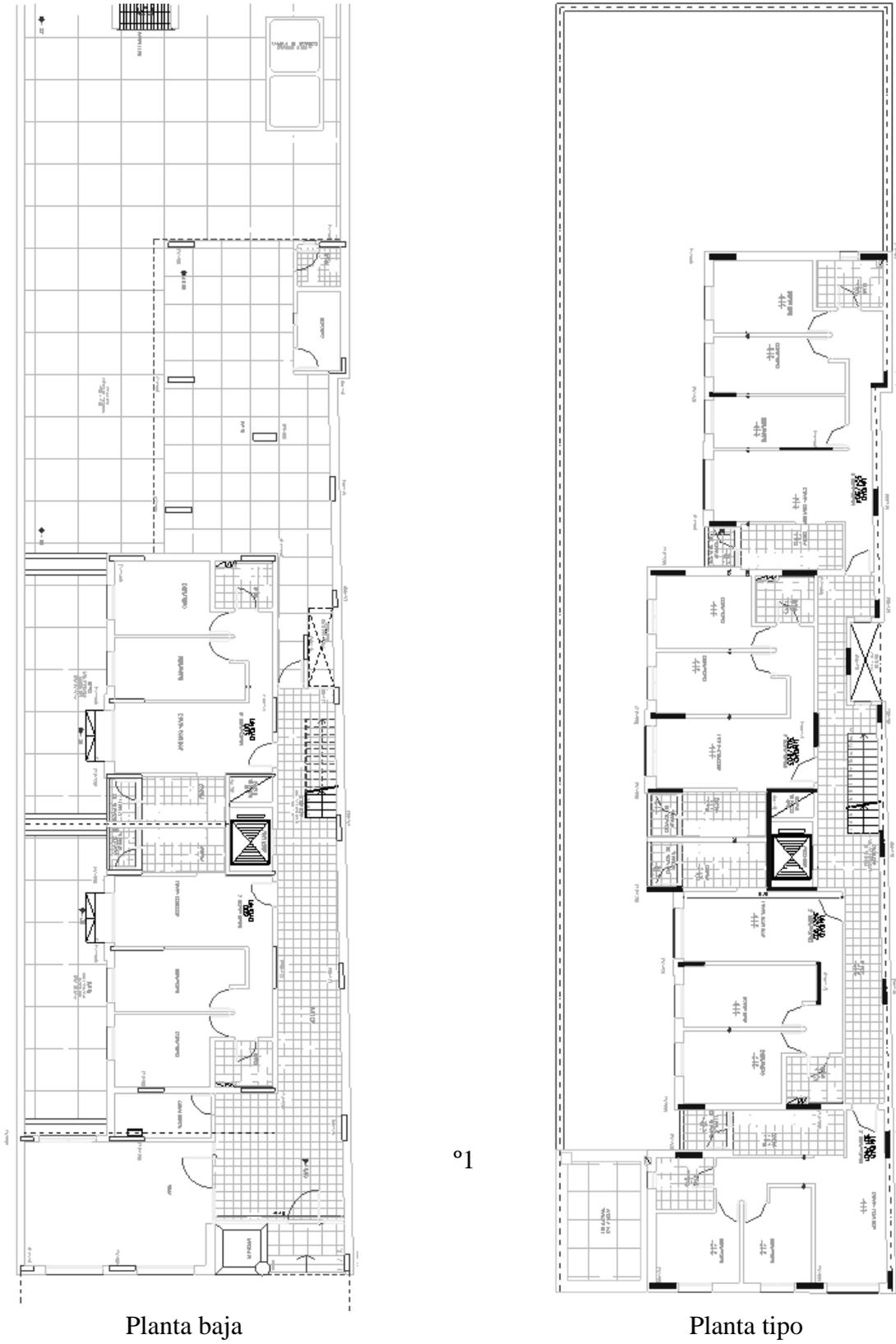


Figura 35 - Plantas edificio Copeclub

5.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

5.3.1. Elementos constructivos

A efectos del análisis energético de materiales, se propone la división de los elementos constructivos según se plantea en la tabla 9.

Tabla 9 - División en rubros de obra para definición de composición básica de materiales

Estructura	Fundaciones	Pilotes Cabezales Vigas de cimentación
	Estructura	Losas Vigas Pilares Escaleras Tanque
Albañilería	Muros	Divisorios Interiores Ext c/int Med c/int Ext. c/ext Ext simple Submuraciones
	Revoques	muros cielorrasos
	Contrapisos	
	Pisos	Baldosa cerámica Arena y portland Baldosa cemento Zócalos
	Revestimientos	Baldosa cerámica Zóc. Ducha Mesadas
	Hormigón no estructural	Dinteles Carreras Pretils Compl/terrazas
Aberturas	Aluminio Hierro Madera Vidrio	
Pprotecciones	Impermeabilizaciones	
	Pinturas	base agua base solvente
Instalaciones	Sanitaria	Artefactos Grifería Abastecimiento Desagües
	Eléctrica	Conductores Canalizaciones Terminaciones

Estructura

Las fundaciones del edificio están realizadas en base a pilotes de hormigón, por hincas de tubo (sistema Franki). La profundidad de cimentación se estableció en el orden de los cinco metros; el hormigón tiene una especificada una resistencia característica a los 28 días de 210 kg/cm².

Los forjados están constituidos por losas macizas de 17 cms de espesor, sin vigas internas (*two way flat plate*). Las mismas se apoyan en un sistema de vigas perimetrales y en pilares de hormigón armado. El sistema no tiene losas rehundidas, sino que presentan rebajes en la parte superior de losa para la instalación sanitaria de desagüe de baños. El núcleo de servicio con ascensor, escalera y tanque de agua superior e inferior, está conformado por elementos macizos de hormigón armado.

La especificación del hormigón para la estructura es la misma determinada para las fundaciones. Las armaduras son de acero traccionado y torsionado en frío según las normas UNIT 141-61 o 170-67, salvo los estribos de vigas y pilares de diámetro 6mm que serán de acero estructural según norma UNIT 34-46 (acero común).

Albañilería

Los muros exteriores son dobles con tabique exterior de ladrillo visto de campo, cámara de aire y tabique interior de ladrillo de campo. Tienen una capa hidrófuga que asegura la estanqueidad del mismo frente al agua exterior. La cámara de aire de los muros, de 4 cms de espesor, está ventilada. La capa impermeable está realizada sobre el paramento exterior del muro interior y es de arena y cemento portland con hidrófugo pintado con emulsión asfáltica. El muro exterior está anclado mediante bigotes de acero, amurados con mortero de arena y portland con hidrófugo.

Los muros interiores son de ladrillo de campo de 15cm de espesor. Los muros separativos entre las unidades son de ladrillo de campo de 20cms de espesor

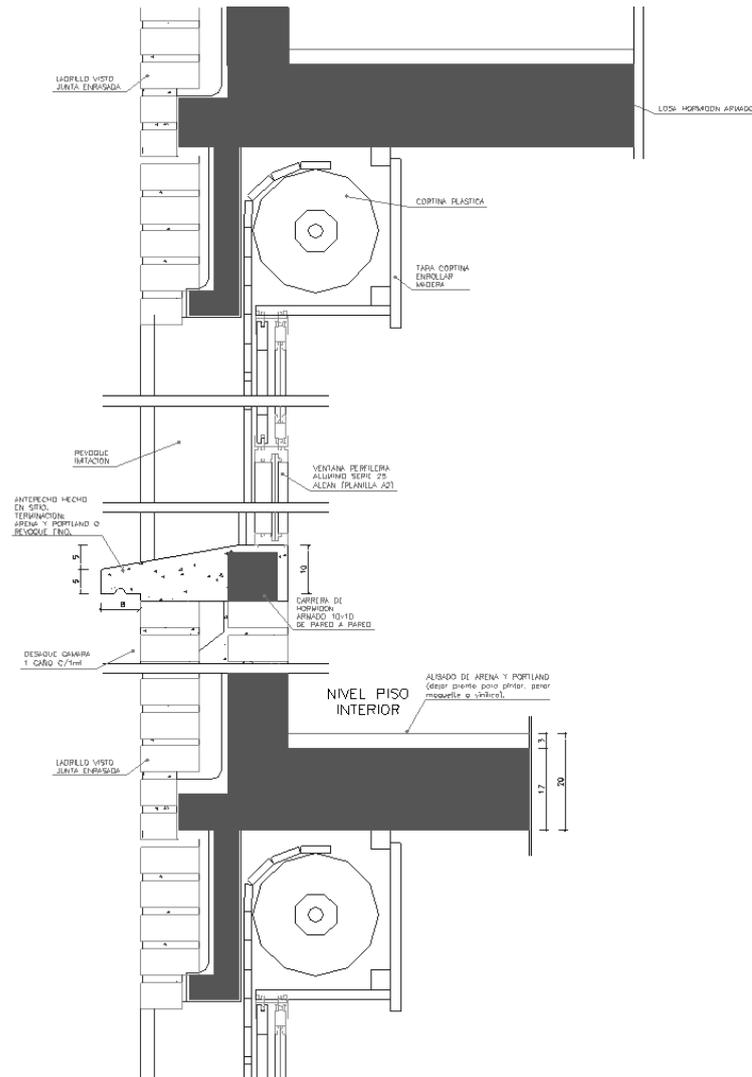


Figura 36 - Detalle constructivo

En muros, la terminación de los paramentos interiores en estares, dormitorios, circulaciones y paredes de cocina (excepto el área de muro sobre el revestimiento de cerámica sobre las mesadas), es de ladrillo a junta enrasada y revoque a la bolsa. Los paramentos verticales de los baños a partir de 1.80 mts y sobre el revestimiento en las cocinas sobre las mesadas están revocados con una capa de mezcla gruesa y terminación de mezcla fina. Las terminaciones de los paramentos exteriores son de ladrillo visto de campo con junta rehundida, y los paños de revoque son realizados a tres capas, arena y cemento portland con hidrófugo, mezcla gruesa y mezcla fina reforzada.

Los cielorrasos presentan terminación de balai planchado

Los contrapisos en planta baja, terrazas y azoteas son de hormigón de cascote, con pendientes de acuerdo a proyecto.

Los pisos de estares, dormitorios y circulaciones internas de las unidades de tres dormitorios fueron entregados con un alisado de arena terciada y cemento portland de 3 cm de espesor, sobre las losas de hormigón armado. Los pisos de las unidades de 2 dormitorios correspondientes a estares y dormitorios son de baldosa cerámica monococción.

Los pisos de los baños, cocinas, terrazas de servicio, paliers y el correspondiente a la escalera general del edificio, son de baldosa cerámica monococción.

Los zócalos, en cocinas y paliers son de cerámica similar al piso. Los estares, circulaciones y dormitorios de apartamentos de 3 dormitorios no tienen zócalo. Los estares, circulaciones y dormitorios de los apartamentos de dos dormitorios tienen zócalo de madera.

Los paramentos verticales de los baños están revestidos de cerámica monococción hasta 1.80 mts de altura. Las cocinas tienen un revestimiento de 60 cms de altura sobre la mesada y en los paramentos correspondientes a la ubicación de la cocina. Las mesadas de cocina son de granito de 2 cms de espesor con pileta y media de acero inoxidable.

Dinteles y carreras están realizadas en hormigón armado, hecho in situ.

Aberturas

Las puertas ventanas de los estares y cocinas y las ventanas de los dormitorios son de perfilería de aluminio, serie 25 Mecal.

Las barandas de los estares son de hierro. Los marcos de las puertas interiores de viviendas y puerta de acceso son de chapa doblada. Las aberturas en sala de máquinas, salida a azotea y zonas de servicios son de chapa doblada, así como la escalera para acceder a la plataforma del tanque de agua. Las tapas de éste también son en hierro.

La puerta de acceso de las unidades y en interior de baños de los 41 apartamentos. Originalmente, sólo las viviendas de dos dormitorios llevaban puertas en dormitorios. En cocinas hay placares de mdf prefabricados. Hay cortinas de enrollar de PVC en dormitorios y estares.

Protecciones

Baños y terrazas de servicio están impermeabilizados con emulsión asfáltica con dos capas de velo de vidrio a razón de 4 kg/m² más imprimación a razón de 0.5 kg/m² sobre capa de arena y portland con hidrófugo.

Las azoteas tanto transitables como no transitables tienen contrapiso de hormigón de cascote con pendiente, sobre el cual hay una aislación térmica a base de poliuretano proyectado de 2 cms de espesor. La impermeabilización está realizada con membrana asfáltica de 4 mm con alma de polietileno. Está terminada con arena y portland 6x1 en panes de 50x50 cms.

Las paredes interiores de viviendas de dos dormitorios, palliers de plantas altas, hall de planta baja y caja de escaleras, tenían originalmente imprimación de cal y 2 manos de cal de color blanco.

Las unidades de 3 dormitorios en un principio sólo imprimación. Las paredes exteriores revocadas están pintadas con dos manos de pintura acrílica, cara exterior de caja de escaleras, tanque de agua y sala de máquinas. La herrería tiene una mano de antióxido y dos manos de esmalte sintético. La carpintería tiene fondo blanco y esmalte sintético.

Instalaciones

El abastecimiento de agua potable está realizado con cañerías de polipropileno con depósito de agua elevado, y tanque de bombeo inferior ubicado en la planta baja.

La evacuación interna del edificio es en PVC, conectada a colector. Los aparatos sanitarios son modelo nórdico blanco, inodoro pedestal con mochila, la grifería es nacional, en cocina mezcladora monocomando.

La instalación de incendio consta de bomba de presurización de 4kg., bajada de 2" en hierro galvanizado desde tanque de agua superior y 6 cajas de mangueras en descansos de escalera. Inicialmente estaba prevista la instalación de gas por cañería, que finalmente no se realizó.

La instalación eléctrica es embutida, incluye portero eléctrico y canalizaciones para teléfono y TV cable.

El edificio tiene un ascensor con capacidad para seis pasajeros

5.4. MODELIZACIÓN

5.4.1. Modificaciones para configurar el modelo

A efectos de lograr mayor representatividad respecto a las construcciones que se realizan en nuestro medio, así como para uniformizar algunos aspectos que no aportan a los efectos del trabajo, se plantearon las siguientes modificaciones al proyecto original para su modelización:

En la memoria se preveía la colocación de las puertas interiores de estares y dormitorios solamente en los apartamentos de dos. Para el estudio, se considera que todas las puertas interiores fueron colocadas.

Asimismo, a pesar de que gran parte de los paramentos presenta terminación de ladrillo bolseado y balai, se consideró que todos los paramentos interiores son revocados a dos capas.

Con respecto a los pisos, se asumió que todos los pisos de baldosa de estares y dormitorios fueron colocados, no sólo los correspondientes a las unidades de dos dormitorios.

En lugar de la solución de terminación de muros encalados, se consideró que toda la pintura interior fue látex para interiores.

5.5. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ALTERNATIVAS

En función de la caracterización realizada de la solución constructiva, se proponen soluciones alternativas en los rubros de obra más significativos.

5.5.1. Criterios de desempeño

Las alternativas constructivas se configuraron en función de un criterio general de que las mismas no alteraran sustantivamente las prestaciones respecto a la solución original, en aspectos relevantes. Es naturalmente imposible que dos alternativas constructivas tengan exactamente las mismas prestaciones específicas, pero sí es posible establecer su equivalencia desde las más relevantes. Así, un tabique de yeso y uno de mampostería cerámica pueden tener características diferentes por ejemplo para colocar anclajes laterales de equipamiento, pero cumplen de manera similar la función principal de dividir ambientes, la percepción visual de ambos elementos terminados es similar, así como el espacio que ocupan y la capacidad de practicar en ellos aberturas interiores. Tampoco serán exactamente iguales en

muchos casos la durabilidad y exigencias de mantenimiento de la solución original y de la propuesta, ni otras características como la aislación térmica, etc., pero aún reconociendo dichas limitaciones se pueden establecer equivalencias a los efectos de estudios comparativos (GUSTAVSSON, PINGOUD & SATHRE, 2004).

5.5.2. Determinación de rubros

Los rubros de obra sobre los que se plantearon soluciones constructivas alternativas son por un lado, aquellos que de acuerdo a la literatura revisada tienen una mayor incidencia relativa en el total de la energía incorporada. Para el presente caso, dichos rubros son la estructura y los muros. La durabilidad de estos rubros es determinante de la durabilidad del edificio, y no tienen asociados factores de reposición significativos (MITHRARATNE y VALE, 2004; TAVARES, 2006). Por ello, se entiende que es pertinente el estudio comparativo de la energía incorporada inicial de las soluciones constructivas.

Se resumen a continuación las soluciones alternativas propuestas para los rubros planteados.

5.5.3. Estructura

En función de lo planteado en el ítem 3.5.5.1, la alternativa de sustituir el sistema estructural en hormigón por acero es negativa en términos de balance de energía incorporada. Por otro lado, si bien los sistemas estructurales en madera presentaron mejores resultados que los equivalentes en hormigón, en términos de energía incorporada, los estudios fueron realizados para estructuras de pocos niveles, y no para edificios de la altura del que se estudia en el presente trabajo. Por tanto se plantearon dos alternativas: la modificación del diseño del sistema estructural original, y la modificación del tipo de hormigón.

5.5.3.1. Modificación del diseño del sistema estructural original

De acuerdo a lo señalado en el ítem 3.5.6, se propuso un diseño de la estructura dentro de los esquemas tradicionales utilizados en Uruguay. La propuesta consiste simplemente en un rediseño de la estructura en base al sistema porticado tradicional de losas con vigas.

A partir de un despiece de las losas y vigas para la planta tipo, se calcula el volumen de hormigón correspondiente a losas y vigas. Se compara el volumen de hormigón para losas y vigas de la solución original y el de la solución alternativa para la planta tipo, y se obtiene un factor de reducción que se replica en los totales de losas y vigas. A la solución alternativa se

le agrega un contrapiso de 7 centímetros de espesor en un área equivalente a la de las losas modificadas.

No se realizó el cálculo estructural. La cuantía asumida para losas y vigas fue la misma que la asumida para la solución original. Las losas se supusieron todas de 10 cm de espesor y las vigas se asumieron todas de 12 cm de ancho por 45 cm de altura. Se asumió que el volumen de hormigón de pilares permanece constante.

No se contabilizó el volumen de muros que deja de construirse por la presencia de las vigas, a efectos del cómputo de la energía incorporada alternativa.

Esta solución solamente se cuantifica a nivel de la energía incorporada en materiales y transporte. No se realizan estimaciones sobre eventuales diferencias de energía incorporada directa en obra por la ejecución de ambas soluciones.

5.5.3.2. Modificación del tipo de hormigón

Se optó por un hormigón con sustitución parcial del cemento portland por ceniza ultrafina de la quema de bagazo de caña de azúcar (CBC). El Uruguay no cuenta con una industria siderúrgica que genere cantidades significativas de ceniza. En cambio, posee residuos agroindustriales que podrían ser utilizados. En particular, existe un ingenio azucarero en el departamento de Artigas, perteneciente a la empresa estatal ANCAP, que genera energía eléctrica de autoabastecimiento a partir de la quema del bagazo de caña. La ceniza resultante de este proceso está siendo actualmente analizada con respecto a su actividad puzolánica (Ruchansky, en proceso), pero, como se planteó en el ítem 3.5.5.1, estudios a nivel regional ya han arrojado resultados positivos sobre la viabilidad de este material como sustituto parcial del cemento (CORDEIRO, 2006).

Como se explicó, la molienda de la ceniza residual de bagazo de caña para lograr ceniza ultrafina, demanda energía que queda incorporada al producto. Además deberá considerarse el transporte del material.

5.5.4. Muros

Según lo expuesto en los ítems 3.5.5.2 y 3.5.6, se plantearon dos soluciones constructivas alternativas para los muros interiores, y para el tabique interior de los muros dobles exteriores. La primera consistió en sustituir los muros de ladrillo macizo por mampuestos de cerámica

hueca de medidas acordes a los tabiques a reemplazar. La segunda plantea sustituir tabiquería de ladrillo por equivalente en placas de yeso.

La equivalencia de las soluciones propuestas, en lo que hace a los tabiques interiores de muros exteriores, radica en forma relevante en el comportamiento higrotérmico de las mismas. Para controlar esta condición, se calculó el coeficiente de transmitancia térmica para cada caso, utilizando el programa HTERM 2.0 desarrollado por el Departamento de Climatología de la Facultad de Arquitectura de la Udelar.

La solución original presenta un coeficiente de transmitancia térmica de $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$, es decir que cumple con la exigencia municipal ($U \leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ para cerramientos opacos) (ver figura 37).

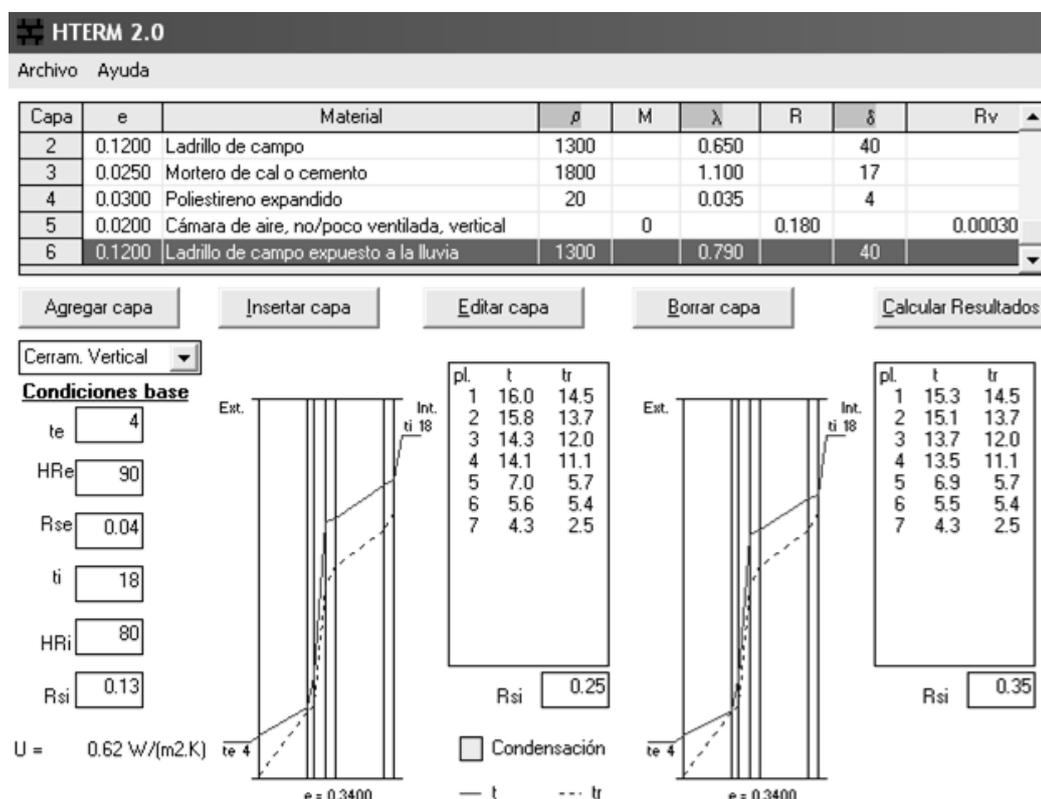


Figura 37 - Esquema del comportamiento higrotérmico de muro exterior (solución original)

Para los muros interiores, un criterio de desempeño importante es el comportamiento acústico. Por ello, las alternativas propuestas que se presentan para los tabiques divisorios entre unidades están de acuerdo a lo exigido por la reglamentación municipal (IM, arts. 3366 y 3366.1 del Digesto departamental).

