



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

Implementación de criterios de sostenibilidad económica, social y medioambiental para la selección de la cubierta en edificios de luces medias.

María Peña Martínez García.

Universitat Politècnica de València.

Departamento de Física Aplicada.

Directores de la Tesis: Dr. Manuel Martín Utrillas, Dr. Jorge Curiel Esparza, Dr. Julián Cantó Perelló.

Septiembre de 2015.

Implementación de criterios de sostenibilidad económica, social y medioambiental para la selección de la cubierta en edificios de luces medias.

Autora: María Peña Martínez García, Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València,

Directores de Tesis:

Dr. Manuel Martín Utrillas, Dr. Jorge Curiel Esparza, Dr. Julián Cantó Perelló.

RESUMEN

La selección de una tipología estructural adecuada para un edificio en la etapa de diseño es un problema complejo, debido a los diferentes factores tangibles e intangibles y a las múltiples alternativas que existen.

Hoy en día la sostenibilidad, definida por el triple principio, que engloba criterios económicos, sociales y ambientales, es cada vez más relevante. Sin embargo, en el sector de la construcción las empresas siguen aplicando herramientas basadas en análisis de costes y beneficios para evaluar proyectos, ignorando o subestimando valores medioambientales o sociales y olvidando el impacto a largo plazo sobre la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras. Además, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de nuevas soluciones industriales con una mayor productividad y un menor impacto, pero la construcción es un sector al que le cuesta innovar y a menudo se siguen aplicando soluciones tradicionales sin considerar las distintas soluciones proporcionadas por la industria.

Los métodos multicriterio se están posicionando cada vez más como herramientas clave, capaces de incorporar cuestiones medioambientales y sociales en el proceso de toma de decisiones. Ya existen herramientas que utilizan métodos de evaluación multicriterio para evaluar la sostenibilidad de los edificios terminados y la sostenibilidad de las estructuras de un tipo determinado, comparándolas con las mejores técnicas disponibles. El objetivo de esta tesis es desarrollar un modelo

híbrido de criterios múltiples, que combina el AHP con el método Delphi y la técnica VIKOR, para aplicar criterios económicos, sociales y ambientales en la selección de una tipología estructural para edificios de luces medias, teniendo en cuenta tanto la etapa de construcción como la de funcionamiento. Utilizando AHP se define una estructura jerárquica, a partir de juicios emitidos por un panel de expertos, con los siguientes niveles: objetivo, criterios, sub-criterios y alternativas. A partir de esta jerarquía, siguiendo también el AHP y con los juicios emitidos por el panel de expertos, se obtiene el vector de prioridad de los sub-criterios respecto del objetivo y la matriz de vectores de prioridad de las alternativas respecto de cada criterio. Para gestionar las encuestas en las que los expertos emiten sus juicios, hasta alcanzar el consenso, se utiliza la técnica Delphi. A partir de los vectores de prioridad, aplicando el método VIKOR, se obtiene la solución de consenso, que es la más cercana a la ideal.

Para la elaboración de esta herramienta se han considerado criterios tangibles como el coste de fabricación y el de transporte y montaje, el impacto de las emisiones y las energías interna y de funcionamiento y criterios intangibles como el coste de mantenimiento de la cubierta, el aspecto estético, la resistencia al fuego y el uso de materiales locales.

Se ha estudiado el caso concreto de un pabellón polideportivo de 17 m de luz, evaluando cinco alternativas: las dos tradicionales de vigas celosía y correas metálicas y vigas y correas prefabricadas de hormigón pretensado y otras tres que aplican las innovaciones tecnológicas desarrolladas por la industria de la construcción: vigas de hormigón prefabricado con cubierta tipo membrana, cubierta metálica autoportante y estructura de madera laminada, obteniéndose como solución óptima la cubierta metálica autoportante. Por último, se diseña una herramienta informática en la que, para cualquier edificio con una luz media, introduciendo datos obtenidos de ofertas de empresas de las cinco alternativas estudiadas, se obtiene la solución de consenso teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad.