5.5.4.1. Cerámica hueca

Esta alternativa consiste en la sustitución de la mampostería de ladrillo macizo de los muros interiores por ticholo cerámico hueco. Las características de los mampuestos se extrajeron de “Materiales cerámicos”(FARQ, 2002).

El coeficiente de transmitancia térmica de esta solución es de 0.60 W/m²K, es decir prácticamente igual al de la solución original (ver figura 38). El comportamiento del muro en lo que hace a condensaciones superficiales e intersticiales también es adecuado a las temperaturas de cálculo.

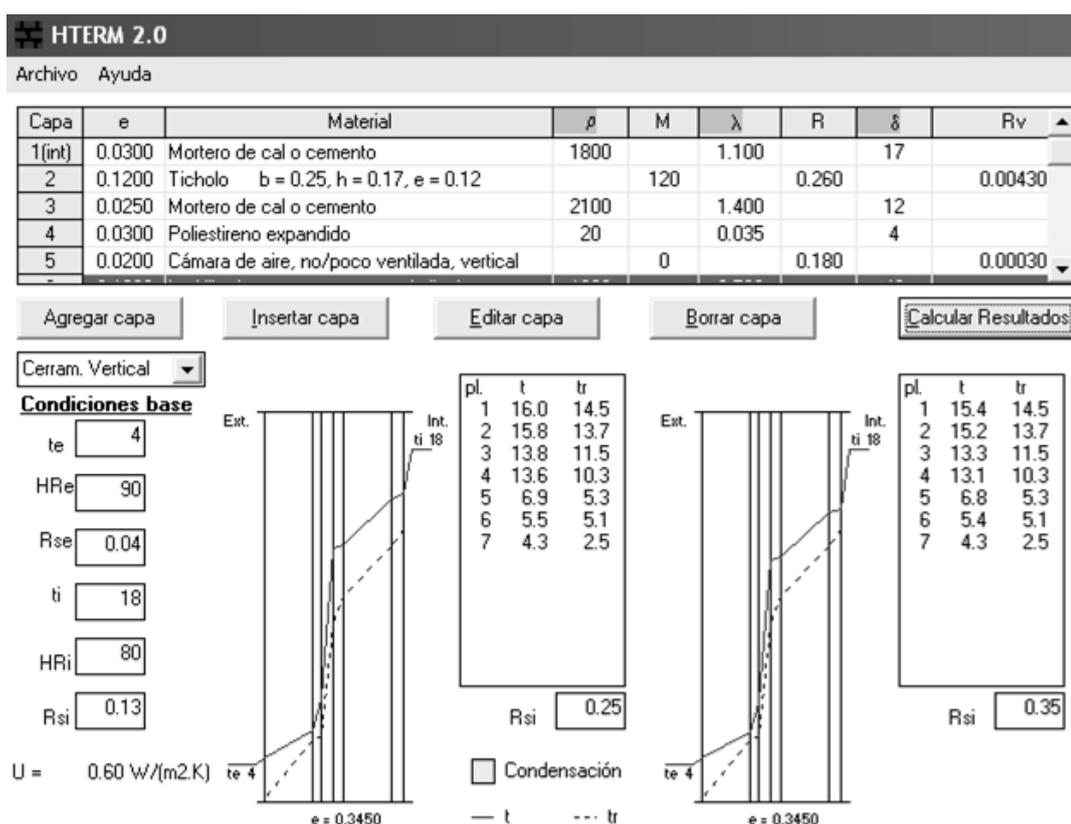


Figura 38 - Esquema de comportamiento higrotérmico de muro exterior (alternativa 1)

5.5.4.2. Yeso

La segunda alternativa para los muros interiores fue sustituirlos por tabiques de placas de yeso con estructura de perfiles de chapa de acero zincado y, aislación de lana de vidrio o poliestireno expandido según el caso.

De la evaluación del comportamiento higrotérmico de sustitución de tabiques interiores de muros dobles en esta solución, se observó que el coeficiente de transmitancia térmica se mantiene igual al de la solución original (en este caso 0.63 W/m²K) (figura 39).

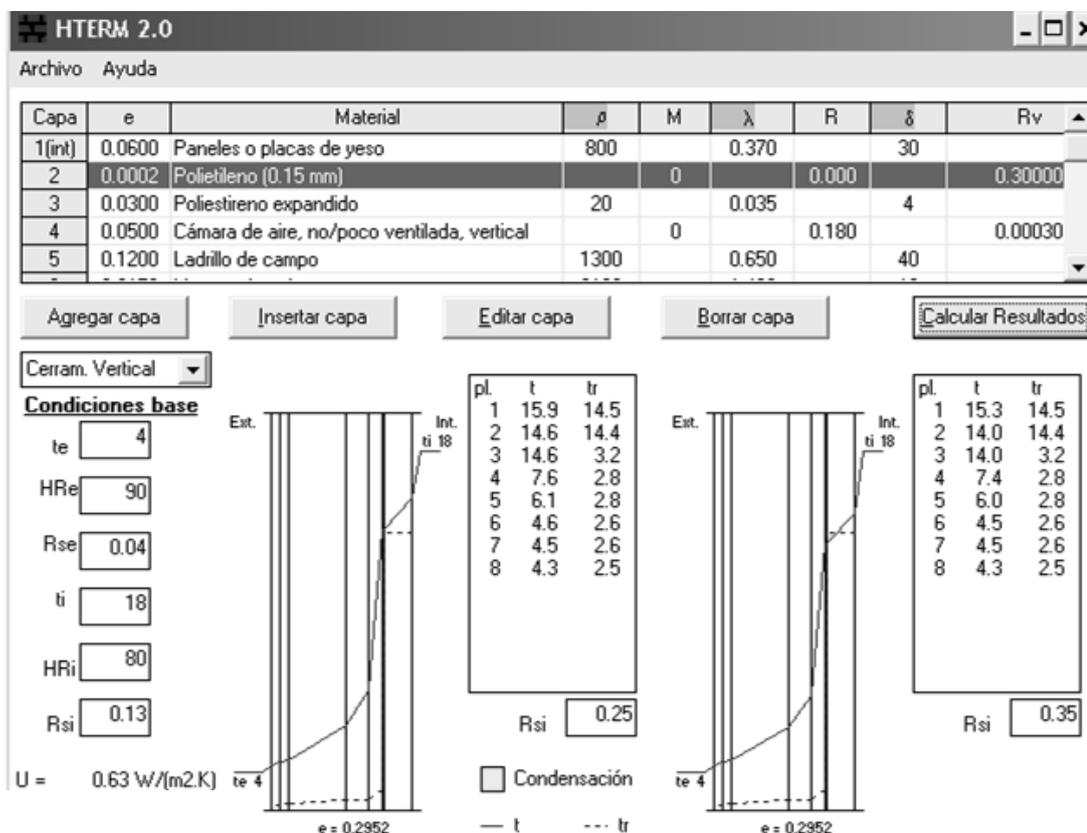


Figura 39 - Esquema de comportamiento higrotérmico de muro (alternativa 2)

5.6. ORGANIZACIÓN DE DATOS Y CUANTIFICACIONES

ETAPA A: Energía incorporada

Para hallar el valor de energía incorporada total, se calcularon y sumaron la energía incorporada inicial en los materiales (incluyendo pérdidas), en el transporte y en obra. Luego se calculó la energía incorporada recurrente y la energía incorporada en la deconstrucción.

5.7. ENERGIA INCORPORADA INICIAL

5.7.1. Energía incorporada en materiales

5.7.1.1. Determinación de cantidades de materiales

Las cantidades de materiales se obtuvieron a partir de documentación proporcionada por la empresa constructora. Por un lado brindó información sobre metrajes de los diversos componentes de obra. Por otro lado puso a disposición facturas de compra de materiales, que en principio representarían una información más veraz sobre el consumo real. Sin embargo, esta información planteaba varios inconvenientes: en general las facturas no presentan cantidades sino precios, a partir de los cuales, y con estimaciones de precios unitarios, habría que ponderar cantidades; las compras no correspondían necesariamente sólo a la obra en estudio; las compras no están referidas a rubros de obra, por lo que debería aplicarse un criterio arbitrario de adjudicación de cantidades a los mismos; por último, esta información no permite comparar la solución real con soluciones alternativas que necesariamente se calcularán en base a metrajes.

Se descomponen los componentes hasta llegar a materiales en base a proporciones tipificadas, extraídas de diversas fuentes. En particular, para dosificaciones de morteros, hormigones y mampostería, se utilizó la tabla de rendimientos del Instituto de la Construcción (FARQ, UdelaR, 1981).

Se convierten las cantidades halladas a valores de masa de material. Para ello se recurrió a diversas fuentes, en muchas ocasiones información sobre propiedades de los materiales proporcionadas por los propios fabricantes.

5.7.1.2. Índices energéticos de materiales

El siguiente paso fue determinar el índice energético para cada uno de los materiales involucrados y multiplicarlo por la masa del material correspondiente.

Calcular los índices energéticos de los materiales involucrados representa una tarea que escapa a los límites de este estudio, ya que cada uno implica un análisis energético específico. Por tanto se optó por trabajar con datos existentes. Este recurso es de común aceptación en la literatura revisada (SATTLER et al. 2009, FAY, TRELOAR y IYER-RANIGA, 2000; YOURHOME, 2008). No se dispuso de bases de datos nacionales, por lo que se establecieron

criterios para seleccionar datos de otras regiones. Sperb (2000) da cuenta de la gran divergencia existente en la literatura entre resultados para los mismos materiales, aún siendo investigaciones realizadas en las mismas regiones. En función de ello, y para lograr mayor consistencia, se dio prioridad, más que a la cercanía geográfica de los datos, al hecho de que la metodología de cálculo fuera explicitada y fuera acorde a los objetivos del presente estudio. Asimismo, se prefería una base única de referencia y no múltiples fuentes, por lo que debía ser extensa. Por supuesto, debía ser accesible.

En función de estos requerimientos, se optó por el Inventario de Energía y Carbono (ICE por sus siglas en inglés) (HAMMOND y JONES, 2009) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Bath. Esta base de datos tiene una evidente limitación para el presente trabajo que es la preferencia de datos británicos o europeos. A pesar de ello, y sin que se trate de verificar la confiabilidad de la información, se entiende que es la que mejor se ajusta a las necesidades de este estudio, en función de la metodología aplicada:

- Los datos reflejan la energía primaria utilizada en los trabajos de extracción, manufactura y transporte inherente a la producción de cada material
- Los datos son “cradle to gate”, es decir que no está incluido el transporte de los materiales a la obra
- Prefiere datos obtenidos según metodologías aprobadas o estandarizadas, idealmente de acuerdo a la norma ISO 14040/44.
- Considera los materiales generadores de energía utilizados como materia prima (feedstock energy) solamente cuando se entiende que representan una pérdida permanente de recursos valiosos, como en el caso de los combustibles fósiles. El valor calorífico de la madera, por ejemplo, no es tomado en consideración.
- El abordaje del reciclaje de los materiales se realiza considerando el contenido real de material reciclado en la manufactura, no el potencial de reciclabilidad del material manufacturado.
- Prefiere datos recientes.
- La base está enfocada hacia productos de construcción y en particular a productos listos para uso en la industria de la construcción, más que para materiales crudos no utilizables.

5.7.1.3. Factores de pérdidas de materiales

Se corrigen los parciales de energía incorporada por factores de pérdida. Dichos factores fueron obtenidos de Formoso (2009), y surgen de un trabajo realizado a nivel nacional en Brasil entre los años 1996 y 1998. Este estudio analizó obras en varios estados del Brasil; se considera que los materiales, tecnología y procedimientos constructivos tradicionales analizados no difieren respecto a los utilizados en el Uruguay.

El trabajo referido toma en cuenta los principales materiales de la construcción que sufren procesos de transformación física y/o química durante su puesta en obra, y por lo tanto que son más vulnerables a pérdidas durante la construcción. Para estos materiales, el estudio analiza las pérdidas sufridas en la propia obra, no las debidas a procesos previos. El aluminio por ejemplo no aparece señalado, ya que no sufre pérdidas en el proceso de colocación en obra. No se contemplan en este caso, por ejemplo, las pérdidas de sobrantes de perfiles o aserrado en la fábrica de aberturas.

Tabla 10 - Factores de pérdidas de materiales (de Formoso et al., 1998)

Material	Pérd. promedio	Pérd. mediana
Acero	10,3	10,6
Concreto premezclado	9,5	8,6
Cemento	73,7	45,2
Arena	47,5	40,7
Piedra	31,3	37,1
Cal	48	32,8
Mortero	59,8	32,6
Hormigón	182,2	173,9
bloques de arcilla	18	13,8
bloques de concreto	11,3	7,7
Ladrillos	52,2	78
Tejas	15,6	14,4
tubos eléctricos	15,4	15,1
Cables	25,4	26,7
tubos de agua/desagües	19,9	14,8
Drywall	45,1	29,5
Pintura	15,3	14,6
Cerámicos	14	14

El volumen de los pilotes fue calculado a partir de los diámetros y profundidades nominales según figuran en los planos de estructura. El valor obtenido fue corregido por un factor del 30%, según datos proporcionados por una empresa líder en pilotajes en el medio local, considerando el bulbo inferior y la respuesta lateral del terreno durante la ejecución de los pilotes.

5.7.1.4. Energía incorporada del agua

El agua se consideró aparte del resto de los materiales, y no se distribuyó en los rubros de obra.

La carga energética del agua incorporada en materiales previo al ingreso a obra se asume incluida en las intensidades energéticas respectivas. La cantidad de agua utilizada en obra se contabilizó a partir de las facturas de consumo. El valor obtenido a partir de las mismas fue corregido por un factor de pérdidas, considerado como el cociente entre agua facturada y agua elevada.

Agua elevada a distribución	Consumos Autorizados	Consumos autorizados facturados	Consumos medidos y facturados	Agua Facturada	Agua entregada
			Consumos no medidos y facturados		
		Consumos autorizados no facturados	Consumos medidos y no facturados	Agua no facturada	
			Consumos no medidos y no facturados		
	Pérdidas de Agua	Pérdidas Aparentes	Consumos no autorizados (fraudes)	Agua no facturada	
			Errores de los macro y/o micromedidores		
		Pérdidas Reales	Fugas en redes de transporte y/o distribución	Agua no entregada	
			Fugas y/o rebases en tanques de distribución o reserva		
Fugas en conexiones hasta el punto de medición					

Figura 40 - Clasificación de pérdidas del agua elevada (adaptado de OSE, 2007)

Este valor, denominado indicador de agua no contabilizada, es publicado periódicamente por OSE, organismo público a cargo del suministro de agua potable a nivel nacional. Un porcentaje de las pérdidas corresponde a agua no facturada pero entregada (figura 40),

denominadas pérdidas aparentes, y, a los efectos de la energía incorporada del agua, no debería incidir en el cálculo. Sin embargo, no se obtuvieron datos respecto a dicho porcentaje, por lo que se utilizó el valor del indicador referido. El valor del indicador de agua no contabilizada nacional al 31/12/2010 fue del 52,8% (OSE, indicadores de desempeño, 2011).

Con respecto a la intensidad energética del agua, el valor manejado por la principal base de datos utilizada para este trabajo (ICE – HAMMOND y JONES, 2008) era muy superior a la resultante de otros estudios sobre el tema (Water UK, 2010). Los responsables de la creación y actualización de dicha base admiten que el valor obtenido para el agua responde a un solo dato, y que será revisado para versiones posteriores, ya que ha sido cuestionado. Por tanto, se manejó para este trabajo un valor alternativo que se calculó en base a datos del mismo país de origen que la base referida.

5.7.2. Energía incorporada en transporte

5.7.2.1. Transporte de materiales

Se determinaron las siguientes variables: la procedencia de cada material, las distancias por tipo de transporte, el o los tipos de transporte utilizados y el consumo del medio de transporte correspondiente.

La procedencia de los materiales se obtuvo a través de información proporcionada por la empresa constructora y luego mediante entrevistas presenciales o telefónicas a proveedores, o consulta a información publicada por los mismos. En varios casos, no se obtuvo información sobre la procedencia de la marca del elemento efectivamente colocado en obra. Se buscó en esos casos información de productos similares comúnmente utilizados en el mercado local.

Para algunos materiales el dato de procedencia no es único, y se realizó un promedio de distancias y sistemas de transporte, ponderado por la incidencia relativa en el insumo total y por el consumo según el tipo de transporte. Tal es el caso por ejemplo de la materia prima para la fabricación de perfiles de aluminio, según se muestra en la tabla 11.

Tabla 11 - Distancia ponderada del transporte de aluminio

<i>Aluminio</i>	<i>distancia</i>	<i>% de incidencia</i>	<i>distancia ponderada</i>	<i>MJ/ton km</i>	<i>total</i>
Puerto Madryn	1237,136	0,525	649,50	0,4	259,79856
San Pablo	1560	0,1125	175,50	1	175,5
San Luis	4871	0,1125	547,99	1	547,9875
Santiago de Chile	1340	0,125	167,50	1	167,5
Bogotá	4780	0,125	597,50	1	597,5
					1748,28606

La variable distancia se manejó con información sobre distancia entre ciudades. En varios casos se aplicaron programas de cálculo de distancias online, que manejan coordenadas geográficas. Estas aplicaciones proporcionan la distancia en línea recta. En algún caso, la distancia se estimó sobre mapas a escala. Los datos de distancias dentro del Uruguay corresponden a distancias de transporte carretero. Para transportes marítimos, se recurrió en particular al Sea Distance Voyage Calculator, que proporciona distancias de rutas marítimas entre puertos. En algunos casos la distancia total comprende recorridos terrestres y marítimos. Cuando se tuvo la información, se sumaron distancias marítimas y terrestres ponderadas por el consumo de los respectivos medios de transporte. Sin embargo, para algunos materiales puntuales importados no se contó con el dato de ciudad de origen sino puerto de origen, por lo que la distancia terrestre no está considerada. A su vez, las distancias se consideraron una sola vez, es decir, se asume que el medio de transporte regresa cargado, y que la energía insumida en el retorno es incorporable al material que transporta. En esta consideración se exceptuó al hormigón premezclado (MILLER, 2001).

El medio o los medios de transporte utilizados fueron en algunos casos parte de la consulta efectuada a proveedores, y en otros casos se tomó el que normalmente se utiliza para el tipo de recorridos y distancias. Los datos de gasto energético para dichos medios de transporte fueron tomados de Collins (1993) y Alcorn (2003), habiéndose contrastado con otras fuentes (NREL US LCI DATABASE, 2007 apud REINER, PITTERLE WHITAKER, 2007). Estos datos asumen la optimización al 100% de la carga del medio de transporte.

Tabla 12 - costo energético por tipo de transporte

Tipo	Int. Energía (MJ/ton neta km)	Fuente
tren a granel	0,30	Collins, 1993
tren de carga	0,60	Collins, 1993
tren de ramales secundarios	1,70	Collins, 1993
barco costero	1,40	Collins, 1993
carguero a granel	0,20	CBPR study, 1995
carguero a granel carga variada	0,40	IDEMAT 96
utilitarios	20,00	Collins, 1993
camiones rígidos	2,50	Collins, 1993
camiones articulados	1,00	Collins, 1993
rígidos y articulados	2,00	Collins, 1993
tren de carretera	0,50	Collins, 1993

Para el caso del hormigón, además de efectuar el procedimiento descrito, se solicitó a la empresa proveedora de hormigón premezclado información específica de rendimientos de camiones, incluyendo el camión bomba para la puesta en obra del material.

5.7.2.2. Transporte de mano de obra

Cole (1999) considera relevante el transporte de personal en la construcción de obras de hormigón armado, para el cómputo de la energía incorporada inicial. Estas obras demandan un uso intensivo de mano de obra, en comparación con otras soluciones constructivas.

Para llegar a esa conclusión, el estudio referido asume que cada trabajador viaja solo, y que lo hace en automóvil promedio a nafta con un recorrido diario de cincuenta kilómetros. La eficiencia del auto de pasajeros promedio en USA a la fecha del estudio era de 21,4 millas por galón, que equivale a 9,1 kilómetros por litro (BTS, 2009).

Dicha situación no refleja la realidad local de Montevideo. Motos, bicicletas y transporte colectivo son ampliamente utilizados por los trabajadores de la construcción. Los recorridos promedio son menores y los rendimientos de los vehículos, superiores. Los salarios en la construcción son bajos y el precio del combustible es el más alto de la región. En función de ello, y de la dificultad de establecer los recorridos y consumos reales, se optó por no realizar estimaciones del costo energético del transporte de mano de obra. Este criterio, como explica Cole, está de acuerdo con los criterios de análisis del nivel dos del IFIAS (1979).

5.7.3. Energía incorporada en obra

La energía incorporada inicial consumida en el predio de la obra se calculó como la suma de la energía eléctrica más la energía correspondiente a combustibles fósiles. En consistencia con el análisis que se desarrolla, se calcularon valores de energía primaria a partir de la determinación de requisitos energéticos de energía para cada caso. Como se estableció en el alcance del trabajo, no se consideró el diferencial de ingesta calórica del personal debido a los requerimientos de la actividad de obra. De todos modos se realiza una estimación para evaluar su significación.

5.7.3.1. Determinación de los REE

Se determinaron los requisitos energéticos de energía para la energía eléctrica, para derivados del petróleo y para la leña. Los cálculos se realizaron a partir de datos de la matriz energética nacional 2009 (ver tabla 13).

El factor de energía eléctrica se ponderó de acuerdo a las fuentes primarias. La cuotaparte generada con hidroenergía, energía eólica y biomasa se calculó directamente, en tanto la parte generada con combustible fósil se calculó a partir de corregir la energía correspondiente por el requisito energético de energía de dicho combustible. Para el cálculo no se consideró la porción de energía eléctrica importada.

Como el petróleo es importado, en la matriz no figuran pérdidas por extracción y transporte. El factor de eficiencia que se calculase en base solamente a datos de la matriz quedaría por tanto incompleto. Se optó en cambio por utilizar información hallada en la bibliografía. Se recurrió en particular a datos del SAP 2005, del Reino Unido (Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating). Este factor se utilizó tanto para los derivados del petróleo consumidos en trabajos de obra, como para los utilizados como insumo para la generación de energía eléctrica.

Para cada tipo de energía, se dividió la oferta nacional de energía anual (según la metodología explicitada por el organismo, es la energía a la cual no se le han deducido las pérdidas por transformación, transmisión, transporte, distribución y almacenamiento, ni la energía no utilizada) por el consumo final total (aquella energía a la que se le han deducido las pérdidas referidas antes, más el consumo propio del sector energético).

5.7.3.2.Energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica se determinó a partir de las facturas mensuales de la obra. Se obtuvieron facturas de consumo de energía eléctrica de la gran parte del período de obra, desde mayo de 2004 hasta noviembre de 2005. Los meses faltantes se completaron prorrateando los valores de consumo mensual del período conocido.

El valor de energía entregada se corrigió por el factor de energía primaria correspondiente.

5.7.3.3.Combustibles fósiles

Se analizaron las actividades de obra que utilizaron derivados del petróleo como fuente de energía. Para la estimación de consumos y rendimientos se realizaron entrevistas con empresas de los ramos correspondientes, ya en forma presencial, ya telefónica y vía mail.

Para el bombeo de hormigón premezclado, se consultó a la principal empresa de plaza, quien puso a disposición datos tanto del bombeo como del transporte del material.