La herramienta desarrollada mediante hojas de cálculo servirá de ayuda para elegir una tipología estructural, aplicando criterios de sostenibilidad, para la cubierta de un edificio con una luz media.

ABSTRACT

The choosing of an adequate structural typology for a building in its design stage is a complex problem due to different tangible and intangible factors and the multiple alternatives that exist.

Nowadays sustainability, defined by triple bottom line englobing economic, social and environmental criteria, gains more and more relevance. However, in the construction sector, companies keep applying tools based on traditional bottom line referenced to one metric (financial performance or cost), to evaluate projects, ignoring, or underestimating, environmental or social values and forgetting about long-term impact on quality life of present and future generations. Moreover technological advances allow the development of new industrial solutions with a higher productivity rate and a lower impact, but construction is a sector that struggles to innovate and traditional solutions are still often applied without considering the solutions provided by industry.

Multicriteria methods are being set higher each day as key tools, capable of incorporating environmental and social matters to the decision- making process. Tools using multicriteria evaluation to assess sustainability of finished buildings and sustainability of a certain type of structures already exist. The objective of this thesis is to develop a hybrid method of multiple criteria, combining AHP with the Delphi method and the VIKOR technique, to apply economic, social and environmental criteria in the selection of a structural typology for medium spanned buildings, taking into account both the construction and the operation stages. Using AHP, a hierarchical structure is defined from judgements emitted by a panel of experts, with the following levels: goal, criteria, sub-criteria and alternatives. From this hierarchy, also following AHP and with the judgements emitted by the panel of experts, a priority vector of the sub-criteria with respect to the goal and the priority vectors' matrix of the alternatives with respect to each sub-criterion are obtained. The Delphi technique is used in order to handle the surveys in which experts emit their judgements, until consensus is reached. From the priority vectors, applying the VIKOR method, the compromise solution is reached, being this the closest to ideal.

For the elaboration of this tool, tangible criteria, like manufacturing cost, transport and assembly cost, emissions impact and embodied energy and operating energy; and intangible criteria like roof maintenance cost, aesthetic, satisfactory fireproofing and the use of local materials, have been considered.

The specific case of a 17 m span sports hall in a recreational level has been studied. Five alternatives have been evaluated: both of the traditional Prefabricated concrete and purlins and Steel lattice and purlins options and other three applying technological innovations developed by the building industry: Prefabricated concrete and self-supporting curved system, Self-supporting curved system and Laminated wood and purlins, being the Self-supporting curved system roof option obtained as the optimal solution. Lastly, a computer tool is designed in which, for any medium spanned building, introducing data from companies offering the five studied alternatives, a compromise solution is obtained, taking into account sustainability criteria.

The developed tool will serve as help towards the choosing of a structural typology, applying sustainability criteria for the roof a medium spanned building.

RESUM

La selecció d'una tipologia estructural adequada per a un edifici en l'etapa de disseny és un problema complex, a causa dels diferents factors tangibles i intangibles i a les múltiples alternatives que existeixen.

Avui dia la sostenibilitat, definida pel triple principi, que engloba criteris econòmics, socials i ambientals, és cada vegada més rellevant. No obstant açò, en el sector de la construcció les empreses segueixen aplicant eines basades en anàlisis de costos i beneficis per a avaluar projectes, ignorant o subestimant valors mediambientals o socials i oblidant l'impacte a llarg termini sobre la qualitat de vida de les generacions presents i futures. A més, els avanços tecnològics han permès el desenvolupament de noves solucions industrials amb una major productivitat i un menor impacte, però la construcció és un sector al que li costa innovar i sovint se segueixen aplicant solucions tradicionals sense considerar les diferents solucions proporcionades per la indústria.