Con respecto al pilotaje, para obtener el consumo de gasoil utilizado se solicitó información al subcontratista. Ante la negativa a brindar datos, se estimó a partir de información sobre rendimientos promedio y tiempos de uso, obtenidos en entrevista presencial con una empresa competidora. Para la extracción de residuos, se realizó una estimación de cantidad de volquetas durante la obra. En este caso no se considera la operación de carga y descarga, sino exclusivamente el transporte. Para el consumo de los camiones y la distancia recorrida, se consultó a una empresa del ramo. Finalmente, en lo que hace a la colocación de membrana asfáltica, se realizó la consulta telefónicamente sobre el consumo de gas licuado.

Luego se calculó la energía incorporada en función del valor calorífico inferior del combustible, y se corrigió el valor por el factor de energía primaria determinado.

No se contabilizó el gasoil utilizado como desencofrante (“feedstock energy”).

5.7.3.4. Diferencial de ingesta calórica del personal

De los estudios analizados sobre energía incorporada, en ninguno se considera la energía consumida por el personal de obra para alimentación. En línea con la conveniencia de unificar criterios para los análisis de energía incorporada en edificaciones, este trabajo tampoco la incluirá en el cálculo. No obstante, se realiza aquí una estimación de la misma para determinar su relevancia relativa.

Los requerimientos calóricos en adultos dependen del grado de actividad física que realizan (U.S. Dep. of Health, 2010). El trabajo de obra puede ser calificado como de físicamente activo. Por tanto, exigirá una ingesta calórica a quien lo desarrolla superior a la que requeriría de realizar otra actividad menos exigente físicamente. El Departamento de Salud de USA (2010) propone tres categorías para las personas según su exigencia física: sedentarios, moderadamente activos y activos. Se estimó por tanto el diferencial de ingesta calórica como la diferencia entre los requerimientos diarios de la categoría "activos" y de la categoría "moderadamente activos". Para la estimación de la cantidad de jornales trabajados en la obra (jornadas/hombre), se recurrió a datos del Banco de Previsión Social, organismo público a cargo de los aportes jubilatorios. Este organismo maneja tablas de cantidad de jornales por metro cuadrado, que varían según el tipo de construcción. En entrevista con un tasador de dicha institución, se obtuvo un valor para la construcción de obra nueva del edificio de referencia de 5,3 jornales por metro cuadrado. El edificio tiene 3020 m², lo que hace un total estimado de 16000 jornales. Según el Departamento de Salud de USA, la ingesta calórica para un hombre entre 19 y 30 años, moderadamente activo es de 2600-2800 calorías, mientras que si es activo, es de 3000.

Esto implica que el posible diferencial energético debido a la ingesta calórica de los trabajadores, sería de 300 calorías por persona por día, asumiendo que el promedio de los mismos, si no estuviera en la obra, se dedicaría a una tarea con actividad física moderada. Multiplicado por la cantidad de jornales estimada y transformado a GJ, representa 20,1 GJ para toda la obra.

5.8. ENERGÍA INCORPORADA RECURRENTE

Para calcular la energía incorporada recurrente se determinaron dos valores. Por un lado la vida útil del edificio, y por otro los factores de reposición de materiales.

La estimación de la vida útil del edificio, no desde su adecuación a las demandas subjetivas de los ocupantes, sino desde un punto de vista de su duración física en función de parámetros de desempeño mínimos (GORGOLEWSKI, 2005; ATHENA, 2006), se determinó en 60 años (ver tabla 14), a partir de la consideración de la bibliografía revisada (EOTA, 1999; DIAS, 2003; TAVARES, 2006; O'CONNOR, 2004; FIKER, 2005; PULLEN, 2000) (ver figura 41).

Tabla 14 - Vida útil de estructuras de edificios (Dias, 2003)

Caso	Material principal	Ambiente	Vida útil (años)
Caso base	Hormigón armado	seco no agresivo	60
Variaciones de material	Acero estructural	seco no agresivo	80
	Mampostería y/o madera	seco no agresivo	100
Variaciones de ambiente	Hormigón armado	húmedo no agresivo	40
	Hormigón armado	húmedo agresivo	30

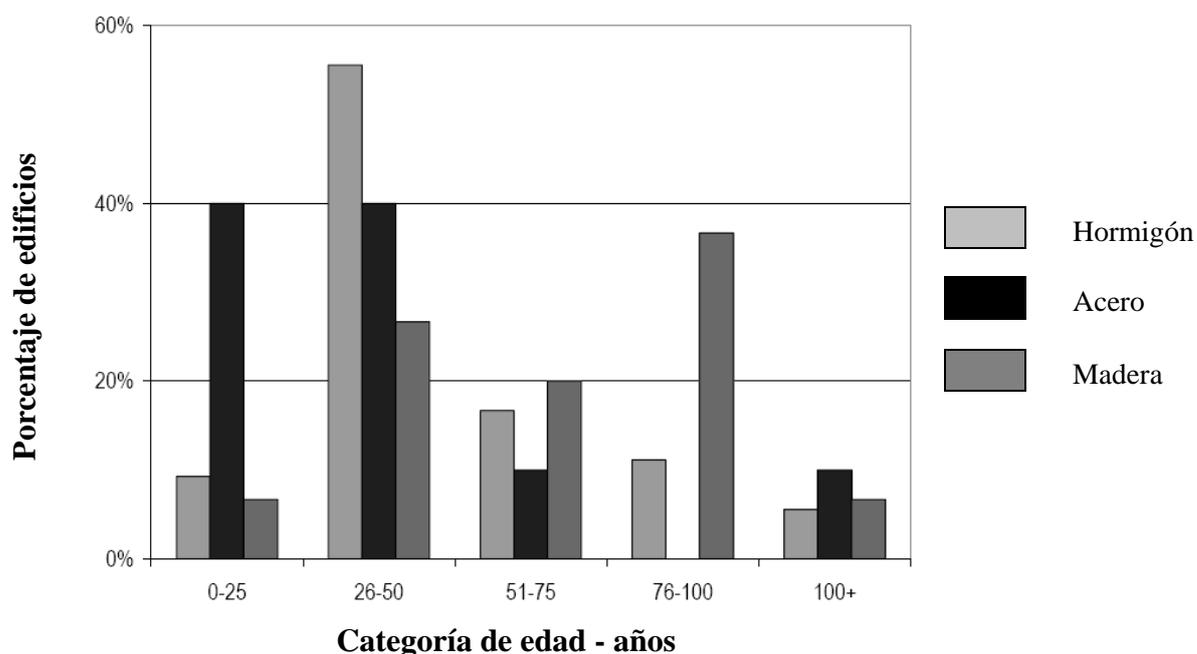


Figura 41 – Vida útil de edificios según el sistema constructivo (O'Connor, 2004)

Con respecto a los factores de reposición, se manejaron como referencias los valores de durabilidad de materiales planteados en Tavares (2006) y en Mithraratne y Vale (2004). Los

factores de reposición se calcularon como el cociente entre la vida útil de la edificación y el valor de durabilidad de cada material o componente (ver tabla 15). La energía incorporada inicial de los materiales, pérdidas y transporte, se multiplicó por los respectivos factores de reposición, y se obtuvo un valor de energía incorporada recurrente de materiales. Para calcular la energía incorporada directa de obra, se calculó la relación entre la energía incorporada recurrente de materiales y la energía incorporada inicial. Se multiplicó la energía incorporada inicial de obra por el factor referido.

Tabla 15 - Factores de reposición (a partir de Tavares, 2006; Mithraratne y Vale, 2004)

Componente	Durabilidad (años)	Factor de reposición (años)
Estructura	100	1,00
Muros ceramicos, morteros	100	1,00
Paneles, aislaciones, argamasa	69	1,00
Revoques	60	1,00
Contrapisos	100	1,00
Pisos de hormigón	100	1,00
Piso ceramico	30	2,00
Parquet	50	1,20
Caños de bajada	20	3,00
Caños pvc	50	1,20
Desagües pvc	45	2,61
Cañería abast	16	3,75
Tubos hierro galvanizado	15	4,00
Conexiones instalación sanitaria		2,00
Artefactos sanit	30	2,00
Accesorios baño	20	3,00
Accesorios cerámicos baño	25	2,40
Actualizar cocina	30	2,00
Instalaciones de cocina	30	2,00
Aberturas	60	1,00
Aberturas de madera	46	1,30
Paneles madera	45	1,33
Pintura interior	8	7,50
Pinturas exteriores	8	7,50
Impermeabilización	10	6,00
Pintura cubierta	11	5,45
Inst. Eléctrica	50	1,20

5.9. ENERGÍA INCORPORADA DE DECONSTRUCCIÓN

Para la energía de deconstrucción se tomaron en cuenta dos factores, el costo energético de la demolición y el transporte de los residuos. Para el primero se calculó el peso total en kg de los materiales utilizados en la construcción, y se le sumó el peso total de los materiales utilizados en el mantenimiento, de acuerdo a los factores de reposición. De acuerdo a Tavares (2006), los trabajos de demolición de los elementos principales del edificio insumen una energía equivalente a 0,0354 MJ/kg. Este valor se utilizó en el presente trabajo para estimar la energía total de demolición.

Para el transporte de escombros, se solicitó información a empresas del ramo. Se consideró el retiro en camiones de 10 toneladas, con un rendimiento de 0,3 lts/km, y un recorrido total de 20 km.

No se incluyó el transporte de los materiales correspondientes a pérdidas iniciales, porque está incluido en la energía incorporada de obra.

ETAPA B: Parámetros de energía operacional

Se describe a continuación el cálculo de los parámetros de energía operacional definidos.

5.10. ENERGÍA OPERACIONAL DEL EDIFICIO

La energía operacional del edificio se calculó como la suma de la energía provista por las diferentes fuentes identificadas: eléctrica, gas licuado y leña.

5.10.1. Energía operacional eléctrica

La energía eléctrica operacional se calculó sumando los consumos parciales de las viviendas y el de los espacios comunes, y dividiendo el total entre los años de utilización. Los consumos se obtuvieron de la lectura de los medidores correspondientes.

Con respecto al tiempo de utilización, se consultó a la comisión administradora del edificio. Al tratarse de una cooperativa, los destinatarios fueron los promotores de la obra, y estaban esperando su culminación para ocuparla. Por ello, la ocupación del edificio se produjo en un lapso breve de tiempo, durante el mes de noviembre del año 2006. Es decir que los medidores

de energía eléctrica fueron colocados en dicho período, y su lectura actual responde al valor acumulado de energía consumida desde su colocación hasta la fecha de toma de medición.

El valor calculado, correspondiente a energía entregada, se corrigió por el REE calculado para la energía eléctrica.

5.10.2. Energía operacional por gas licuado de petróleo

A fin de obtener información sobre otras fuentes de energía, se realizó una encuesta a los moradores del edificio (ver apéndice 2). Dado que el número de viviendas era abarcable (41 unidades), no se realizó un muestreo sino que se hizo extensiva a todos los aptos. La encuesta se ejecutó en forma presencial y oral para la mayoría de los casos (33), dejándose por escrito en las unidades en las que no se halló a los ocupantes (7). Una unidad está actualmente vacía.

La forma de estimación de consumo solicitada en la encuesta para el gas licuado, comúnmente denominado supergás, fue la duración promedio de la garrafa de 13 kg, que es el recipiente estándar en plaza para su comercialización a nivel residencial.

5.10.3. Otras fuentes de energía operacional

En la encuesta se solicitó información sobre otras fuentes de energía. Asimismo, se consultó a la comisión administradora del edificio sobre el parrillero común, para obtener datos del consumo de leña promedio.

5.11. ENERGÍA OPERACIONAL DE TRANSPORTE EN VEHÍCULO PROPIO

A fin de obtener un parámetro de comparación para la energía incorporada calculada que estuviera fuera del ámbito de la construcción, en la encuesta informada en el ítem 5.6.2 se inquirió sobre el consumo de nafta o gasoil para transporte de los habitantes. La información solicitada se limitó a los usuarios con vehículo propio y al consumo de combustible. No se solicitó información sobre las características de los vehículos, sobre la utilización de vehículos empresariales, ni sobre la utilización de transporte colectivo.

Sobre el total de cuarenta unidades ocupadas actualmente, se consiguieron datos de treinta y siete. De éstas, dieciocho, es decir el 48,65% manifestaron no tener vehículo. De las

diecinueve unidades cuyos propietarios manifiestan tener vehículo (51,35%), en todos los casos plantearon poseer un solo vehículo. A su vez, de estos vehículos, dieciséis (84,21%) eran a nafta y tres (15,79%) a gasoil.

Con respecto al consumo, se obtuvieron datos de dieciocho de las diecinueve unidades, ya que en un caso, el vehículo era recién adquirido y no tenían estimaciones de consumo. Los datos de consumo fueron recabados de dos formas: 1) a través del kilometraje anual y del rendimiento promedio del vehículo; 2) a través del dinero utilizado mensualmente para adquirir combustible. En el primer caso se dividió el kilometraje por el rendimiento para obtener la cantidad de litros anuales. En el segundo caso se dividió la cantidad gastada en combustible por el precio del combustible correspondiente, y se multiplicó por doce, para obtener la cantidad de litros anuales. En ambos casos se multiplicó la cantidad de litros anuales por el valor calorífico inferior del combustible correspondiente. Finalmente se corrigió el valor de energía secundaria por el requisito energético de energía determinado en este trabajo para los combustibles derivados del petróleo.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de energía incorporada en materiales, en agua, en pérdidas, en transporte, en obra, y total. Seguidamente se plantean los valores obtenidos para los parámetros de energía operacional definidos, energía operacional del edificio y energía operacional de transporte en vehículo propio. Por último se presentan los análisis comparativos de la energía incorporada de las soluciones constructivas alternativas propuestas para el edificio.

6.1. ENERGÍA INCORPORADA EN MATERIALES

En la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos para la energía incorporada en los materiales de obra, por rubro de obra, y se grafica su incidencia relativa (figura 42). Posteriormente se analiza cada ítem.

Tabla 16 - Energía incorporada por rubro de obra

Ítem		Energía (MJ) s/p	Energía (MJ) c/p
Estructura	Fundaciones	Pilotes	208980,00 305992,40
		Cabezales	251197,74 309672,06
		Vigas de cimentación	250677,10 337044,35
	Total Fundaciones		952708,81
	Estructura	Losas	1810115,00 1982075,93
		Vigas	365935,00 400698,83
		Pilares	979062,50 1072073,44
		Escaleras	43195,00 47298,53
		Tanque	76545,00 83816,78
	Total Estructura		3585963,49
Albañilería	Muros	Divisorios	274022,90 422538,29
		Interiores	1318422,18 2037294,75
		Ext c/int	444773,40 687287,07
		Med c/int	403327,20 623242,24
		Med. c/ext	786053,88 1173603,54
		Fach. c/ext.	706011,84 1054098,22
		Ext simple	80387,07 124218,30
		Submuraciones	53000,07 81838,94
		ext c/int yeso	5773,87 5773,87
	Total Muros		6209895,20
	Revoques	muros	601237,16 918716,02
		cielorrasos	271372,73 414622,99
	Total Revoques		1333339,02
	Contrapisos		91345,40 155567,27
	Total Contrapisos		155567,27
	Pisos	Baldosa cerámica	347120,52 459157,83
		Arena y portland	14084,17 24130,64
		Baldosa cemento	6969,31 9708,57
		Zócalos	36460,87 38826,40
	Total Pisos		531823,44
Revestimientos	Baldosa cerámica	81144,00 92504,16	
	Zóc. Ducha	1151,28 1151,28	
	Mesadas	46757,42 46757,42	
Total Revestimientos		140412,86	
Hormigón no estructural	Dinteles	41925,00 45907,88	
	Carreras	47945,00 52499,78	
	Pretilos	55282,50 60810,75	
	Compl/terrazas	30306,94 33186,10	
Total Hormigón no estructural		192404,50	
Aberturas	Aberturas	Aluminio	348637,03 348637,03
		Hierro	160790,82 160790,82
		Madera	110361,69 105040,09
		Vidrio	91908,75 91908,75
		Cortinas de enrollar	255233,47 255233,47
Total Aberturas		961610,15	
Protecciones	Impermeabilizaciones	impermeabilización	202132,49 214131,49
	Total Impermeabilizaciones		214131,49
	Pinturas	base agua	207779,52 239569,79
base solvente		47210,31 54433,48	
Total Pinturas		294003,28	
Instalaciones	Sanitaria	Artefactos	189284,50 189284,50
		Grifería	29067,13 29067,13
		Abastecimiento	84033,46 96265,36
		Desagües	208365,71 239848,43
	Total Sanitaria		554465,42
	Eléctrica	Conductores	58672,05 72671,35
Canalizaciones		70731,00 70731,00	
Terminaciones		50400,00 50400,00	
Total Eléctrica		193802,35	
Total general		11845189,98	15320127,27

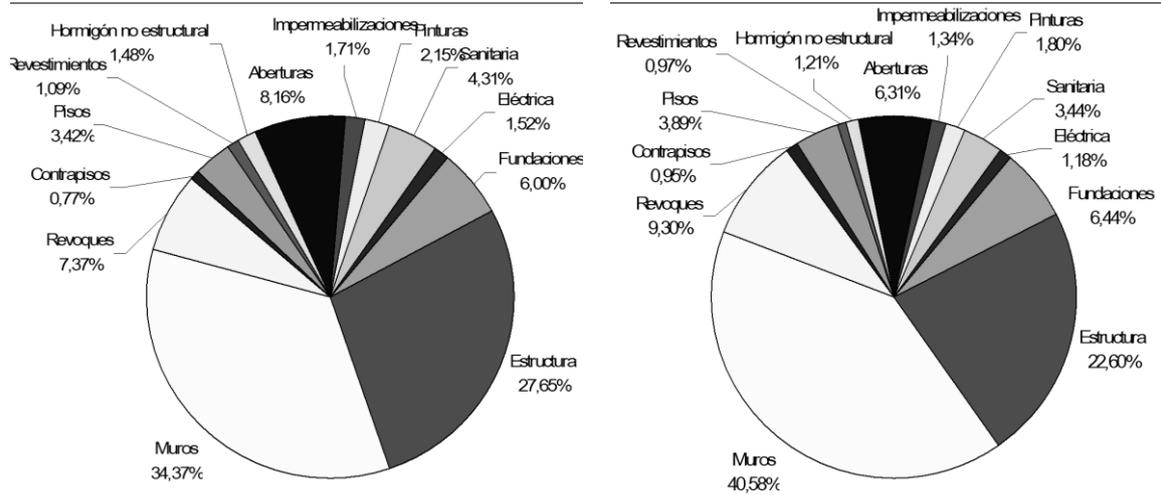


Figura 42 - Energía incorporada total - incidencia relativa por rubro s/pérdidas y c/pérdidas

6.1.1. Estructura

El hormigón estructural, incluyendo las fundaciones representa el 33,65% de la energía incorporada en materiales sin considerar las pérdidas, y el 29,04% considerándolas. A su vez, las losas constituyen el 46% del hormigón estructural, en un sistema de losas sin vigas (vigas perimetrales) (figura 43).

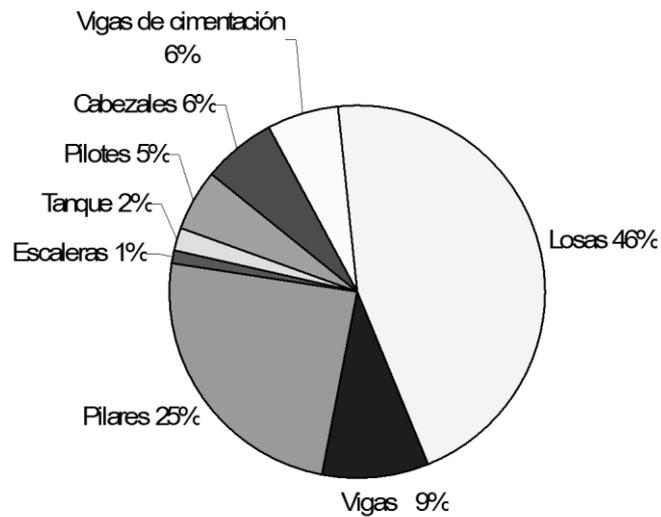


Figura 43 - Energía incorporada del hormigón estructural. Incidencia relativa por elemento

6.1.2. Albañilería

6.1.2.1. Muros

Los muros constituyen el ítem más significativo en energía incorporada, con un 34,47% sin considerar las pérdidas y un 40,58% considerándolas.

Se presentan incidencias relativas según tipo de muro, y de caras simples según posición relativa (figura 44).

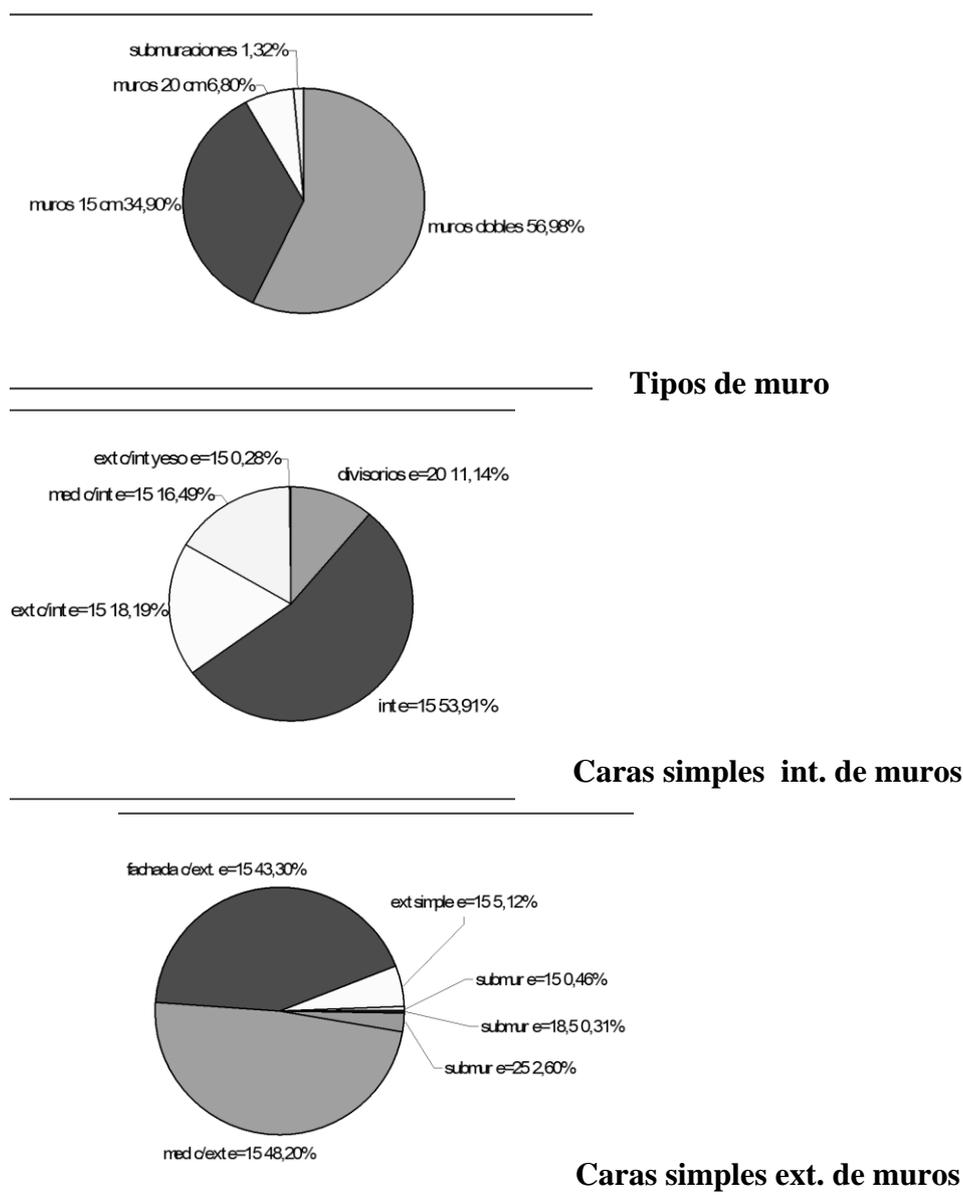


Figura 44 - incidencia relativa de muros por tipo

Debe aclararse que el grupo “caras simples interiores de muros” incluye, además de los tabiques internos y de los tabiques divisorios entre unidades, la cara interior de los muros dobles exteriores correspondientes a fachadas y medianeras.