Els mètodes multicriterio s'estan posicionant cada vegada més com a eines clau, capaces d'incorporar qüestions mediambientals i socials en el procés de presa de decisions. Ja existeixen eines que utilitzen mètodes d'avaluació multicriterio per a avaluar la sostenibilitat dels edificis acabats i la sostenibilitat de les estructures d'un tipus determinat, comparant-les amb les millors tècniques disponibles. L'objectiu d'aquesta tesi és desenvolupar un model híbrid de criteris múltiples, que combina el AHP amb el mètode Delphi i la tècnica VIKOR, per a aplicar criteris econòmics, socials i ambientals en la selecció d'una tipologia estructural per a edificis de llums mitjanes, tenint en compte tant l'etapa de construcció com la de funcionament. Utilitzant AHP es defineix una estructura jeràrquica, a partir de judicis emesos per un panell d'experts, amb els següents nivells: objectiu, criteris, sub-criteris i alternatives. A partir d'aquesta jerarquia, seguint també el**AHP i amb els judicis emesos pel panell d'experts, s'obté el vector de prioritat dels sub-criteris respecte de l'objectiu i la matriu de vectors de prioritat de les alternatives respecte de cada criteri. Per a gestionar les enquestes en les quals els experts emeten els seus judicis, fins a aconseguir el consens, s'utilitza la tècnica Delphi. A partir dels

vectors de prioritats, aplicant el mètode**VIKOR, s'obté la solució de compromís, que és la més propera a la ideal.

Per a l'elaboració d'aquesta eina s'han considerat criteris tangibles com el cost de fabricació i el de transport i muntatge, l'impacte de les emissions i les energies interna i de funcionament i criteris intangibles com el cost de manteniment de la coberta, l'aspecte estètic, la resistència al foc i l'ús de materials locals.

S'ha estudiat el cas concret d'un pavelló poliesportiu de 17 m de llum, avaluant cinc alternatives: les dos tradicionals de bigues gelosia i corretges metàl·liques i bigues i corretges prefabricades de formigó pretensat i altres tres que apliquen les innovacions tecnològiques desenvolupades per la indústria de la construcció: bigues de formigó prefabricat amb coberta tipus membrana, coberta metàl·lica autoportant i estructura de fusta laminada, obtenint-se com a solució òptima la coberta metàl·lica autoportant. Finalment, es dissenya una ferramenta informàtica en la qual, per a qualsevol edifici amb una llum mitjana, introduint dades obtingudes d'ofertes d'empreses de les cinc alternatives estudiades, s'obté la solució de compromís tenint en compte criteris de sostenibilitat.

La ferramenta desenvolupada servirà d'ajuda per a triar una tipologia estructural, aplicant criteris de sostenibilitat, per a la coberta d'un edifici amb una llum mitjana.

ÍNDICE

ÍNDICE	9
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1.- Motivación	19
1.2.- Definición del problema.....	21
1.3.- Objetivo de la tesis.....	22
1.4.- Método de investigación.....	22
1.5.- Estructura de la tesis.....	23
Capítulo 2. DESARROLLO SOSTENIBLE.....	27
2.1.- Política internacional de sostenibilidad	29
2.2.- Política de sostenibilidad en el seno de la Unión Europea	35
2.3.- Herramientas para evaluar la sostenibilidad	36
Capítulo 3. CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD.....	45
3.1.- Impactos de la Construcción	47
3.2.- Medidas para reducir los impactos.....	50
3.3.- Instrumentos para aplicar las medidas correctoras.....	55
Capítulo 4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	83
4.1.- Modelo de la investigación	85
4.2.- Método Delphi. Cuestionario.....	88
4.3.- Técnicas de evaluación multi-criterio: AHP y VIKOR.....	90
Capítulo 5. OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA	99
5.1. Planteamiento del problema. Objetivo	101
5.2. Establecimiento de criterios y alternativas	102
Capítulo 6. EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS	123
6.1.- Obtención de prioridades para criterios y sub-criterios	125
6.2.- Obtención de prioridades para las alternativas.....	134

ÍNDICE

Capítulo 7. OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CONSENSO	151
Capítulo 8. APLICACIÓN INFORMÁTICA	157
Capítulo 9. CONCLUSIONES	163
Capítulo 10. REFERENCIAS	167
ANEXOS	189
Anexo 1.- Publicación	193
Anexo 2.- Dimensionamiento de elementos estructurales.....	199

LISTADO DE FIGURAS

- Fig. 2.1. Principales hitos del desarrollo sostenible.
- Fig. 2.2. Sostenibilidad.
- Fig. 3.1. Medidas para reducir el impacto en el medio ambiente.
- Fig. 3.2. Etiqueta de Eficiencia Energética.
- Fig. 3.3. Energía de un edificio.
- Fig. 3.4. Programa MIVES EHE.
- Fig. 4.1. Diagrama de flujo del método utilizado.
- Fig. 4.2. Ejemplo de una jerarquía de objetivos / criterios / alternativas.
- Fig. 5.1. Estructura jerárquica.
- Fig. 5.2. Vigas y correas de hormigón prefabricado (HPC).
- Fig. 5.3. Apoyo de vigas en pilar (HPC).
- Fig. 5.4. Ley de momentos flectores en pórticos.
- Fig. 5.5. Perfil metálico de la cubierta.
- Fig. 5.6. Viga prefabricada de hormigón en forma de Y (HPM).
- Fig. 5.7. Vigas de Hormigón prefabricado y cubierta membrana (HPM).
- Fig. 5.8. Perfiles viga en celosía y correas (CAC).
- Fig. 5.9. Modelo de cálculo y leyes de axiles (CAC).
- Fig. 5.10. Unión de cubierta con viga (CMA).
- Fig. 6.1. Vectores de prioridad ω_i de los criterios para cada experto
- Fig. 6.2. Vectores de prioridad ω_i de los sub-criterios para cada experto
- Fig. 6.3. Vector de prioridad agregado ω de los sub-criterios respecto del objetivo.
- Fig. 6.4. Envolverte de la alternativa HPC.
- Fig. 6.5. Envolverte de la alternativa HPM.
- Fig. 6.6. Envolverte de la alternativa CAC.
- Fig. 6.7. Envolverte de la alternativa CMA.
- Fig. 6.8. Envolverte de la alternativa MLC.
- Fig. 6.9. Vectores de prioridad por expertos. Coste de mantenimiento de la cubierta.
- Fig. 6.10. Vectores de prioridad por expertos. Resistencia al fuego.
- Fig. 6.11. Vectores de prioridad por expertos. Uso de materiales locales.

Fig. 6.12. Vectores de prioridad por expertos. Estética.

Fig. 6.13. Matriz de vectores de prioridad de las alternativas.

Fig. 7.1. Distancia de cada alternativa a la solución de consenso.

Fig. 7.2. Comparación de las alternativas con la solución ideal F^* y de consenso F_c .

Fig. 8.1. Entrada de datos.

Fig. 8.2. Resultados.