6.1.2.2. Índice energético del ladrillo

Dada la relevancia de los resultados obtenidos para los muros en la energía incorporada total, se revisó el valor adoptado de intensidad energética del ladrillo con otras referencias extraídas de la bibliografía. Gumaste (2006) propone un valor de 5MJ/kg. Con más detalle, Manfredini y Sattler (2005) elaboran una lista de referencias (ver tabla 17).

Tabla 17 - Energía incorporada en ladrillos y bloques cerámicos

Referencia	Origen	MJ/kg
Lawson (1996)	Australia	2,50
Cole & Rousseau (1992)*	Canadá	4,90
Cole & Rousseau (1992)*	Suiza	3,10
Alcorn & Baird (1996)*	Nueva Zelanda	2,50
Worrell <i>et al.</i> (1994)*	Holanda/Oeste Europeu	3,00
Szokolay (1997)	Australia	3,60 - 4,32
Visvesvaraya (1987)*	No conocido	4,30
Construction... (1996)*	Holanda	2,00 - 7,00
Tapia <i>et al.</i> (2000)	Europa	1,05 - 1,26
Brasil (1982)*	Brasil	3,09
Guimarães (1985)*	Brasil	3,13
SUDENE/ITEP (1988)	Pernambuco - Brasil	1,86 - 2,80
Tapia <i>et al.</i> (2000)	Brasil	2,09 - 3,35
Tapia <i>et al.</i> (2000)	Rio de Janeiro - Brasil Cerâmica Argibem Ltda	1,78 - 2,76
Tapia <i>et al.</i> (2000)	Rio de Janeiro - Brasil RP Pesanha Cerâmica	1,08 - 1,37
Tapia <i>et al.</i> (2000)	Rio de Janeiro - Brasil Tijolar Indústrias CerâmicasLtda	1,78 - 2,00

(fuente: Manfredini y Sattler 2005)

El estudio referido arriba luego de la investigación a un valor medio ponderado de 2,82 MJ/kg. Comparando estos datos, se observa que no existen mayores diferencias con los propuestos por el ICE, base principal utilizada en el presente estudio, y que el rango de valores es amplio.

En las figuras 45 y 46 se grafican las cantidades de materiales según el tipo de muro considerado.

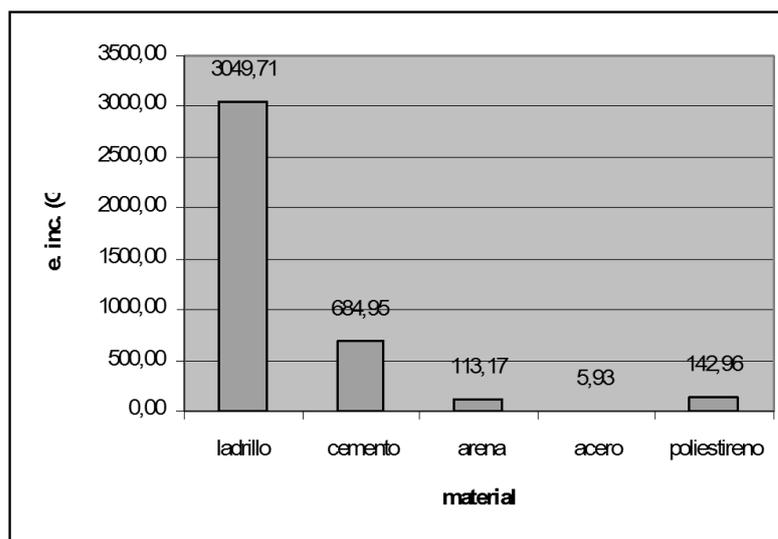


Figura 45 - Incidencia de materiales en muros dobles

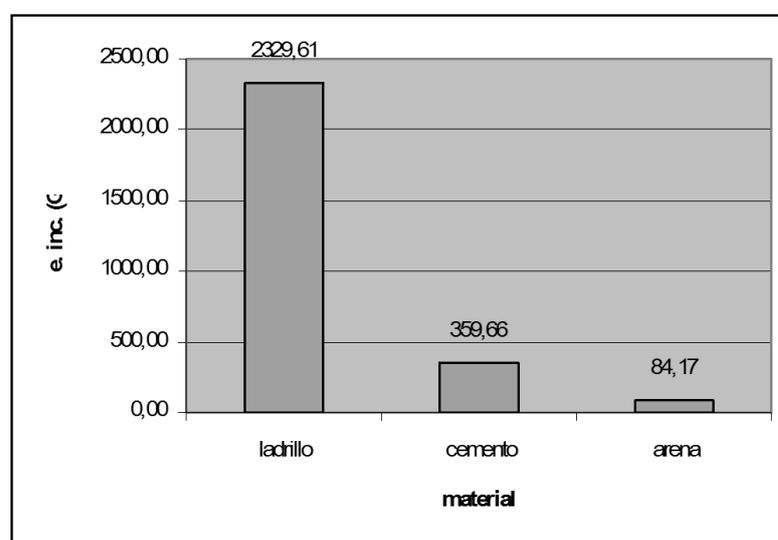


Figura 46 - Incidencia de materiales en muros simples

6.1.2.3.Revoques

En tercer lugar en orden de importancia relativa, con un 10,16%, se encuentran los revoques. Esta categoría incluye revoque con hidrófugo de muros, terminación gruesa y fina en muros exteriores e interiores, azotada, gruesa y fina de cielorrasos (figura 47).

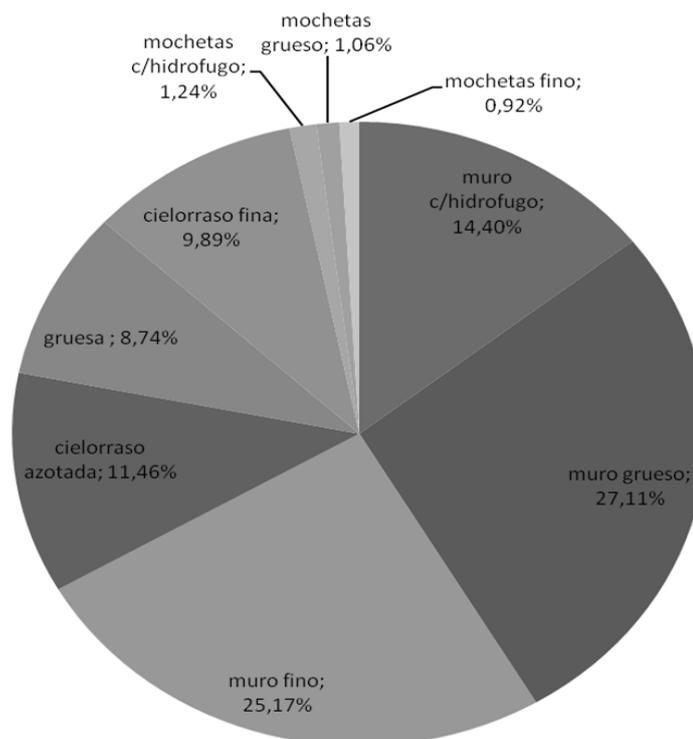


Figura 47 - energía incorporada en revoques. Incidencia relativa por tipo

6.1.3. Aberturas

La base por defecto para la obtención de índices energéticos de materiales fue el Inventory of Carbon and Energy. Sin embargo, para el caso del aluminio la base proponía dos valores muy diferentes para aluminio primario o secundario (elaborado con aluminio reciclado). Para conocer el porcentaje de aluminio secundario en Uruguay, se entrevistó un técnico de la principal empresa nacional de fabricación de perfilería de aluminio. A partir de esta información, se calculó un índice energético específico para el aluminio (ver tabla 18).

Tabla 18 - Porcentaje de aluminio primario y secundario

Tipo de aluminio	índice energético ICE (MJ/kg)	Incidencia relativa	Índice energético ponderado (MJ/kg)
primario	213,5	60%	128,1
secundario	34,1	40%	13,64
			141,74

En la entrevista también se indagó sobre los combustibles utilizados. Sin embargo, a pesar de que se proporcionaron datos de energía por tonelada de producto de aluminio secundario (tabla 19), no se dispuso de información sobre la metodología con que se obtuvieron dichos datos, ni qué procesos están considerados y cuáles no. Por tanto, se optó por trabajar con los valores manejados por el ICE.

Tabla 19 - Combustibles utilizados en aluminio secundario (datos de empresa encuestada)

tipo de energía	Energía por tonelada de producto	unidad	equivalencias en MJ	cantidad en MJ/ton	corrección por REE	MJ/kg
electricidad	2500	kwh	3,6	9000	1,89	17,01
fuel oil	150	lts	38,77	5699,19	1,1	6,27
						23,28

Las aberturas en general, incluyendo elementos de aluminio, hierro, madera, vidrios, suman un 8,16% y 6,31% de la energía incorporada total, en el primer caso sin considerar pérdidas de materiales, haciéndolo en el segundo. Sin embargo esta incidencia está subvaluada en dos aspectos:

- a) por un lado, al no considerar la energía incorporada en los procesos intermedios de fabricación de componentes. En el caso de las aberturas de aluminio, se toma el peso en aluminio de la abertura y se lo multiplica por el índice energético del perfil de aluminio. Está ausente por tanto el transporte del aluminio a la fábrica de aberturas y la energía directa para cortar, armar, estoquear las aberturas, así como la indirecta de la fábrica para su funcionamiento y el porcentaje de la energía en equipos de capital incorporado a la abertura.
- b) Por otro lado, las consideraciones de las pérdidas fueron realizadas para los elementos que sufren procesos de transformación en obra (arena, cemento, hormigón, ladrillos, cerámicas, etc.), no para los componentes que ya vienen listos para su colocación. Las pérdidas en el caso de estos componentes están en los procesos de fabricación de los mismos y como se dijo en el punto anterior, estos procesos no fueron contemplados en el presente estudio.

Al realizar el análisis sin considerar las pérdidas en ningún rubro de obra, el porcentaje de incidencia de las aberturas aumenta a un 8,12%, Además de los dos aspectos señalados, en la

discriminación de rubros realizada se contabiliza separadamente la pintura, aunque forma parte del sistema de la abertura.

La distribución según los materiales utilizados se muestra en la figura 48.

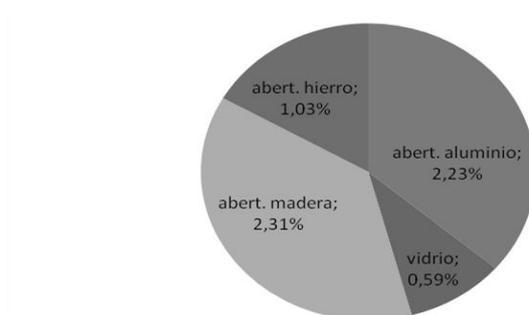


Figura 48 - incidencia de aberturas por material

6.1.4. Protecciones

La pintura significó un 2,15% de la energía incorporada total sin contar pérdidas y un 1,80% contabilizando las mismas (figura 49).

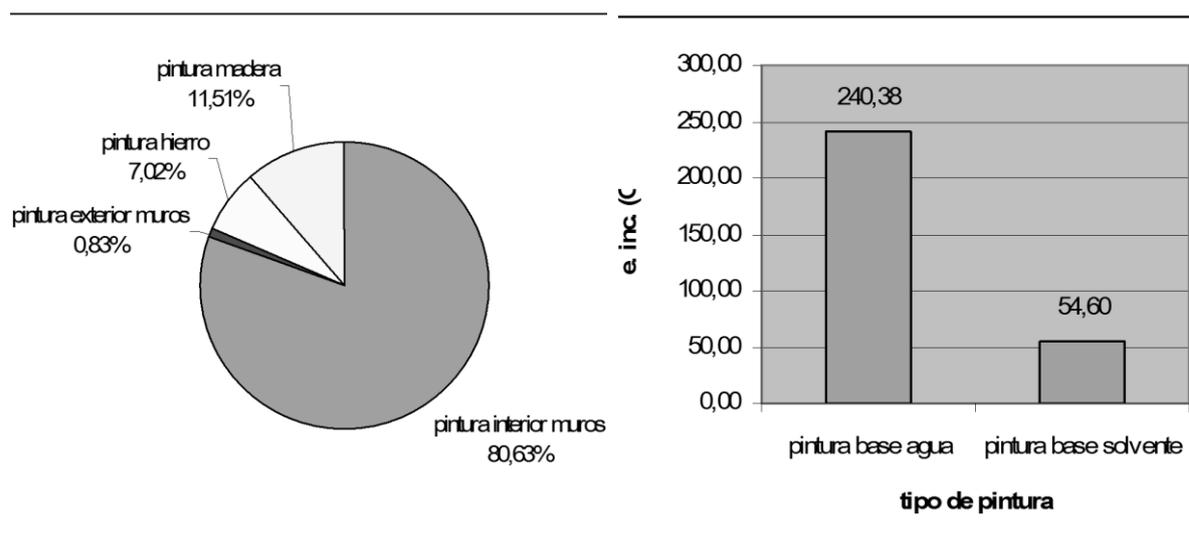


Figura 49 - incidencia pinturas

Las impermeabilizaciones, significaron el 1,34% de la energía incorporada en materiales con pérdidas y 1,71% sin pérdidas.

6.1.5. Instalaciones

6.1.5.1. Instalación sanitaria

Los elementos calculados para la instalación sanitaria incluyen las secciones de caño de los diámetros correspondientes tanto de agua corriente como de desagüe, los aparatos sanitarios, el cemento blanco, los aparatos y accesorios sanitarios y la grifería. No incluyen en cambio las piezas de unión de las cañerías, el mortero necesario para el amure de la cañería, ni el sistema de bombeo de agua. Tampoco están incluidos los medidores de consumo correspondientes, ni el adhesivo para los caños. La energía incorporada por los materiales calculados para esta instalación es de 554593,01 MJ, equivalente a un 3,29% de la energía incorporada inicial total (figura 50).

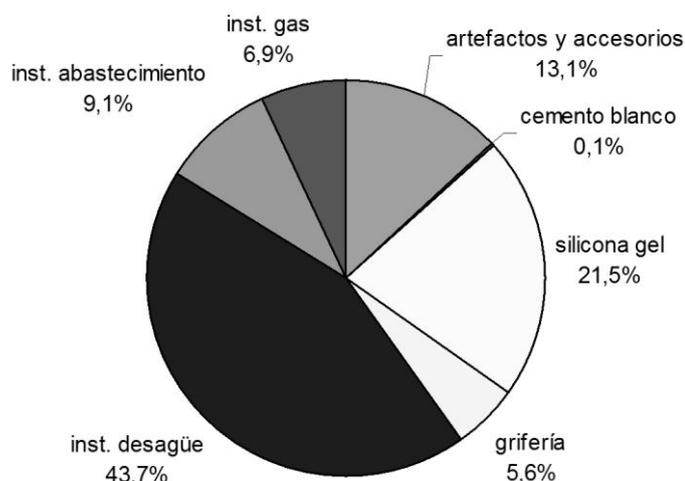


Figura 50 - Componentes y materiales de instalación sanitaria

6.1.5.2. Instalación eléctrica

La instalación eléctrica incluye el cableado, las canalizaciones, la instalación de puesta a tierra y las terminaciones (figura 51). No se incluyeron la instalación del ascensor, la instalación de la iluminación común, los medidores de consumo, los puntos de inspección, las cámaras subterráneas, las llaves térmicas y diferenciales, los tableros, ni el material para amure de elementos. La energía incorporada en materiales de instalación eléctrica calculados es de 191418,00 MJ, es decir un 1,13% de la energía calculada total.

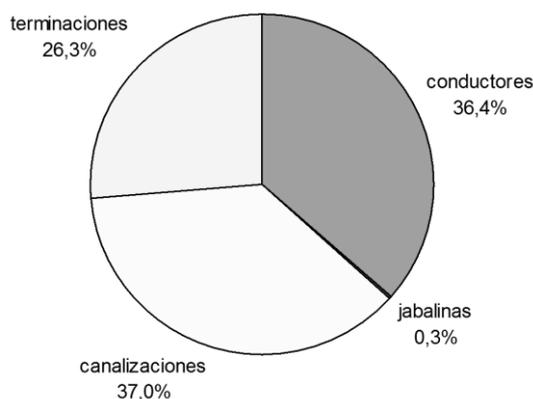


Figura 51 - Incidencia de los componentes de la instalación eléctrica

6.1.6. Energía incorporada en el agua

En función de la dificultad planteada con el índice energético para el agua propuesto por el Inventory of Carbon and Energy (HAMMOND y JONES, 2009), de 0,20 MJ/kg, se estimó una intensidad energética alternativa en base a datos del reporte Water UK Sustainability Indicators 2009-2010 (tabla 20).

Tabla 20 - Cálculo del índice energético del agua con datos del Water UK, 2010

consumo total de energía	agua elevada total	energía/litro=energía/kg
9012 Gwh/año	17261 MJ/año	0,00515 MJ/kg
3,24E+10 Mlitro/día	6,30027E+12 litros/año	

Con el índice energético calculado y con el índice propuesto por el Inventory of Carbon and Energy se calculan valores alternativos para la energía incorporada en el agua; y el volumen de agua es corregido por el indicador de agua no contabilizada de OSE, según se muestra en la tabla 21.

Tabla 21 - Cálculo de la energía incorporada en el agua

agua consumida (m3)	agua elevada (m3)	índice energético (MJ/kg)	fuelle	energía incorporada tota (MJ)
612	1297	0,2	Hammond y Jones, 2008	259400,00
		0,00515	Water UK, 2010	6679,55

Debido a lo fundamentado en el punto 5.7.1.4., se optó por el segundo valor calculado.

6.2. ENERGÍA INCORPORADA EN LAS PÉRDIDAS DE MATERIALES

Una porción significativa de la energía incorporada en materiales corresponde a pérdidas. La metodología utilizada para el cálculo permitió discriminar el monto de la energía incorporada referida. El valor por pérdidas promedio calculado para todos los materiales considerados, asciende a 3:651.240,00 MJ, lo que equivale al 30,51% de la energía incorporada en los materiales calculados a metrajes nominales. El monto calculado con la mediana es algo mayor, de 3:750.172,78 MJ, es decir un 31,33% respecto al monto según metrajes nominales de materiales.

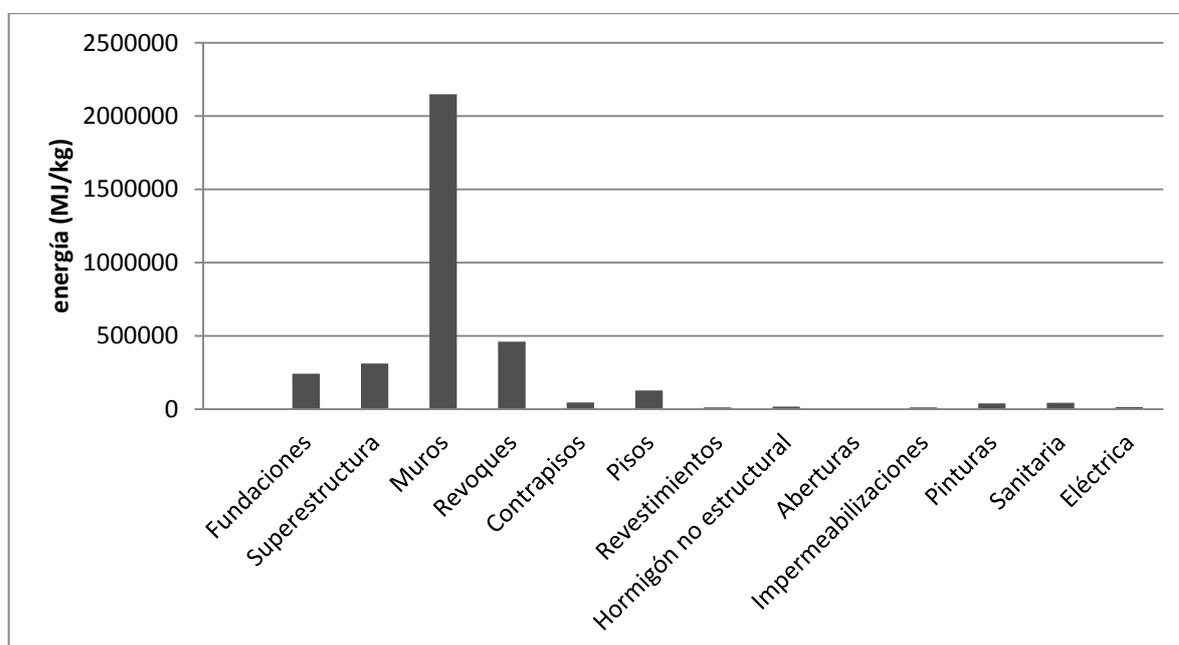


Figura 52 - Distribución de la energía incorporada por pérdidas de materiales

La figura 52 ilustra la distribución de las pérdidas ente los diferentes ítems de la obra.

Se observa una distribución desigual de los montos de pérdidas entre los diferentes ítems de obra. Por ello se realiza una comparación de la distribución de la energía incorporada en los diferentes ítems considerando y no considerando la energía incorporada debida a pérdidas de materiales, pero manteniendo la energía debida a los materiales y al transporte (figura 53).

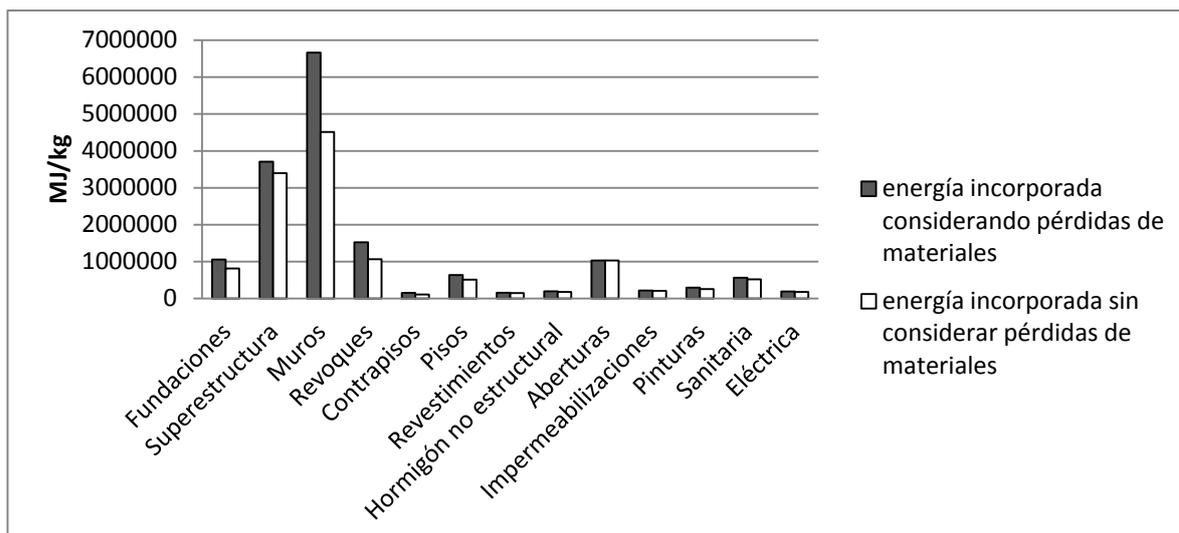


Figura 53 - Comparación de distribución de la energía incorporada en materiales con y sin pérdidas

En la tabla 22 se observa la importancia relativa de las pérdidas en materiales según rubro de obra, comparando su incidencia relativa en el total contabilizando y no contabilizando las pérdidas, sin considerar la variable del transporte.

Tabla 22 - energía incorporada por rubro con y sin considerar pérdidas de materiales.

ítem de obra	Incidencia incluyendo pérdidas	Incidencia sin incluir pérdidas
. Fundaciones	6,22%	6,00%
. Estructura	23,41%	27,64%
. Muros	40,53%	34,27%
. Revoques	8,70%	7,37%
. Contrapisos	1,02%	0,93%
. Pisos	3,47%	3,42%
. Revestimientos	0,92%	1,09%
. Hormigón no estr.	1,26%	1,48%
. Aberturas	6,28%	8,12%
Impermeabilizac.	1,40%	1,71%
. Pinturas	1,92%	2,15%
. Sanitaria	3,62%	4,31%
. Eléctrica	1,27%	1,52%

6.3. ENERGÍA INCORPORADA EN EL TRANSPORTE

6.3.1. Costos energéticos de transporte por material

En base a la metodología reseñada, se elaboró una tabla para calcular el costo energético por kilogramo de material (tabla 23).

Tabla 23 – índices energéticos de transporte de materiales

MATERIAL	origen	proveedor	dist 1	sist. de transporte1	MJ/ton km	dist. 2	sist. de transporte. 2	MJ/ton km	MJ/kg
Acero barra	Montevideo	gerdau laisa	14	camiones rígidos	2,5				0,035
Acero chapa	puerto Madryn	arcelormital	1237,136	carguero a granel	0,4				0,495
Acero inox	puerto Madryn	arcelormital	1237,136	carguero a granel	0,4				0,495
Aglomerado	concordia	masisa	526	camiones artic.	1				0,526
Alambre	San Pablo		1560	camiones artic.	1				1,560
Aluminio	ver tabla auxiliar	alum. Del ur.	0,00	camiones artic.	1				1,748
Arena	Santa Lucía	barr. Aguirre	50	camiones rígidos	2,5				0,125
Artefactos sanitarios	San Pablo	Deca	1560	camiones artic.	1				1,560
Baldosa cemento	Montevideo		15	camiones rígidos	2,5				0,038
Baldosa ceramica	Florianópolis	Portobello	1360	camiones artic.	1				1,360
Cal	Minas	barr. Aguirre	122	camiones rígidos	2,5				0,305
Canalizaciones pvc	Montevideo	Neigarsan	6	utilitarios	20				0,120
caño hierro	San Pablo	Hierrosur	1560	camiones artic.	1				1,560
Caño pvc	Buenos Aires		562	camiones artic.	1				0,562
Caño termofusion	Buenos Aires	Petrokén	562	camiones artic.	1				0,562
Cedriño	Cuiabá	Barr. Gabycar	2151	camiones artic.	1				2,151
Cemento	Minas/Paysandu	ancap	250	camiones rígidos	2,5				0,625
Cemento blanco	Minas/Paysandu	ancap	250	camiones rígidos	2,5				0,625
Conductores	Buenos Aires		562	camiones artic.	1				0,562
Cort. Pvc	Montevideo	Facerplast	10	camiones rígidos	2,5				0,025
Emulsion asfaltica	La Plata		621	camiones artic.	1				0,621
Enchapado	concordia	masisa	526	camiones artic.	1				0,526
Eucaliptus	Rivera		501	camiones artic.	1				0,501
Goma	Buenos Aires		562	camiones artic.	1				0,562
Granito	Villa del soto		876	camiones artic.	1				0,876

MATERIAL	origen	proveedor	dist 1	sist. de transporte1	MJ/ton km	dist. 2	sist. de transporte. 2	MJ/ton km	MJ/kg
Grifería	Shangai		20494,23	carguero a granel	0,4				8,198
Guillerm. 2cm	concordia	masisa	526	camiones artic.	1				0,526
Herrajes	Buenos Aires		562	camiones artic.	1				0,562
hidrófugo	Buenos Aires	ceresita	562	camiones artic.	1				0,562
Hormigon premezcl.	Montevideo		25	camiones rígidos	2,5				0,063
Jabalinas	Buenos Aires		562	camiones artic.	1				0,562
Ladrillo	Pando/J. Lacaze		53,6	camiones rígidos	2,5				0,134
Lana mineral	Montevideo	marbex	10	utilitarios	20				0,200
Lana de vidrio	Montevideo	marbex	10	utilitarios	20				0,200
Malla acero 20x20x3	Montevideo	gerdau laisa	14	camiones rígidos	2,5				0,035
Mdf	concordia		526	camiones artic.	1				0,526
Membrana	La Plata	Emapi	621	camiones artic.	1				0,621
Pedregullo	Las Piedras	barr. Aguirre	30	camiones rígidos	2,5				0,075
Perfil I 1 1/4"	usti nad labem	Hierrosur	12032,44	carguero a granel	0,4	450	camiones artic.	1	5,263
Perfil I 1 1/4"	usti nad labem	Hierrosur	12032,44	carguero a granel	0,4	450	camiones artic.	1	5,263
Perfil I 45mm	usti nad labem	Hierrosur	12032,44	carguero a granel	0,4	450	camiones artic.	1	5,263
Perfil u 33mm	usti nad labem	Hierrosur	12032,44	carguero a granel	0,4	450	camiones artic.	1	5,263
Pino brasil	Belo Horizonte	Gabycar	2070	camiones artic.	1				2,070
Pintura base agua	Montevideo		15	utilitarios	20				0,300
Pintura base solvente	Montevideo		15	utilitarios	20				0,300
Placa de yeso	Gral Acha		714	camiones artic.	1				0,714
Poliestireno exp	Montevideo	alley	20	camiones rígidos	2,5				0,050
Poliétileno	Villa Rodríguez	incoplast	80	camiones rígidos	2,5				0,200
Poliuretano	hamburgo	sika	12032,44	carguero a granel	0,4				4,813
Silicona	hamburgo	sika	12032,44	carguero a granel	0,4				4,813
Terminaciones eléctrica	Montevideo	Molveno	25	camiones rígidos	2,5				0,063
Ticholo	Libertad		51	camiones rígidos	2,5				0,128
Vidrio	Qingdao		20905,38	carguero a granel	0,4				8,362
herrajes 2	Shangai		20494,23	carguero a granel	0,4				8,198
caño hg	Buenos Aires		562	camiones artic.	1				0,562

6.3.2. Energía incorporada en transporte de materiales

La energía incorporada en transporte de materiales calculada de acuerdo a los parámetros señalados *ut supra*, fue de 1110473,59 MJ (figura 54). Este valor representa el 6,65% de la energía incorporada inicial calculada para el edificio en estudio.

Se analiza a continuación la incidencia relativa del transporte por ítem de obra en la energía incorporada total de transporte, y la incidencia en la energía incorporada total del ítem.

ítem de obra	Energía transporte (MJ)	Incidencia relativa
. Fundaciones	104263,22	9,39%
. Estructura	124317,19	11,19%
. Muros	452199,99	40,72%
. Revoques	193354,54	17,41%
. Contrapisos	18931,90	1,70%
. Pisos	107125,13	9,65%
. Revestimientos	18068,75	1,63%
. Hormigón no estructural	5853,80	0,53%
. Aberturas	68579,27	6,18%
. Impermeabilizaciones	6270,43	0,56%
. Pinturas	978,56	0,09%
. Sanitaria	9924,67	0,89%
. Eléctrica	606,13	0,05%
TOTAL	1110473,59	

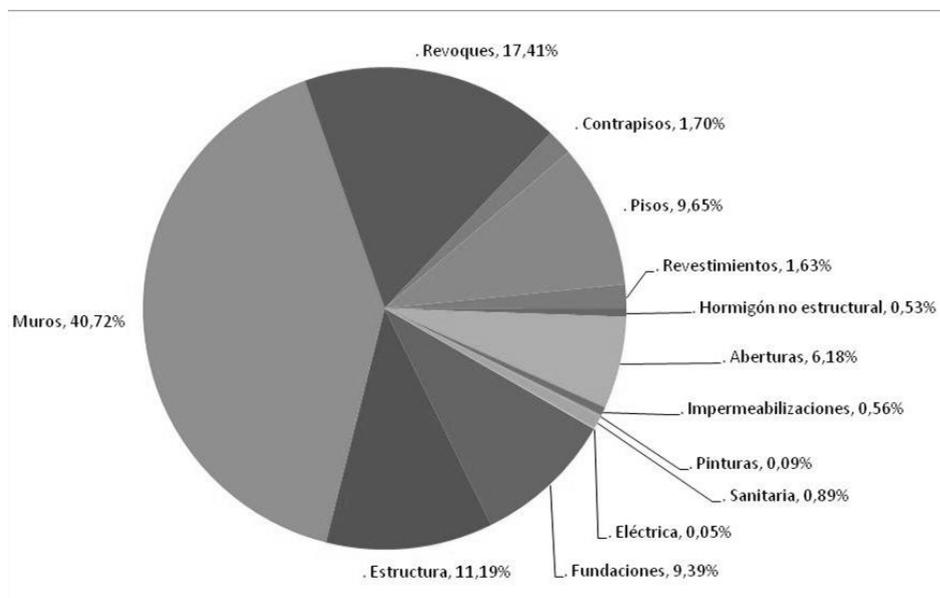


Figura 54 - Incidencia relativa de cada ítem en la energía incorporada por transporte de materiales

La incidencia del transporte en el hormigón varía en forma significativa si se calcula hormigón realizado en obra u hormigón premezclado. En el primero presenta una incidencia aproximada del 10%, dependiendo de la dosificación. Para el segundo, en cambio, es del orden del 3%. La razón de esta diferencia es doble: por un lado, el transporte de materiales a la planta de premezclado implica que la mayor carga debida al transporte esté ya incorporada en el dato de intensidad energética del hormigón premezclado, siendo menor la incidencia del transporte del hormigón preparado, desde la planta a la obra. Por tanto, el dato de intensidad energética del hormigón será mayor, y la incidencia del transporte de planta a obra, en términos relativos, aún menor.

El material que presenta una mayor incidencia relativa del transporte respecto a su intensidad energética es el vidrio, con un 35,79%, debido a su procedencia china. Sin embargo no tiene incidencia significativa en el valor de energía incorporada total.

En cambio, la incidencia del transporte en los materiales de los muros, que está en el orden del 6,8% respecto a la carga total del rubro, es del 40,72% de la carga total debida al transporte.

6.4. ENERGÍA UTILIZADA EN OBRA

6.4.1. Determinación de requerimientos energéticos de energía

6.4.1.1. Combustibles fósiles

De acuerdo a lo expresado en la metodología, se tomó un factor de energía primaria para combustibles fósiles es de 1.1 GJ/GJ (SAP, 2005).

6.4.1.2. Energía eléctrica

El requerimiento energético de energía para la electricidad se calculó ponderando las diversas fuentes de energía primaria. Los insumos de energía se resaltan en la tabla 24, realizada a partir de la matriz energética nacional. Los insumos de energía secundaria fueron corregidos por su correspondiente factor de energía primaria.

El REE para la electricidad así calculado es de 1,89 GJ/GJ.

Tabla 24 - Electricidad: insumos energéticos y producción de energía a nivel nacional

BALANCE ENERGÉTICO 2009 ktep	energía primaria					energía secundaria			
	gas natural	hidro- energía	eólica	leña	residuos biomasa	total	gas oil	fuel oil	electricidad
centr. hidr./eólicas serv. público		-506,9	-10,3			517,2			448,4
centr. térm. serv. público	-4,1				-20,2	-24,3	-477,7	-234,6	240,9
centr. eléct. autoproducción				-0,6	-89,3	-89,9	-0,4	-4,7	65,6
Producción									754,9

(fuente: matriz energética nacional 2009)

6.4.2. Energía incorporada en obra

La energía incorporada se analizó por fuente. Se identificó la utilización de energía eléctrica y de derivados del petróleo.

6.4.2.1. Energía eléctrica

En la tabla 25 se consigna el valor de la energía eléctrica incorporada directa, en términos de energía primaria.

Tabla 25 - Energía incorporada directa (eléctrica)

acumulado según facturas	Prorratio mensual	Total período de obra	Corrección energía primaria
14244 KWh	7498,68 KWh	97159,07 MJ	183630,65 MJ

6.4.2.2. Combustibles fósiles

Se señalan en la tabla 26 las tareas de obra identificadas con demanda de combustibles derivados del petróleo, y la energía incorporada directa derivada de las mismas, en términos de energía primaria.

Tabla 26 - Energía incorporada directa (derivados del petróleo)

tarea	equipo	combust.	consumo	rend.	cantidad	total	P.C.I	Energía (MJ)	Energía primaria (MJ)
bombeo hormigón	camión bomba	gasoil	0,67 lts/m ³		816 m ³	547 lts	35,8 MJ/lt	19582,6	19582,6
pilotaje	pilotea	gasoil	100 lts/jorn.	40 m/jorn.	43 pilotes 5 m	537,5lts	35,8 MJ/lt	19690	21659
transporte volquetas	camión	gasoil	0,30 lt/km	20 km/viaje	130 volquetas	780 lts	35,8 MJ/lt	27924	30716,4
colocación membrana	sopletes	GLP	0,11 kg/m ²		327 m ²	36 kg	45,8 MJ/kg	1648,8	1813,68
<i>Total energía en comustibles fósiles</i>									73771,68

6.4.2.3.Total incorporado en obra

La energía incorporada total en obra es:

Tabla 27 - Energía incorporada directa

Electricidad	183630,65 MJ
Combustibles fósiles	73771,68 MJ
Energía en obra total	257402,33 MJ

En la modelización, se asumió que ciertos rubros de obra fueron concluidos en el transcurso de la misma, cuando en la realidad quedaron parcialmente pendientes y fueron ejecutados en etapas posteriores (revoques, pisos, aberturas interiores, etc.). Dicha hipótesis se usó solamente para determinar la cantidad de materiales involucrados. No se utilizó en cambio para estimar un impacto adicional en la energía incorporada en obra. La energía utilizada para realizar dichos trabajos se encuentra seguramente presente en la energía consumida por el edificio en etapas posteriores y por lo tanto está considerada dentro de la energía de operación.

6.5. ENERGÍA INCORPORADA INICIAL TOTAL

En base a los valores calculados de energía incorporada en materiales –incluyendo pérdidas-, en transporte y en obra, se calculó la energía incorporada total, y la incidencia relativa de cada uno de estos aspectos, según se muestra en la tabla 28.

Tabla 28 - Energía incorporada inicial total

	<i>Energía (GJ)</i>	<i>Incidencia relativa</i>
Materiales	15356,55	91,64%
Agua	6,68	0,04%
Transporte	1137,43	6,79%
Energía en obra	257,40	1,54%
<i>Energía incorporada inicial total</i>	16758,06 GJ	

6.5.1. Energía incorporada inicial por metro cuadrado

Energía incorporada por vivienda prorrateando áreas

Tomando el metraje cubierto total, la energía incorporada inicial calculada por metro cuadrado es de 6,012 GJ. Si se considera el área propia de viviendas, el valor por metro cuadrado asciende a 8,66 GJ.

6.5.2. Comparación con estructura de costo monetario

Se realizó una comparación esquemática entre el costo energético y el costo monetario de los diferentes rubros de la obra, en términos de incidencia relativa en cada uno de ellos. Para ello se tomaron los ítems del presupuesto de obra correspondientes a los rubros de obra en que se analizó la energía incorporada. Se sumó el costo total de dichos ítems en el presupuesto y se tomó dicho valor como total (figura 55). Quedaron fuera por tanto trabajos preliminares y gastos de conexiones. Se calculó la incidencia de cada uno de los ítems respecto a dicho valor total y se comparó con la correspondiente incidencia en la energía incorporada. Como fue realizado en base a una estructura de costos realizada previamente a la obra, no contempla las modificaciones realizadas en obra y tampoco están reflejadas las modificaciones implementadas en la modelización del presente estudio.

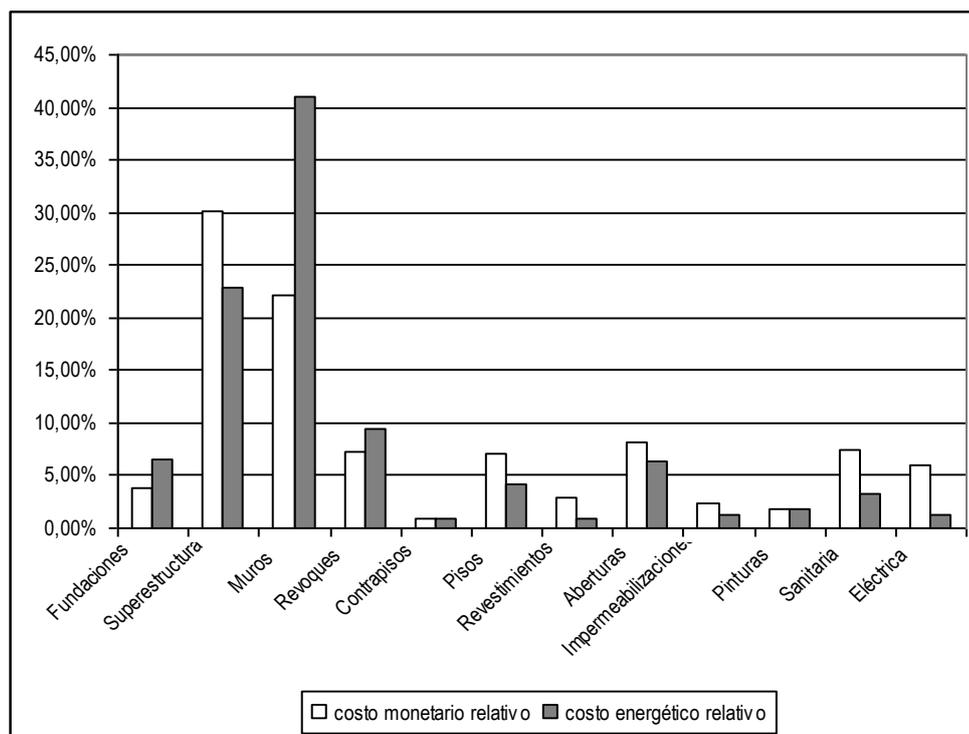


Figura 55 - Comparación de costo energético y costo monetario

6.6. ENERGIA INCORPORADA RECURRENTE

La energía incorporada recurrente calculada fue de 3418,31 GJ, lo que significa un 20,72% de la energía incorporada inicial.

6.7. ENERGIA INCORPORADA DE DECONSTRUCCION

La energía por demolición y transporte de escombros calculada fue de 331,22 GJ.

Tabla 29 - Energía incorporada de deconstrucción

Cantidad de materiales (kg)		Factor de demolición (MJ/kg)	El demolición
inicial	5541942,57	0,035	206138,66 MJ
mantenimiento	281183,46		
Transp. Escombros			
Distancia	Tipo	Consumo	E.I. Transp esc.
20 km	camión 10t	3 lt/km	125080,75 MJ

6.8. PARAMETROS DE ENERGÍA OPERACIONAL

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de los parámetros de energía operacional definidos.

6.9. ENERGÍA OPERACIONAL DEL EDIFICIO

6.9.1. Energía operacional total

La suma de la energía derivada de las fuentes analizadas, arroja un valor de energía operacional anual equivalente a 874,31 GJ/año (tabla 30).

Tabla 30 - Energía operacional anual

unidad	Hab. por unidad	Electricidad			Gas licuado		Leña		Energía total anual GJ/año
		Consumo de energía eléctrica kwh	Corrección energía primaria GJ	Anualización del consumo eléctrico GJ/año	Energía gas total (cocción + calefacción) GJ/año	Corrección energía primaria GJ/año	Consumo anual (kg)	Energía anual leña (GJ/año)	
002	2	15986	108,77	22,32	16,08	17,68			40,00
003	2	13357	90,88	18,65	5,36	5,89			24,54
101	3	9917	67,48	13,84	1,79	1,96			15,81
102	4	10029	68,24	14,00	2,86	3,14			17,14
103	2	13852	94,25	19,34	1,19	1,31			20,65
104	3	16156	109,93	22,55	4,76	5,24			27,79
201	2	10835	73,72	15,13	10,72	11,79			26,91
(*) 202		2620	17,83	3,66	2,04	2,25			5,90
203	3	11570	78,72	16,15	5,83	6,42			22,57
204	2	13200	89,81	18,43	3,97	4,37			22,79
301	1	8767	59,65	12,24	0,60	0,65			12,89
302	3	7472	50,84	10,43	3,83	4,21			14,64
303	2	10728	72,99	14,98	1,43	1,57			16,55
304	2	13707	93,26	19,13	1,79	1,96			21,10
401	3	10858	73,88	15,16	2,38	2,62			17,78
402	3	15143	103,03	21,14	1,79	1,96			23,10
403	2	9713	66,09	13,56	7,14	7,86			21,42
404	2	12414	84,46	17,33	2,04	2,25			19,58
501	1	4615	31,40	6,44	4,17	4,58			11,03
502	4	13628	92,72	19,02	7,14	7,86			26,88
(**) 503	2	12787	87,00	17,85	2,04	2,25			20,10
504	3	11941	81,25	16,67	1,79	1,96			18,63
(**) 601	3	11418	77,69	15,94	2,04	2,25			18,18
602	3	7498	51,02	10,47	4,76	5,24			15,71
603	2	13181	89,68	18,40	2,04	2,25			20,65
604	2	17363	118,14	24,24	1,43	1,57			25,81
701	2	11865	80,73	16,56	7,14	7,86			24,42
702	2	4402	29,95	6,15	1,79	1,96			8,11
703	3	12717	86,53	17,75	3,57	3,93			21,68
(**) 704	2	10738	73,06	14,99	2,04	2,25			17,24
801	2	14008	95,31	19,55	3,57	3,93			23,48
802	3	10402	70,78	14,52	7,38	8,12			22,64
803	4	7531	51,24	10,51	13,10	14,41			24,92
804	2	13336	90,74	18,62	4,76	5,24			23,86
901	2	15223	103,58	21,25	2,04	2,25			23,50
902	1	5540	37,69	7,73	0,00	0,00			7,73
903	3	14807	100,75	20,67	3,57	3,93			24,60
904	3	17221	117,17	24,04	8,93	9,82			33,86
1002	1	8102	55,13	11,31	3,87	4,26			15,57
1003	2	12194	82,97	17,02	2,38	2,62			19,64
1004	2	17324	117,87	24,18	0,89	0,98			25,17
medidor		15983	108,75	22,31			504	7,41	29,71
Energía operacional anual									874,31

(*) unidad temporalmente vacía

(**) unidades que no respondieron a la encuesta.

La energía operacional total del edificio está constituida por los valores parciales anualizados de las siguientes fuentes de energía: electricidad, gas licuado y leña (tabla 31).

Tabla 31 - Energía operacional anual per cápita

fuelle de energía	uso	total anual (GJ/año)	incidencia relativa	total per cápita (GJ/año/persona)
Energía eléctrica	Varios	684,24	78,26%	7,20
GLP	Cocción	127,64		
	Calefacción	55,01	6,29%	0,58
Leña	Parrillero	7,41	0,85%	0,08
Total		874,31		7,86

6.9.2. Energía eléctrica operacional

La demanda anual calculada de energía eléctrica para la operación del edificio, es de 684,24 GJ/año, en términos de energía primaria. Este valor representa un promedio de 7,2 GJ por año y por persona. Se observa una relación entre el tamaño del hogar en cantidad de habitantes y el consumo de energía del hogar (ver figura 56).

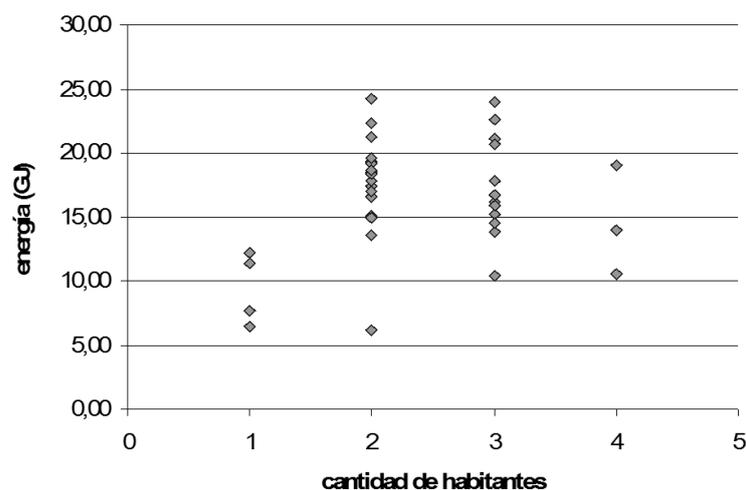


Figura 56 - Consumo eléctrico anual de las unidades según tamaño del hogar

6.9.3. Energía operacional por gas licuado

De la encuesta realizada surge que la única fuente energética utilizado por los ocupantes además de la electricidad es el gas licuado (supergas). El mismo responde a dos usos: cocción y calefacción.

No se obtuvieron datos de uso para cuatro unidades, una por estar vacía, las otras tres por no responder a la encuesta. Para el cálculo de la energía operacional total debía contarse con un valor para dichas unidades, que mantuviera consistencia con la estructura de datos recabados. Por ello, se colocó en las unidades un valor equivalente a la mediana para el caso del consumo de cocción; para la calefacción, dado que la moda y la mediana eran cero, se adjudicó dicho valor a las cuatro unidades sin datos (tabla 32).

La energía total calculada para GLP es de 182,66 GJ/año, de los cuales 127,64 GJ corresponden a cocción y 55,01 GJ a calefacción. Sin contar a las unidades sin datos, las unidades cuyos propietarios no utilizan gas para calefacción son veinticinco en treinta y siete, es decir, un 67,6%. A su vez, entre las doce unidades que sí utilizan gas licuado para calefacción, se observa cierto grado de relación directa entre el consumo y el tamaño del hogar en cantidad de habitantes (ver figura 57).

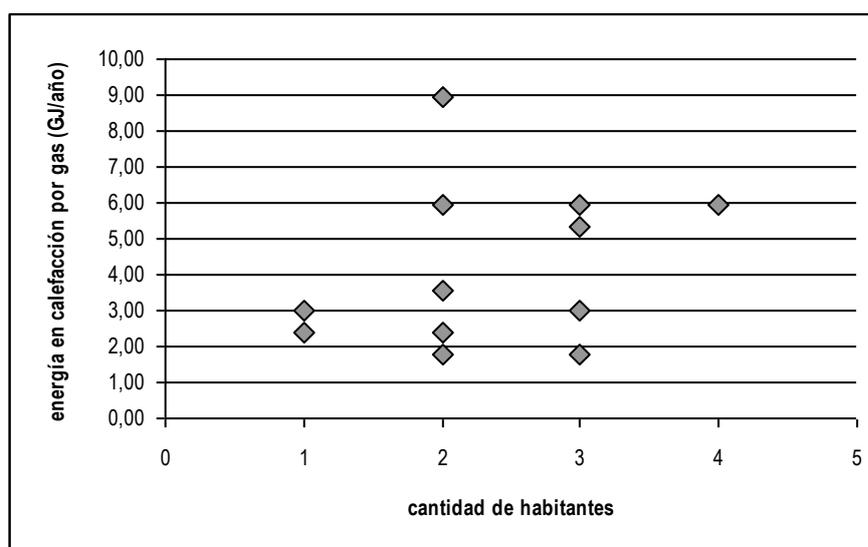


Figura 57 - Consumo de gas para calefacción según tamaño del hogar

Tabla 32 - Energía de GLP operacional

unidad	Cant. de hab.	Consumo GLP (garrafas 13k/año)		energía cocción	energía calefacción	Energía calefacción por hab	Energía GLP total	Corrección energía primaria	Obs.
		cocción	calefacción	GJ/año	GJ/año	GJ/año	GJ/año	GJ/año	
002	2	12,00	15	7,14	8,93	4,47	16,08	17,68	
003	2	6,00	3,00	3,57	1,79	0,89	5,36	5,89	
101	3	3,00	0,00	1,79	0,00	0,00	1,79	1,96	
102	4	4,80	0,00	2,86	0,00	0,00	2,86	3,14	
103	2	2,00	0,00	1,19	0,00	0,00	1,19	1,31	
104	3	8,00	0,00	4,76	0,00	0,00	4,76	5,24	
201	2	12,00	6,00	7,14	3,57	1,79	10,72	11,79	
202	0	0,00	0,00	2,04	0,00	0,00	2,04	2,25	Vacía
203	3	4,80	5,00	2,86	2,98	0,99	5,83	6,42	
204	2	2,67	4,00	1,59	2,38	1,19	3,97	4,37	
301	1	1,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,60	0,65	
302	3	3,43	3,00	2,04	1,79	0,60	3,83	4,21	
303	2	2,40	0,00	1,43	0,00	0,00	1,43	1,57	
304	2	3,00	0,00	1,79	0,00	0,00	1,79	1,96	
401	3	4,00	0,00	2,38	0,00	0,00	2,38	2,62	
402	3	3,00	0,00	1,79	0,00	0,00	1,79	1,96	
403	2	2,00	10,00	1,19	5,95	2,98	7,14	7,86	
404	2	3,43	0,00	2,04	0,00	0,00	2,04	2,25	
501	1	3,00	4,00	1,79	2,38	2,38	4,17	4,58	
502	4	12,00	0,00	7,14	0,00	0,00	7,14	7,86	
503	2			2,04	0,00	0,00	2,04	2,25	N/C
504	3	3,00	0,00	1,79	0,00	0,00	1,79	1,96	
601	3			2,04	0,00	0,00	2,04	2,25	N/C
602	3	8,00		4,76	0,00	0,00	4,76	5,24	
603	2	3,43	0,00	2,04	0,00	0,00	2,04	2,25	
604	2	2,40	0,00	1,43	0,00	0,00	1,43	1,57	
701	2	12,00	0,00	7,14	0,00	0,00	7,14	7,86	
702	2	3,00	0,00	1,79	0,00	0,00	1,79	1,96	
703	3	6,00	0,00	3,57	0,00	0,00	3,57	3,93	
704	2			2,04	0,00	0,00	2,04	2,25	N/C
801	2	6,00	0,00	3,57	0,00	0,00	3,57	3,93	
802	3	2,40	10,00	1,43	5,95	1,98	7,38	8,12	
803	4	12,00	10,00	7,14	5,95	1,49	13,10	14,41	
804	2	8,00	0,00	4,76	0,00	0,00	4,76	5,24	
901	2	3,43	0,00	2,04	0,00	0,00	2,04	2,25	
902	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
903	3	6,00	0,00	3,57	0,00	0,00	3,57	3,93	
904	3	6,00	9,00	3,57	5,36	1,79	8,93	9,82	
1002	1	1,50	5,00	0,89	2,98	2,98	3,87	4,26	
1003	2	4,00	0,00	2,38	0,00	0,00	2,38	2,62	
1004	2	1,50	0,00	0,89	0,00	0,00	0,89	0,98	
Total	95			116,04	50,01		166,05	182,66	

6.9.4. Leña

El consumo de leña se estimó en base a información de la comisión administradora del edificio sobre la frecuencia de uso del parrillero. Se calculó un promedio de 3 veces mensuales, con un consumo de 14 kg de leña por vez, lo que arroja un total de 504 kg anuales. Esto equivale, según un valor calorífico neto de la madera en leño secada al aire de 14,7 MJ/kg (Biomass Energy Center), a 7,41 GJ/año. La leña es una fuente primaria de energía, por lo que no corresponde corrección por REE.

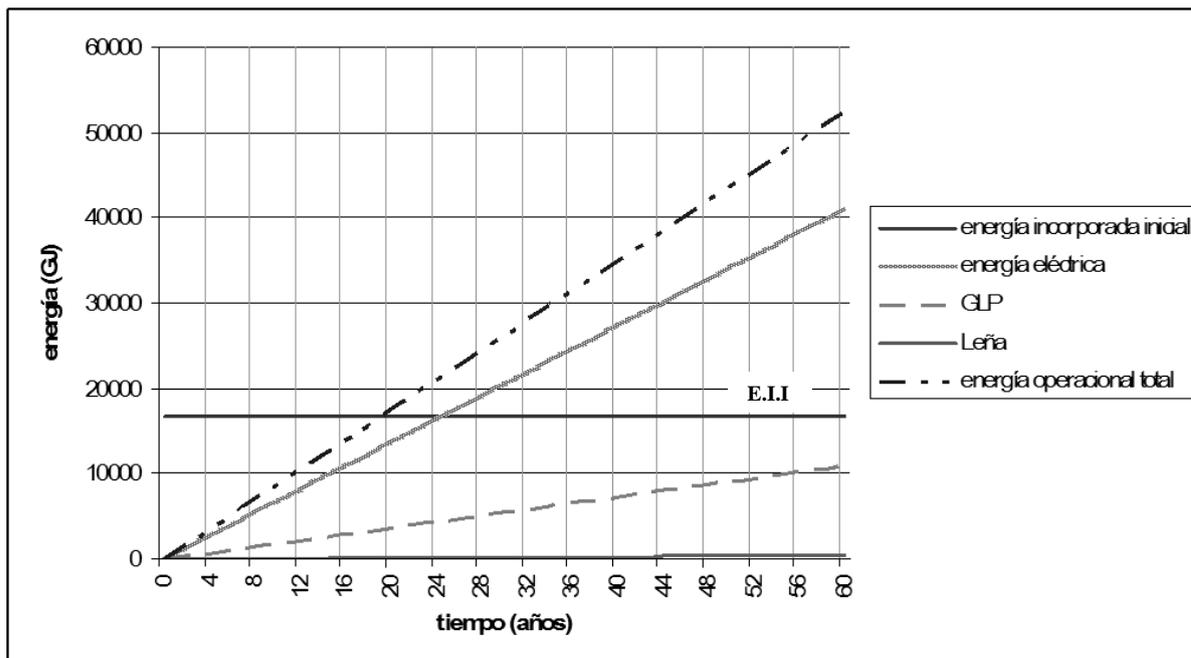
6.9.5. Otras fuentes de energía operacional

De acuerdo a la información recabada en al encuesta a los ocupantes, no surgió ninguna fuente adicional de energía operacional.

6.9.6. Período de retorno energético

El retorno energético, calculado como el cociente entre la energía incorporada inicial y la energía operacional total anual, es de 19,17 años.

En la figura 58 se presenta la evolución del consumo de energía operacional, comparada con la energía incorporada.



Energía incorporada inicial (GJ)	Fuente de energía	Total anual (GJ/año)	Período de retorno energético (años)
16758,06	Energía eléctrica	684,24	24,40
	GLP	182,65	91,40
	Leña	7,41	2252,84
	Total	874,31	19,09

Figura 58 - Período de retorno energético de la energía incorporada inicial

Si se considera además la energía incorporada recurrente y la energía de deconstrucción calculadas, el período de retorno energético es de 23,52 años (figura 59).

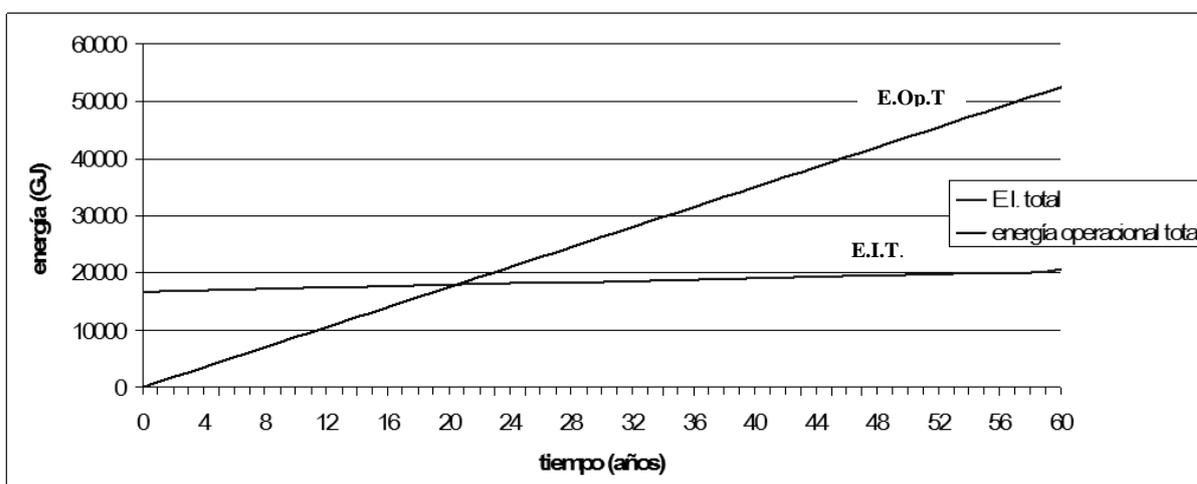


Figura 59 - Período de retorno energético de la energía incorporada total

A partir de los datos recabados se analizaron algunas características del consumo de energía operacional en el edificio. Del mismo surge que existe un grado de relación directa entre la demanda energética y el tamaño del hogar (en cantidad de personas) (figura 60).

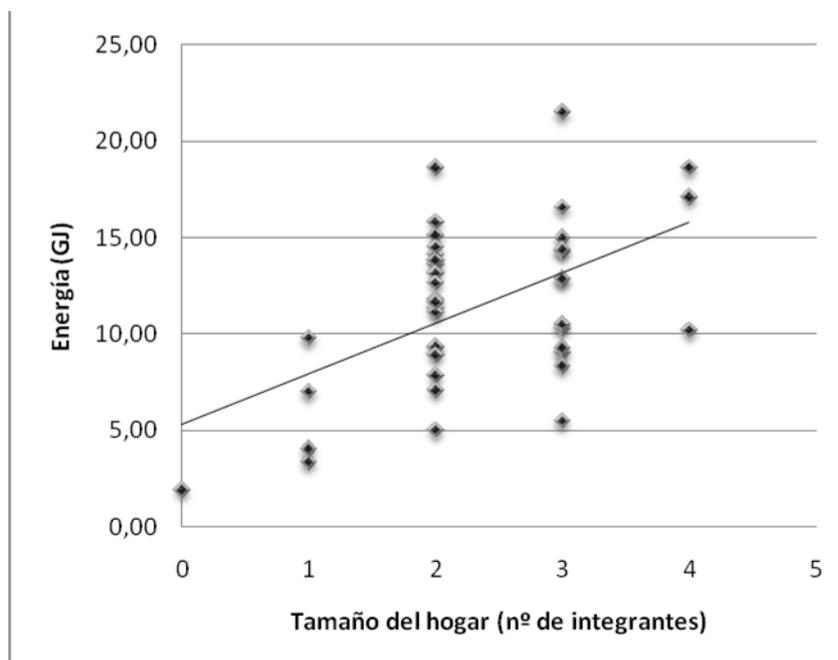


Figura 60 - Relación entre energía operacional y tamaño del hogar

En cambio, no se observó una relación entre la orientación de las unidades y el gasto energético operacional por habitante (tabla 33).

Tabla 33 - Promedio de energía operacional por orientación geográfica

gasto energético operacional por habitante (GJ/año)	Orientación
5,58	Norte
4,82	Este
5,90	Sur

Tampoco se observa una relación inversa entre el consumo de electricidad y el consumo de gas licuado para calefacción (figura 61).

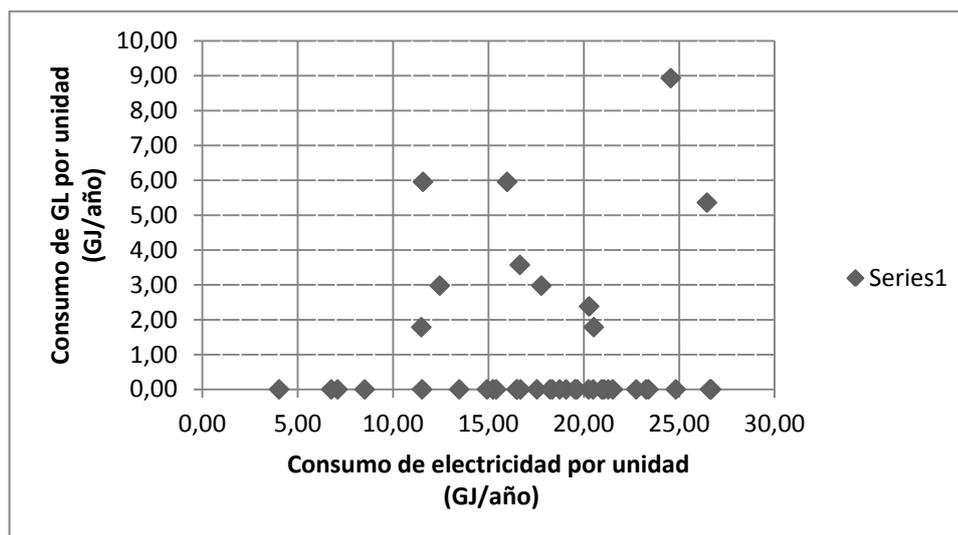


Figura 61 - Consumo de GL y electricidad por unidad de vivienda

6.10. ENERGIA OPERACIONAL DE TRANSPORTE EN VEHICULO PROPIO

La demanda energética total anual calculada según se refiere el ítem 5.11, fue de 794,61 GJ/año (ver desglose en tabla 34). Es de observar que de este valor, el consumo de una sola unidad (804) representa el 34,08%. En oportunidad de realizar la entrevista, la propietaria planteó que realiza viajes periódicos al exterior, con un kilometraje anual estimado de 100.000 km/año (ver figura 62).

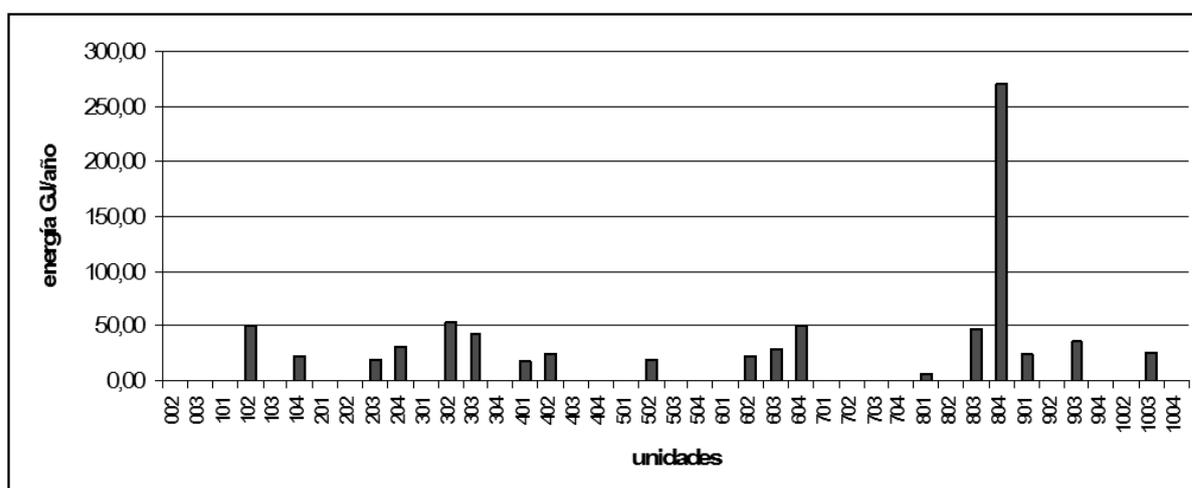


Figura 62 - Distribución por unidad del consumo de energía en combustible de vehículo propio

Tabla 34 - Energía de transporte - vehículo propio

Unidad	Cantidad de ocupantes por unidad	Consumo de combustible vehículo propio (lts/año)		P.C.I. (MJ/lt)	Energía (GJ/año)	Corrección energía primaria (GJ/año)	observaciones
		nafta	gasoil				
002	2						no tiene auto
003	2						no tiene auto
101	3						no tiene auto
102	4	1428,57		32,00	45,71	50,29	
103	2						no tiene auto
104	3		583,33	36,40	21,23	23,36	
201	2	s/d					auto nuevo
202							apto vacío
203	3	540,00		32,00	17,28	19,01	
204	2	857,14		32,00	27,43	30,17	
301	1						no tiene auto
302	3	1538,46		32,00	49,23	54,15	
303	2	1200,00		32,00	38,40	42,24	
304	2						no tiene auto
401	3	500,00		32,00	16,00	17,60	
402	3	714,29		32,00	22,86	25,14	
403	2						no tiene auto
404	2						no tiene auto
501	1						no tiene auto
502	4	540,00		32,00	17,28	19,01	
503	2						sin dato
504	3						no tiene auto
601	3						sin dato
602	3		553,85	36,40	20,16	22,18	
603	2	833,33		32,00	26,67	29,33	
604	2	1428,57		32,00	45,71	50,29	
701	2						no tiene auto
702	2						no tiene auto
703	3						no tiene auto
704	2						sin dato
801	2	178,57		32,00	5,71	6,29	
802	3						no tiene auto
803	4		1200,00	36,40	43,68	48,05	
804	2	7692,31		32,00	246,15	270,77	
901	2	714,29		32,00	22,86	25,14	
902	1						no tiene auto
903	3	1000,00		32,00	32,00	35,20	
904	3						no tiene auto
1002	1						no tiene auto
1003	2	750,00		32,00	24,00	26,40	
1004	2						no tiene auto
energía total anual vehículo propio						794,61	

6.10.1. Energía operacional de transporte en vehículo propio y energía incorporada inicial

La energía anual por transporte correspondiente a vehículo propio en el edificio es menor que la energía operacional calculada para el mismo. En la comparación entre la energía incorporada inicial y la energía de transporte anual calculada, la primera equivale a veintiún años de transporte con vehículo propio de los habitantes del edificio (figura 63).

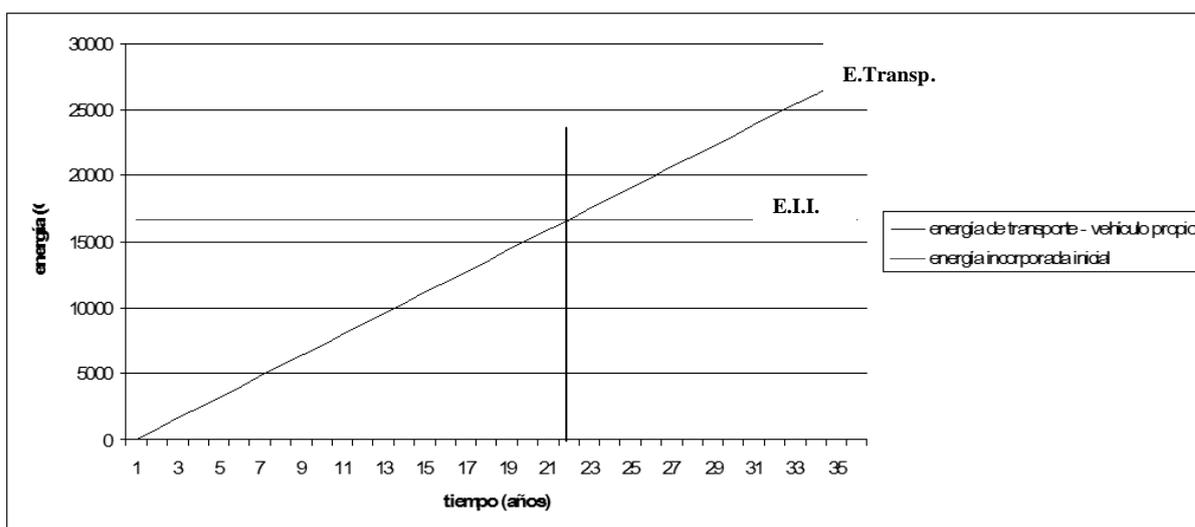


Figura 63 - Comparación entre energía de combustible de vehículo propio y energía incorporada inicial

6.11. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ALTERNATIVAS

Según se planteó en el ítem 5.4, se presentan a continuación resultado de las soluciones constructivas alternativas propuestas para el edificio, en los rubros de estructura y mampostería.

6.11.1. Estructura

6.11.1.1. Modificación de diseño de la estructura: losa con vigas

La energía incorporada para losas y vigas en la solución original, incluyendo pérdidas y transporte, es de 2544328,91 MJ. La energía incorporada en la solución alternativa es de 2271569,24 MJ, lo que significa una disminución de un 10.72%.

Pero si no se toman en cuenta las pérdidas ni el transporte, la diferencia entre ambas soluciones alcanza un 16.42%. Esto se debe en gran parte a que los datos estadísticos de pérdidas son mucho más significativos para los materiales constitutivos del hormigón de cascote del contrapiso que para el hormigón premezclado (ver figura 64).

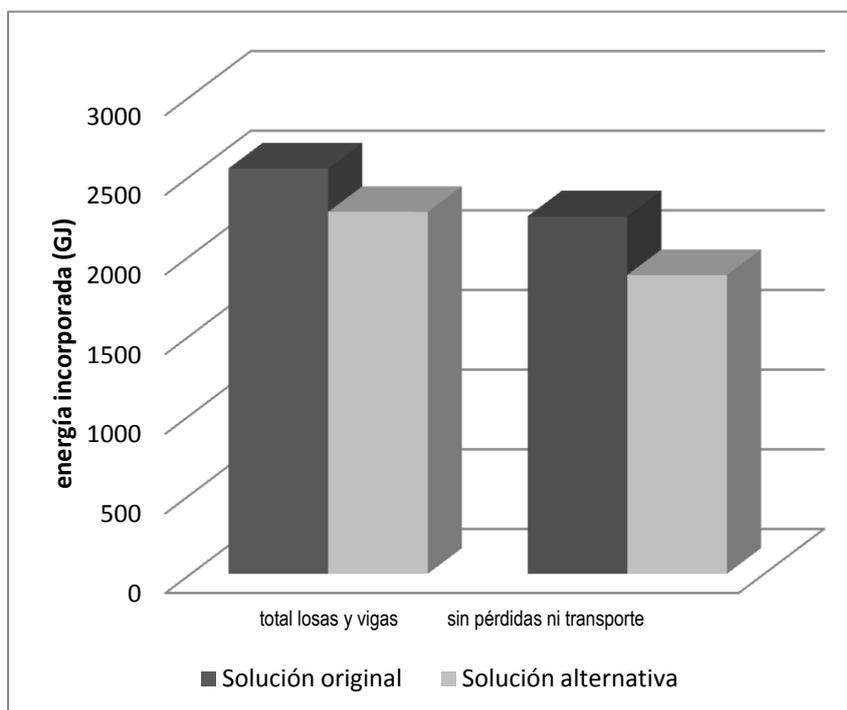


Figura 64 - Comparación entre solución estructural original y alternativa 1

Es de observar que el valor de la intensidad energética manejado para la cal, presente en el hormigón de cascote, es superior al del cemento. Esto ha sido notado por los autores de la base de datos utilizada para los valores de intensidad energética de materiales (HAMMOND y JONES, 2008).

La disminución obtenida con la solución propuesta significa un 1,5% de la energía incorporada inicial total calculada para el edificio.

6.11.1.2. Modificación del tipo de hormigón estructural

A efectos de la sustitución de un 20% de cemento portland por CBC, se consideró un índice energético del CBC de 0,07 MJ/kg por concepto de molienda, y un índice energético de transporte del CBC de 1,553 MJ/kg, calculado según lo planteado en el ítem 5.5.3.2. De acuerdo a los resultados obtenidos (ver tabla 35), la alternativa significa una reducción de la

energía incorporada de 194,8 GJ, lo que significa un 1,50 % de la energía incorporada total. Se aclara que esta incidencia se calcula a partir del total de la energía incorporada sin considerar las pérdidas, dado que en la presente comparación no se tomaron en consideración.

Tabla 35 - Comparación entre hormigón tradicional y hormigón con CBC

	estructura metraje total (m3)	material	dosificación	masa total (kg)	Índice energético (MJ/kg)	energía incorporada (MJ)	Índice energético transporte	E. TRANSP. (MJ)	energía incorp. con transp. (MJ)	total solución (GJ)
Hormigón tradicional	816	pedregullo	0,8 m3	1044480	0,1	104448	0,075	97920	202368	1823,046
		arena	0,55 m3	718080	0,1	71808	0,125	163200	235008	
		cemento	325 kg	265200	4,6	1219920	0,625	165750	1385670	
Hormigón con CBC		pedregullo	0,8 m3	1044480	0,1	104448	0,075	97920	202368	1628,257
		arena	0,55 m3	718080	0,1	71808	0,125	163200	235008	
		cemento	260 kg	212160	4,6	975936	0,625	132600	1108536	
		CBC	65		0,07		1,5525	82344,6	82344,6	

6.11.2.Mampostería

Se evalúan a continuación las alternativas para muros interiores planteadas en los puntos 5.5.4.1. y 5.5.4.2.

6.11.2.1. Cerámica hueca

La base de datos del ICE ya referida, así como otras consultadas, no diferencian entre el ladrillo cerámico macizo y el ticholo hueco a los efectos de establecer su valor de índice energético. Por tanto, los factores que inciden en las diferentes intensidades energéticas de ambas soluciones de tabiques, son: diferencias de masa cerámica, diferencias en la cantidad necesaria de mortero de asiento para una y otra solución y diferencias de pérdidas promedio de ladrillo macizo y ticholo consignadas en Formoso (2009), utilizado como referencia de pérdidas de materiales.

Para los muros divisorios de unidades, la normativa departamental establece que en caso de utilizar mampostería cerámica con huecos, deberá ser de tipo “rejillón”, y no superar el 20% de huecos. De la tabla 36 se desprende que el rejillón tiene un porcentaje de huecos mayor al máximo permitido por la norma, por lo que la pieza admitida sería en realidad el ladrillo rejilla.

Tabla 36 - Porcentaje de huecos de mampostería cerámica en Uruguay
(Fontana, 2011)

Tipo de mampuesto	Espesor mínimo de tabiques (mm)		Porcentaje de Huecos promedio (%)
	Exteriores	Interiores	
Rejillón de 8x17x25 Fabricante A	11,0	7,0	36,75
Ticholos de 12x25x25 Fabricante A	9,5	5,0	50,65
Ticholos de 17x25x25 Fabricante A	12,0	8,0	55,13
Ticholos de 9x14x19 Fabricante B	6,5	6,0	39,40
Ticholos de 12x17x25 Fabricante B	9,0	7,0	41,90
Ticholos de 12x25x25 Fabricante B	8,0	7,0	53,95
Ticholos de 8x25x25 Fabricante C	7,5	7,0	50,45
Ticholos de 12x25x25 Fabricante C	7,0	6,5	58,41
Ticholos de 17x25x25 Fabricante C	7,0	6,0	62,14
Rejillón de 12x17x25 Fabricante C	8,0	5,0	42,40

En la tabla 37 se comparan la solución original y la solución tradicional en cerámica hueca en función de su energía incorporada por metro cuadrado, resultando la alternativa propuesta significativamente más eficiente en ese sentido.

Tabla 37 - Comparación de muros interiores - alternativa en cerámica hueca

Muro		Materiales	Cantidad/m2	Peso/m2 (kg)	Indice (MJ/kg)	energ.	Energía inc./m2 (MJ)
divisorio 20cm	solución original	ladrillo	95 u	285	3	855	959,8
		arena	0,08 m3	128	0,1	12,8	
		cemento	20 kg	20	4,6	92	
	alternativa 1	ladrillo rejilla	95 u	313,5	3	940,5	1045,3
		arena	0,08 m3	128	0,1	12,8	
		cemento	20 kg	20	4,6	92	
inte=15	solución original	ladrillo	60 u	180	3	540	618,6
		arena	0,06 m3	96	0,1	9,6	
		cemento	15 kg	15	4,6	69	
	alternativa 1	ticholo	24 u	116,4	3	349,2	364,92
		arena	0,012 m3	19,2	0,1	1,92	
		cemento	3 kg	3	4,6	13,8	

Un factor relevante en la comparación es la consideración de las pérdidas de materiales. Estas son en promedio, según el estudio referido, de un 52,2% para el ladrillo y de un 18% para el ticholo. En la tabla 38 se muestran los resultados y la incidencia de la modificación en la energía incorporada total calculada.

Tabla 38 - Comparación entre soluciones de muros interiores - alternativa 1 Resumen

RESUMEN MUROS INTERIORES						
TIPO DE MURO	AREA	E. INC./M2	E. INC. s/p	PÉRDIDAS	TOTAL RUBRO	INCIDENCIA EN E.I. Total
divisorios e=20 orig	285,5	959,8	274022,9	148515,387	422538,29	2,53%
divisorios e=20 alt 1	285,5	1045,3	298433,15	69426,177	367859,33	2,20%
internos e=15 orig	3502,3	618,6	2166522,78	1181301,274	3347824,1	20,05%
internos e=15 alt 1	3502,3	364,92	1278059,316	258955,1588	1537014,5	9,21%

6.11.2.2. Yeso

La segunda alternativa calculada para los muros interiores fue de placas de yeso con estructura de perfiles de chapa de acero zincado y, aislación de lana de vidrio o poliestireno expandido según el caso. En este caso, inciden de forma determinante los factores de pérdidas manejados para los materiales de esta solución y para los materiales de la solución original.

El valor total calculado para dicha solución es de 2719,57 GJ, lo que significa una reducción de la energía incorporada total inicial de la obra de un 7,31% (tabla 39).

Tabla 39 - Comparación entre solución de muros original y solución en placa de yeso

Muro		Materiales	Cantidad/m2		Peso/m2 (kg)	Ind. energ. (MJ/kg)	Energía (MJ)	inc./m2
divisorio 20cm	solución original	ladrillo	95	u	285	3	855	959,8
		arena	0,08	m3	128	0,1	12,8	
		cemento	20	kg	20	4,6	92	
	Alternativa 2	2 placas 75mmm	1	m2	120	6,75	810	1011,5721
		perfil metalico	0,00033	m3	2,5839	39	100,8	
		lana de vidrio	0,05	m3	6	16,8	100,8	
int e=15	solución original	ladrillo	60	u	180	3	540	618,6
		arena	0,06	m3	96	0,1	9,6	
		cemento	15	kg	15	4,6	69	
	alternativa 2a (tabiques internos)	2 placas 40mmm	1	m2	52,8	6,75	356,4	473,9721
		perfil metalico	0,00033	m3	2,5839	39	100,8	
		lana de vidrio	15	kg	1	16,8	16,8	
	alternativa 2b (tabique interior muro exterior)	1 placa 60mm	1	m2	39,6	6,75	267,3	433,5921
		perfil metalico	0,00033	m3	2,5839	39	100,8	
		poliestireno exp	0,03	m3	0,6	109,2	65,52	

Sin embargo, esta alternativa no logra una reducción de la energía incorporada para el caso de muro divisorio entre unidades. Esto se debe en parte a que la reglamentación municipal en Montevideo, ha aceptado sólo recientemente la división de unidades en propiedad horizontal con tabiques realizados con placas de yeso, y ha condicionado dicha aceptación a la ejecución de un tabique con dos placas de 75 mm cada una, lo que deja una cámara de 5 cms en el alma del muro, haciéndolo prácticamente macizo.

Ambas soluciones alternativas tienen una masa significativamente menor que la solución original. Esto implica una carga menor en la estructura y por lo tanto una probable reducción en la cantidad de hormigón armado estructural, o al menos en la cuantía de acero, y por tanto en la energía incorporada correspondiente a la estructura, que no fue calculada en el presente trabajo.

7. CONCLUSIONES

El presente capítulo presenta una síntesis de las conclusiones obtenidas en el desarrollo de esta investigación, a través de las cuales es posible verificar de qué manera fueron respondidos los objetivos propuestos en la misma. En función de ellas, y con miras a la profundización de los estudios sobre energía incorporada, se presentan sugerencias para futuros trabajos.

La investigación se enfocó en el análisis de la energía incorporada, teniendo como objeto de estudio un edificio en altura típico construido en Uruguay. Para ello se realizó una caracterización del edificio, de las tecnologías y materiales utilizados, y se desarrolló un análisis de ciclo de vida energético. A partir del mismo se buscó responder al primer objetivo planteado, cual fue el de comparar la energía incorporada en los procesos de construcción, mantenimiento y deconstrucción del edificio con la energía consumida en su operación a lo largo de su vida útil.

Los resultados del análisis comparativo, a través del cálculo del período de retorno energético, señalaron la relevancia relativa de la energía incorporada en el consumo total del edificio, en relación a la energía operacional correspondiente, dado que la primera correspondió a un tercio de la energía operacional total. Sin embargo, los valores absolutos calculados de energía incorporada por metro cuadrado, corresponden a rangos medios en lo que hace a los valores presentados en la literatura consultada, más allá de las limitaciones de orden metodológico para realizar comparaciones detalladas, señaladas en este trabajo. De ello se desprende que el peso de la energía incorporada en el caso analizado no radica en procesos y materiales especialmente onerosos en cuanto a su consumo energético, sino en los consumos moderados de energía operacional relevados en el caso estudiado. Por tanto, estos resultados indican la conveniencia de ampliar el foco de las políticas actuales de eficiencia energética para las edificaciones, enfocadas hoy día específicamente hacia la eficiencia operacional, para incluir acciones destinadas a reducir la energía incorporada.

Otro objetivo propuesto fue determinar los elementos constructivos responsables de la mayor parte de la energía incorporada en los edificios, en la hipótesis de que pocos elementos explicarían gran parte del gasto energético. Del cálculo de la energía incorporada surgió que los elementos constructivos más importantes en términos absolutos en el edificio fueron los muros y la estructura, que significaron aproximadamente un 62% de la energía incorporada inicial indirecta. Es decir que las acciones más eficaces en la reducción de energía incorporada inicial abarcarán estos elementos. Por esta razón se seleccionaron estos rubros para el análisis de alternativas constructivas, que se realizó en una segunda etapa de investigación. En dicha etapa se caracterizaron soluciones constructivas alternativas tradicionales para rubros específicos, se analizaron sus prestaciones con respecto a la solución original de cada caso, y se calculó su energía incorporada inicial. Con esto se atendió a su vez al objetivo de la evaluación comparativa entre la energía incorporada de soluciones alternativas normalmente utilizadas. De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis comparativo, surge que las alternativas estructurales planteadas, tanto la modificación del diseño estructural, como la modificación del tipo de hormigón, logran una reducción de la energía incorporada total del orden del 1,5%. Estos resultados indican una rigidez de los costos energéticos en el sistema estructural de hormigón, por lo que la búsqueda de alternativas estructurales más eficientes desde el punto de vista de la energía incorporada, implicarán entonces su sustitución por otros materiales más eficientes, pero con prestaciones diferentes, como la madera, lo que conlleva diseños y limitaciones estructurales específicos, y que, por tanto, involucrará cambios conceptuales más amplios.

En cambio, las soluciones alternativas de tabiques mostraron diferencias significativas, que en el caso de la sustitución de cerámica maciza por cerámica hueca para tabiques interiores llegó aproximadamente al 10% de la energía incorporada total. Estos resultados indican la pertinencia de profundizar el análisis de la energía incorporada en sistemas alternativos de cerramientos verticales, integrando la visión de sustentabilidad con la de gerenciamiento y economía de construcción. En este sentido, la albañilería se plantea como un foco importante para la compatibilización de proyectos, planificación y control de producción y reducción de pérdidas, en el que futuros trabajos puedan estudiar mayor número de alternativas de proyecto y en particular la potencialidad de sistemas no tradicionales.

De estos resultados obtenidos con respecto a la disminución potencial de energía incorporada en función de las soluciones constructivas utilizadas, se concluye asimismo que la

incorporación de la variable de energía incorporada en la solución constructiva es relevante en términos de eficiencia energética, y debería incluirse en los procesos de toma de decisiones a nivel de proyecto arquitectónico.

Tanto del análisis por ítem de obra, como del estudio comparativo de soluciones alternativas, se verifica una relación inversa entre el índice energético del material y su incidencia en el total de la obra. Esto se debe a las muy significativas diferencias de masa total utilizada de diferentes materiales, con los materiales de alta carga energética incorporada utilizados en bajas cantidades y otros que tienen índices energéticos bajos, requeridos en forma masiva. Por tanto, se establece una suerte de relación proporcional entre la masa de la solución constructiva global con su energía incorporada total. Por supuesto, esto no se extrapola a los ítems individuales, más aún en aquellos que tienen poca incidencia en la masa total de la obra. Esta verificación sugiere la pertinencia de profundizar en el análisis de la masa total de soluciones constructivas como índice proxy de la energía incorporada inicial, teniendo en cuenta que algunos de los materiales con mayores tasas de reposición son de alto índice energético, y por tanto incidirán al momento de calcular la energía incorporada recurrente.

Entre los otros objetivos marcados para el presente trabajo, se encuentra la determinación de la relevancia relativa de los valores de energía obtenidos del análisis del ciclo de vida del edificio, con respecto a un parámetro externo a la construcción. Para cumplir este objetivo, se seleccionó como parámetro de comparación la energía consumida por los usuarios del edificio en la operación de vehículos propios. Del análisis surge que considerando la totalidad del edificio, incluyendo las unidades que no cuentan con vehículo, los valores totales anualizados de energía en combustible de vehículos son similares a los valores de energía operacional del edificio. Este dato señala la relevancia en términos absolutos de los valores obtenidos en el ACVE, y por tanto la necesidad de jerarquizar los aspectos energéticos de las edificaciones, y en particular los concernientes a la energía incorporada, en las políticas públicas de eficiencia energética general. Cabe consignar que esta comparación apunta más a los aspectos de eficiencia energética vinculados a la vulnerabilidad de la matriz energética nacional, y no a los aspectos de sustentabilidad ambiental. Desde este último punto de vista, dada las fuentes de energía involucradas en el caso de la construcción y del transporte, las emisiones de dióxido de carbono son muy diferentes, con un impacto mucho más alto por parte del segundo.

Asimismo, se planteó el objetivo de evaluar el consumo energético operacional del edificio, y su composición. En este consumo, la energía eléctrica significó más del 75% de la energía total, con una baja incidencia del uso de gas licuado. Dada la problemática actual de déficits de oferta de energía eléctrica, con los altos costos que implican para subsanarlos, los resultados obtenidos indican la necesidad de reducir la demanda por un lado, pero por también la conveniencia de evaluar fuentes alternativas de energía para los usos relevados.

Por último, se buscó identificar la disponibilidad de estudios a nivel nacional en materia de energía incorporada en la construcción. La imposibilidad de hallar investigaciones en esta línea señala la pertinencia del presente trabajo.

En síntesis, se concluye que el potencial de reducción de energía a partir de la consideración de las soluciones constructivas tradicionales seleccionadas, es considerable y que debería integrarse como variable en la toma de decisiones de proyecto. La participación del autor de este trabajo en la Agencia Nacional de Vivienda, organismo ejecutor de las políticas públicas de vivienda de interés social en el Uruguay, puede coadyuvar en la inserción concreta de esta dimensión específica de la sustentabilidad ambiental en las definiciones de producto del organismo.

El desarrollo de esta investigación permitió asimismo identificar áreas para futuros trabajos. Se observó en particular la carencia de datos en materia de energía incorporada a nivel de la construcción, en los temas que se describen a continuación.

En lo que hace a índices energéticos de materiales, no se encontraron trabajos a nivel nacional. El proyecto de generar una base de datos amplia sobre intensidades energéticas de los materiales es un desafío importante y de largo aliento. Un trabajo previo consistiría en el desarrollo de una metodología para recabar los datos necesarios para calcular los índices, de forma de hacerlos comparables y útiles. La protocolización de metodologías de cálculo de energía incorporada de materiales dirigida a fabricantes, y el estímulo para presentar datos en este sentido, habilitaría el desarrollo de mejores análisis energéticos.

Otro aspecto del cálculo de índices energéticos es el análisis de componentes. Si bien es factible calcular la cantidad de materiales de muros y de elementos estructurales, es más complejo la consideración de elementos como ascensores, bombas, etc. Incluso la consideración de aberturas, grifería, y otros componentes se realiza en forma aproximada y en

base a sus materiales constitutivos más importantes, dejando generalmente de lado los elementos menores.

Con respecto al análisis de la energía recurrente, para su estimación, debe contarse con tasas promedio de reposición de los diversos materiales y componentes. Estas tasas dependerán del tipo de materiales empleados, de las posibilidades económicas de los ocupantes para llevar a cabo la reposición y de hábitos culturales. En el caso estudiado, la porción más significativa de la energía incorporada se encuentra presente en el hormigón armado y en la mampostería. Estos elementos tienen una muy baja tasa de reposición. Sin embargo, las instalaciones, impermeabilizaciones, pinturas y revestimientos, si bien tienen una incidencia relativa pequeña en la energía incorporada total, su grado de relevancia puede modificarse por altas tasas de reposición. Determinar tasas de reposición de materiales de construcción para nuestro país posibilitará análisis energéticos más precisos.

Otro aspecto importante es la estimación de emisiones de CO₂ a partir del cálculo realizado sobre energía incorporada. En el presente trabajo se asumió que la cantidad de energía para producir un material de construcción en nuestro país puede ser similar a la requerida para producirlo en otro, y por tanto utilizar índices energéticos propios de otras regiones. En este caso fue el Inventory of Carbon and Energy, elaborado en el Reino Unido. Sin embargo, ante la evidente diferencia de la matriz energética entre dicho país y el nuestro, no se consideró adecuado trasladar los datos de emisiones de dióxido de carbono propuestos por dicha base para cada material. Por ello, asociada a la base de índices energéticos, y en función de la matriz energética específica de cada sector, se entiende relevante la generación de una base de datos nacional de emisiones de carbono por material.

Asimismo, se entiende importante la investigación de datos nacionales sobre factores de pérdidas de materiales en obra, y enfocados hacia el análisis de la energía incorporada.

REFERENCIAS

ADALBERTH, Karin. Energy use during the life cycle of buildings: a method. *Building And Environment*, Oxford, p. 317-320. jul. 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 set. 2011.

ADALBERTH, Karin. Energy use during the Life Cycle of Single-Unit Dwellings: Examples. *Building And Environment*, Gran Bretaña, v. 32, n. 4, p.321-329, 1997.

AGOSTINHO, Feni; PEREIRA, Lucas; ORTEGA, Enrique. Support area as an indicator of environmental load:: comparison between ecological footprint, embodied energy. In: *ACADEMIC CONFERENCE FOOTPRINT FORUM*, ., 2010, Colle Val D'elsa. The State of the Art in Ecological Footprint Theory and Applications. Colle Val D'elsa: Simone Bastianoni, 2010. p. 9 - 10.

ALCORN, Andrew. Embodied energy and CO2 coefficients for NZ building materials. Wellington: Centre For Building Performance Research. Victoria University Of Wellington, 2003. 31 p.

ASCIONE, Marco et al. The material and energy basis of Rome: An investigation of direct and indirect resource use through material flow, energy and footprint methods. *Chemsuschem*, Weinheim, v. 1, n. 5, p.450-462, 15 abr. 2008.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. *Materials: engineering, science, processing and design*. Oxford: Elsevier, 2007. 514 p. Disponível em: <books.google.com.uy>. Acesso em: 10 dez. 2010.

ATHENA INSTITUTE. Service life considerations in relation to green building rating systems: an exploratory study. Disponível em: <<http://www.athenasmi.org>>. Acesso em: 10 ago. 2011.

ATKINSON, Carol. Energy assessment of a straw bale building. 2008. 100 f. Tesis (Maestría) - Curso de Estudios Avanzados Ambientales Y de Energía, Departamento de Informática Y Tecnología, University Of East London, Londres, 2008.

BAIRD, George; ALCORN, Andrew; HASLAM, Phil. The energy embodied in building materials: Updated New Zealand coefficients and their significance. Ipenz Transactions, Wellington, p. 46-54. 30 jun. 1997.

BEST FOOT FORWARD (Oxford). *City Limits: A resource flow and ecological footprint analysis of Greater London*. Oxford: Seacourt Limited, 2002.

BLANCO, Alfonso. Eficiencia energética: Una de las herramientas para la mitigación del cambio climático. Proyecto de eficiencia energética. Dirección nacional de Energía y Tecnología Nuclear. Disponível em: <www.presidencia.gub.uy>. Acesso em: 25 nov. 2010.

BOOTH, Douglas. The environmental consequences of growth: steady-state economics as an alternative to decline. Londres: Taylor & Francis, 2006. 3-4 p.

BRUNDTLAND, G. (Ed.). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. New York: United Nations, 1987.

BUCHANAN, Andrew; LEVINE, Bry. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy*, Sd, p. 427-437. 1999.

BULLARD, Clark W.. Net energy analysis: Handbook for Combining Process and Input-Output Analysis. Resources And Energy, North Holland, p. 267-313. 1978. Disponível em: <<http://scholar.google.com.uy>>. Acesso em: 12 maio 2011.

CALIFORNIA. Integrated Waste Management Board. California Environmental Protection Agency. A technical manual for material choices in sustainable construction. Sacramento: Calrecycle, 2000. Disponível em: <www.calrecycle.ca.gov>. Acesso em: 05 dez. 2010.

CANABAL, Cecilia; ACHKAR, Marcel. Energía y cambio climático: Propuesta hacia la construcción de una matriz sustentable. Montevideo: Tradinco S.a., 2005. Disponível em: <www.redes.org.uy>. Acesso em: 3 out. 10.

CAÑO-GUIRAL, Maira. Insumo-Producto en el Sistema de Cuentas Nacionales 1993. Montevideo: Fcea - Udelar, 2000. 74 p.

CASTELLI, Luis; SPALLASSO, Valeria. Planificación y Conservación del Paisaje: Herramientas para la protección del patrimonio natural y cultural. Buenos Aires: Fundación Naturaleza Para El Futuro, 2007.

CETRULO, Fernando. Clusters incubados: evidencia empírica en Uruguay. *Revista de La Facultad de Ciencias Empresariales*, Montevideo, v. 1, n. 6, p.---, 10 jul. 05. Disponível em: <<http://www.ucu.edu.uy/Facultades/CienciasEmpresariales/RevistaFCE/Revista6/articulos/cetrulo.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2010.

CHANI, P.s.; NAJMUDDIN, Patwa; KAUSHIK, Surendran. Comparative Analysis of Embodied Energy Rates for Walling Elements in India. *Journal Of The Institution Of Engineers (india)*, K;olkata, p. 47-50. out. 2003. Disponível em: <[ttp://besharp.archidev.org/](http://besharp.archidev.org/)>. Acesso em: 10 jul. 2011.

COLE, Raymond. Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building And Environment*, Elsevier, p. 335-348. 6 abr. 1998.

CONWAY-SCHEMPF, Noelette. Case study: Economic Input-Output Life Cycle Assessment of Asphalt versus Steel Reinforced Concrete for Pavement Construction. Carnegie Mellon University. Disponível em: <www.ce.cmu.edu/GreenDesign>. Acesso em: 05 dez. 2010.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto. 2006. 445 f. Tesis (Doctorado) - Curso de Ingeniería Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006

CRAWFORD, Robert; TRELOAR, Graham. Validation of the use of australian input-output data for building embodied energy simulation. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 8.,

2003, Eindhoven. Proceedings of the eighth International IBPSA Conference. Eindhoven: Augenbroe And J. Hensen, 2003. p. 235 - 242.

DING, Grace. The development of a multicriteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities. 2004. 341 f. Tesis (Doctorado) - University of Technology, Sidney, 2004.

DIRECCIÓN NACIONAL DE ENERGÍA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR (Uruguay). Balance Energético Nacional 2008. Disponível em: <www.miem.gub.uy>. Acesso em: 20 jan. 2010.

DIRECCIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE (Uruguay). Plan de Acción Nacional en Producción y Consumo Ambientalmente Sostenibles 2010-2015. Montevideo: A Publicarse.

DIXIT, Manish et al. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy And Buildings*, p. 1238-1247. 17 fev. 2010. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/enbuild>. Acesso em: 3 dez. 2010.

FAY, Roger. Comparative life cycle energy studies of typical Australian suburban dwellings. 1999. 491 f. Tesis (Doctorado) - Departamento de Architecture, Building And Planning, University Of Melbourne, Melbourne, 1999. Cap. 1. Disponível em: <<http://dtl.unimelb.edu.au>>. Acesso em: 11 set. 2011.

FAY, Roger; TRELOAR, Graham; IYER-RANIGA, Usha. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Building Research & Information*, Melbourne, p. 31-41. 0 2000.

FLOISSAC, Luc et al. How to assess the sustainability of building construction processes. In: *URBAN RESEARCH SYMPOSIUM*, 5., 2009, Marseille. Disponível em: <<http://go.worldbank.org/P74DFSRCDD0>>. Acesso em: 05 mar. 2010.

FORMOSO, Carlos et al. Material waste in building industry: main causes and prevention. *Journal Of Construction, Engineering And Management*, Porto Alegre, p. 316-325. 1 ago. 2002.

FORSYTHE, Perry. Office Buildings: The importance of "Make Good", Fitout and Recurring Embodied Energy. In: *SB10: INNOVATION AND TRANSFORMATION, NEW ZEALAND SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE*, 10., 2010, Wellington. Proceedings: SB10 Wellington - Innovation and Transformation. Auckland: Na, 2010. p. 1 - 8.

GOEDKOOOP, Mark et al. *SimaPro Database Manual*. The Netherlands: Pré Consultants, 2008. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 5 jun. 2010

GUMASTE, Krishnakedar. Embodied energy computations in buildings. In: *NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ENERGY RESEARCH*, 1., 2006, Bombay. Proceedings of the 1st. National Conference on Advances in Energy Research. Mumbai: Macmillan India, 2006.

GUSTAVSSON, Leif; SATHRE, Roger. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building And Environment*, Östersund, p. 940-951. 7 abr. 2005.

GUSTAVSSON, Leif; PINGOUD, Kim; SATHRE, Roger. Carbon dioxide balance of wood substitution:: comparing concrete and wood-frame buildings. *Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change*, Mansfield, p. 667-691. maio 2006.

HAMMOND, Geoff; JONES, Craig. Inventory of carbon & energy (ICE), 2008. University of Bath. Disponível em: <www.bath.ac.uk/mech-eng/serf/embodied/>. Acesso em: 20 dez. 2009.

HAYNES, Richard. Embodied Energy Calculations within the Life Cycle of Residential Buildings. In: PIA (WA) STATE CONFERENCE - FUTURE PROOFING COMMUNITIES, 2010, Perth. Disponível em: <www.planning.org.au>. Acesso em: 7 jul. 2011.

HEGNER, Simone. Embodied energy for energy efficiency measures: An assessment of embodied energy's relevance for energy saving in the swiss residential building sector. 2007. 84 f. Tese (Diploma) - Curso de Environmental Physics, Departamento de Environmental Sciences, Swiss Federal Institute Of Technology Zurich, Zurich, 2007. Disponível em: <www.up.ethz.ch>. Acesso em: 8 nov. 2010.

HILL, Richard; BOWEN, Paul. Sustainable construction: principles and a framework for attainment. Construction Management And Economics, Londres, p. 223-239. 1997.

HORST, Scot; O'CONNOR, Jennifer; ARGELES, Cristina. Survey on Actual Service Lives of North American Buildings. In: 10TH DBMC - INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 10., 2004, Las Vegas. Proceedings of the 10th DBMC - International Conference on Durability of Building Materials and Components. Saint-martin D'hères: Dr. J.I. Chevalier, 2005. Disponível em: <<http://www.irbdirekt.de/daten/iconda>>. Acesso em: 22 set. 2011.

HUOVILA, Pekka. Sustainable construction in Finland in 2010. Espoo: Vtt, 1999.

IMBODEN, Dieter; JAEGER, Carlo. Towards a sustainable energy future. In: ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Energy: the next fifty years. Paris: OECD Publications Service, 1999. p. 63-94.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 4., 2007. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Ginebra: Ipcc, 2008. 104 p. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 10 dez. 2010.

ITARD, L.. Embodied and operational energy use of buildings. In: CIB W115 CONSTRUCTION MATERIAL STEWARDSHIP, ., 2009, Enschede. Lifecycle Design of Buildings, Systems and Materials. Conference Proceedings. Enschede: Cib, 2009. p. 77 - 84. Disponível em: <cibworld.xs4all.nl>. Acesso em: 14 out. 2010.

KARE, Heera; LOMITE, Sridhar. Impact of construction material on environment: steel and concrete. 2009. 53 f. Tesis (Maestría) - Curso de Gestión Ambiental Y de Calidad, Departamento de Ingeniería, University College Of Boras, Boras, 2009.

KHASREEN, Mohamad; BANFILL, Philip; MENZIES, Gillian. Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A review. Sustainability, Basel, p. 674-701. 18 set. 2009. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/sustainability>. Acesso em: 8 nov. 2010.

KIBERT, Charles. Sustainable construction: green building design and delivery. Sheffield: John Wiley & Sons, 2008. Disponível em: <books.google.com.br>. Acesso em: 05 dez. 2010.

KUHN, Eugenia Aumond. Avaliação da sustentabilidade ambiental do protótipo de habitação de interesse social Alvorada. 2006. 175 f. Tesis (Maestría) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

LALLEMAND, André. Energie, Exergie, Économie, Thermo-Économie. In: JOURNÉES INTERNATIONALES DE THERMIQUE, 13., 2007, Albi. Disponível em: <hal.archives-ouvertes.fr/docs>. Acesso em: 8 nov. 2010.

LAZARUS, Nicole. Potential for reducing environmental impact of construction materials, 2005. Disponível em: <www.bioregional.com>. Acesso em: 02 fev. 2010.

LENZEN, Manfred; WACHSMANN, Ulrike. Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment. Applied Energy, *, p. 119-130. 29 mar. 2003. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 05 dez. 2010.

LEONTIEF, Wassily. Análisis económico input-output. Barcelona: Orbis, 1966. 359 p.

LEVIN, Hal. Systematic evaluation and assessment of building environmental performance (SEABEP). In: BUILDINGS AND THE ENVIRONMENT. INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., 1997, Paris. Buildings and the environment. International conference. Paris: CSTB, 1997. p. 3 - 10.

LEWIS, Helen; GERTSAKIS, John. Design + environment: a global guide to designing greener goods. Sheffield: Greenleaf, 2001. Disponível em: <books.google.com.uy>. Acesso em: 5 dez. 2010.

MARCOS, Micheline Cot. Análise da emissão de CO2 em edificações a través do uso de ferramentas CAD-BIM. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 13., 2009, Sp. XIII Congreso de la SiGraDi.

MILLER, Andrew. Embodied energy: a lifecycle of transportation energy embodied in construction materials. In: CONSTRUCTION, BUILDING AND REAL ESTATE RESEARCH CONFERENCE, 7., 2001, Glasgow. Cobra 2001: Proceedings of the RICS Foundation Construction and Building Research Conference. Glasgow: H. Kelly Y K. Hunter, 2001.

MIMBACAS, Alicia; PAZ, Any; ALBA, Gabriel. Eficiencia energética en edificaciones: Un nuevo desafío, 2008. Disponível em: <www.sau.org.uy>. Acesso em: 05 mar. 2010.

MONTEIRO, Helena; FREIRE, Fausto. Life cycle energy and environmental assessment of alternative exterior wall systems. In: SB10: SUSTAINABLE BUILDINGS AFFORDABLE TO ALL, 10., 2010, Algarve. PORTUGAL SB10: Sustainable Buildings affordable to all - Low cost sustainable solutions. Guimaraes: Bragança, Pinheiro Et Al., 2010. p. 777 - 784.

OFFIN, Maria. Straw bale construction: assessing and minimizing embodied energy. 2010. 84 f. Tesis (Maestría) - Curso de Estudios Ambientales, Queen's University, Kingston, 2010.

OVE ARUP & PARTNERS (Hong Kong). Electrical And Mechanical Services Department. Study on Life Cycle Energy Analysis of Building Construction: Final report. Hong Kong, 2006. 315 p.

ØVERGAARD, Sara. Definition of Primary and Secondary Energy. In: MEETING OF THE LONDON GROUP ON ENVIRONMENTAL ACCOUNTING, 13., 2008, Brussels. Disponível

em: <<http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/londongroup/meeting13.asp?sID=2>>. Acesso em: 12 jan. 2010.

PAULA, Marcos de et al. Potencial da cinza do bagaço da cana de açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campinha Grande*, v. 13, n. 3, p.353-357, 29 out. 2008.

PENDONES, Rafael Ben. Energía de la biomasa. In: JORNADAS TÉCNICAS DE CIENCIAS AMBIENTALES, 1., 2003, Madrid. *Jornadas Técnicas de Ciencias Ambientales*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2004.

PIÑEIRO, P.; GARCÍA-PINTOS, A.. Prácticas ambientales en el sector de la construcción: El caso de las empresas constructoras españolas. *Investigaciones Europeas de Dirección Y Economía de La Empresa*, Vigo, p. 183-200. 6 mar. 2009.

PNUMA - DINAMA - CLAES (Uruguay). *Geo Uruguay 2008*. Montevideo: Programa de Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, 2008. 350 p.

PORTENOY, Renata. Diagnóstico y análisis de la situación actual de Montevideo en relación a la construcción sustentable. Montevideo: International Council For Local Environmental Initiatives, 2009. Disponível em: <www.iclei.org>. Acesso em: 05 mar. 2010.

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA (Uruguay) (Ed.). ANCAP lidera cambios: matriz energética redujo dependencia del petróleo del 57 al 46%. Disponível em: <http://www.presidencia.gub.uy/_web/noticias/2009/09/2009092908.htm>. Acesso em: 29 set. 2009.

PROKOPY, Helen. Portland Cement Association. How does concrete fit in the big picture? Disponível em: <www.cement.org>. Acesso em: 05 dez. 2010.

PULLEN, Stephen. Energy used in the construction and operation of houses. *Architectural Science Review*, Sydney, v. 43, n. 2, p.87-94, jun. 2000.

RAND, Patrick. Comparison of masonry and other cladding materials in terms of embodied energy and carbon dioxide 'costs. In: NORTH AMERICAN MASONRY CONFERENCE, 11., 2011, Minneapolis. 11th NAMC Proceedings: Transforming Traditions. Disponível em <<http://www.dist.unina.it/>>. Acesso em: 8 set. 2011.

RECALDE, Sharon. Evaluación de la participación del usuario en relación a los sistemas constructivos alternativos utilizados: El caso de las cooperativas de vivienda de la IMM. Montevideo: Csic - Udelar, 2003. 147 p.

REES, William. Economic development and environmental protection: an ecological economics perspective. *Environmental Monitoring And Assessment*, The Netherlands, p. 29-45. 1 jan. 2003. Disponível em: <<http://gis.depaul.edu/msioh/geo210/rees.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2011.

REINER, Mark; PITTERLE, Mark; WHITAKER, Michael. Embodied energy considerations in existing Leed credits. Setiembre, 2007. Disponível em: <www.symbiotic-engineering.com>. Acesso em: 6 abr. 2011.

RÓTULO, Daniel. Negociação e implementação dos acordos Brasil-Uruguai pela poluição produzida pela termelétrica de Candiota. In: MOTTA, Paulo. *Novas idéias em administração*. Rio de Janeiro: Ftv, 2006. p. 53-81.

SANTOLI, Livio de. La metodologia LCA per i sistemi impiantistici negli edifici. In: *Gli impianti nell'edilizia eco-sostenibile e bio-compatibile*, 1., 2005, Bologna - Torino. *Gli impianti nell'edilizia eco-sostenibile e bio-compatibile*. *: Aicarr, 2006. p. 69 - 80. Disponível em: <www.beepsitalia.it>. Acesso em: 25 nov. 2010.

SARTORI, Igor; HESTNES, Annegrete. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy And Buildings*, Trondheim, v. 39, n. , p.249-257, 2007.

SATTLER, Miguel et al. Embodied energy in wall subsystems of more sustainable buildings. In: *CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, 26., 2009, Quebec City. *Architecture Energy and the Occupant's perspective*. Quebec: Claude Demers and André Potvin, 2009.

SCHENCK, Rita. LCA for mere mortals: A primer on environmental Life Cycle Assessment. *: Iere, 2000. Disponível em: <www.iere.org>. Acesso em: 01 dez. 2010.

SILVA, Vanessa Gomes da. Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica. 2003. 210 f. Tesis (Doctorado) - Universidade de São Paulo, San Pablo, 2003.

SPERB, Marcia Roig. Avaliação de tipologias habitacionais a partir da caracterização de impactos ambientais relacionados a materiais de construção. 2000. 149 f. Tese (Maestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

STERNER, Eva. Green procurement of buildings: estimation of environmental impact and life-cycle cost. 2002. 185 f. Tesis (Doctorado) - Departamento de Civil And Mining Engineering, Lulea University Of Technology, Lulea, 2002. Disponível em: <<http://www.sbuf.se>>. Acesso em: 14 jul. 2011.

STRUBLE, Leslie; GODFREY, Jonathan. How sustainable is concrete? In: *INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY*, 1., 2004, Beijing. *Proceedings of...*. Ames: Kejin Wang, 2004. p. 201 - 212.

SUSLICK, S.B.; MACHADO, I.F. Non-renewable resources, 2004, in *Earth System: History and Natural Variability*, edited by Vaclav Cilek, in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK, Disponíble en <<http://www.eolss.net>>. Acceso en 5 de noviembre de 2010.

TAVARES, Sérgio. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. 2006. 225 f. Tesis (Doctorado) - Curso de Ingeniería Civil, Universidade Federal de Río de Janeiro, Florianópolis, 2006

THE WORLD BANK. *Fuel for thought: An environmental strategy for the energy sector*. Washington: The World Bank, 2000.

THOMPSON, William; SORVIG, Kim. *Sustainable landscape construction: a guide to green building outdoors*. Washington: Island Press, 2000.

TING, Siu Keih. Optimisation of embodied energy in domestic construction. 2006. 247 f. Tesis (Mestría) - Curso de Ingeniería, Rmit University, Melbourne, 2006.

TRELOAR, Graham et al. Embodied energy analysis of the refurbishment of a small detached building. In: ANZASCA CONFERENCE, 36., 2002, Deakin. Proceedings of 36th ANZAScA Conference. Geelong: M, Dawson, T., Ham, J., Moore, M., Rollo, J. And Treloar, G., 2002. p. 93 - 100.

TRELOAR, Graham. A Comprehensive Embodied Energy Analysis Framework. 1998. 313 f. Tesis (Doctorado) - Departamento de Ciencia y Tecnología,, Deakin University, Melbourne, 1998.

TRELOAR, Graham. Energy analysis of the construction of office buildings. 1995. 137 f. Tesis (Maestría) - Curso de Arquitectura, Departamento de Ciencia y Tecnología, Deakin University, Melbourne, 1995

U.S.A.. Us Energy Information Administration. Department Of Energy. International Energy Outlook 2010. Washington, Dc, 2010. 328 p. Disponível em: <www.eia.gov/oiaf/ieo/index.html>. Acesso em: 7 jun. 2011.

UN-HABITAT. Energy for building: Improving energy efficiency in construction and in the production of building materials in developing countries. New York: United Nations, 1991. 104 p.

UNITED KINGDOM. Bre - Defra. Crown. The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings. Watford: Bre, 2009. 206 p. Disponível em: <www.bre.co.uk>. Acesso em: 5 jun. 2011.

UNITED KINGDOM. Sustainable Construction. Department Of Trade And Industry. Sustainable construction brief 2. Disponível em: <www.bis.gov.uk>. Acesso em: 10 dez. 2010.

URUGUAY. Comisión Social Consultiva - Mesa Energía. Udelar. Situación actual, perspectivas y alternativas energéticas para el Uruguay: Informe Final. Montevideo, 2004. 26 p. Disponível em: <www.rau.edu.uy>. Acesso em: 20 dez. 2010.

URUGUAY. Dirección Nacional de Energía. Estudios de base para el diseño de estrategias y políticas energéticas: relevamiento de consumos de energía sectoriales en términos de energía útil a nivel nacional. Montevideo, 2009. 270 p. Disponível em: <www.dnetn.gub.uy>. Acesso em: 15 jul. 2011.

URUGUAY. Dirección Nacional de Energía. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Política energética 2005-2030. Disponível em: <<http://www.miem.gub.uy>>. Acesso em: 16 abr. 2010.

URUGUAY. Instituto Nacional de Estadísticas. Construcción de Viviendas Nuevas: Índice de Volumen Físico. . Montevideo: ., 2011. 22 p. Disponível em: <www.ine.gub.uy>. Acesso em: 25 set. 2011.

VÁZQUEZ, Mariano. Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2001.

VELDERS, Guus et al. The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. Proceedings Of The National Academy of Sciences, www.pnas.org, p. 4814-4819. 20 mar. 2007.

WEIGHT, David. Whole-life costs: concrete vs steel. Building.co.uk, n. 25, 2006. Disponível em: <www.building.co.uk>. Acesso em: 25 nov. 2010.

WILTING, Harry. An energy perspective on economic activities. 1996. 194 f. Tesis (Doctorado) - University of Groningen, Groningen, 1996.

YANTOVSKI, E. What is exergy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ECOS, 15., 2004, Méjico. Proceedings... . Méjico: R. Rivero Et Al., 2004. p. 801 - 817.

YEO, Donhung; GABBAI, René. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. Energy And Buildings, p. 2028-2033. 23 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.nist.gov>>. Acesso em: 26 set. 2011.

YIN, Robert. Case study research: Design and Methods. 3ª Thousand Oaks: Sage, 2003.

YOURHOME (Australia). Department Of Climate Change And Energy Efficiency. Embodied energy. Disponível em: <www.yourhome.gov.au>. Acesso em: 01 dez. 2010.