LISTADO DE TABLAS

- Tabla 3.1.- Procedimientos para Certificación Energética de edificios.
- Tabla 3.2.- Herramientas para valoración de impacto ambiental en edificación.
- Tabla 3.3.- Impactos considerados en VERDE.
- Tabla 4.1.- Escala fundamental de Saaty para comparaciones por parejas.
- Tabla 4.2.- Esquema de comparación por pares.
- Tabla 4.3.- Consistencia media (RCI).
- Tabla 5.1.- Coeficientes de seguridad y Combinación.
- Tabla 5.2.- Características técnicas de vigas y correas (HPC).
- Tabla 5.3.- Características mecánicas del perfil de la cubierta.
- Tabla 5.4.- Características técnicas de los materiales de la viga Y.
- Tabla 5.5.- Características mecánicas de las barras (CAC).
- Tabla 5.6.- Características de los perfiles estructurales (CMA).
- Tabla 6.1.- Cuestionario para valorar criterios y sub-criterios respecto al objetivo de implementar criterios de sostenibilidad en la selección de una cubierta.
- Tabla 6.2.- Escala de 9 puntos.
- Tabla 6.3.1.- Evaluación de resultados de la comparación de criterios.
- Tabla 6.3.2.- Evaluación de resultados de la comparación de sub-criterios.
- Tabla 6.4.- Autovalor $\lambda_{\text{máx}}$ para criterios y sub-criterios.
- Tabla 6.5.- Índice de consistencia CI para criterios y sub-criterios.
- Tabla 6.6.- Relación de consistencia CR para criterios y sub-criterios
- Tabla 6.7.- Vectores de prioridad: criterios respecto del objetivo.
- Tabla 6.8.- Vectores de prioridad: sub-criterios respecto de criterios principales.
- Tabla 6.9.- Vectores de prioridad: sub-criterios respecto del objetivo.
- Tabla 6.10.- Valoración de alternativas según criterios tangibles
- Tabla 6.11.- Resultados de ACV para los materiales de la estructura.

- Tabla 6.12.- Vectores de prioridad de alternativas. Sub-criterios tangibles.
- Tabla 6.13.- Alternativas.
- Tabla 6.14.- Evaluación de alternativas. Sub-criterios no tangibles.
- Tabla 6.15.- Autovalor $\lambda_{\text{máx}}$ para alternativas. Sub-criterios no tangibles.
- Tabla 6.16.- Índice de consistencia CI para alternativas. Sub-criterios no tangibles.
- Tabla 6.17.- Relación de consistencia CR para alternativas. Sub-criterios no tangibles.
- Tabla 6.18.- Vectores de prioridad de alternativas para sub-criterios no tangibles.
- Tabla 6.19.- Matriz de vectores de prioridad de las alternativas.
- Tabla 7.1.- Valores de f^*_i y f^-_i para cada criterio i .
- Tabla 7.2.- Valores de S_j , R_j y Q_j para cada alternativa j .
- Tabla 7.3.- Ranking de alternativas.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACV:	Análisis del Ciclo de Vida
AENOR:	Asociación Española de Normalización y Certificación
AHP:	Analytic Hierarchy Process
AMB:	Medioambientales
BAT:	Best available Techniques
BREEAM:	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
BREF:	Best available Techniques (BAT) Reference
CAC:	Celosía de acero y correas
CED:	Cumulative Energy Demand
CFB:	Coste de fabricación,
CHPtD:	Construction Hazards Prevention through Design
CI:	Consistency Index
CMA:	Cubierta metálica autoportante
CMC:	Coste de mantenimiento de la cubierta
CMDS:	Cumbre mundial sobre desarrollo sostenible
CMMAD:	Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo
CNUMAD:	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo
CNUMH:	Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano
COP3:	Tercera sesión de la Conferencia de las Partes
COP18:	Decimoctava Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CR:	Consistency ratio
CTE:	Código Técnico de Edificación
CTM:	Coste de transporte y montaje
DEI:	Directiva de Emisiones Industriales
EAE:	Instrucción de acero estructural
ECO:	Económicos
EFN:	Energía de funcionamiento
EFQM:	European Foundation for Quality Management
EHE-08:	Instrucción de hormigón estructural
EIA:	Evaluación de Impacto Ambiental
EIN:	Energía interna
EMAS:	Eco-Management and Audit Scheme
EMI:	Impacto de las emisiones
ESI:	Ethibel Sustainability Index

GLOSARIO DE TÉRMINOS

EST:	Estética
FTSE:	Financial Times Stock Exchange
GBCE:	Green Building Council España
GRI:	Global Reporting Initiative
GWP:	Global Warming Potential
HADES:	Herramienta de Ayuda al Diseño de Edificios Sostenibles
HPC:	Hormigón prefabricado y correas
HPM:	Hormigón prefabricado y cubierta tipo membrana
IAIA:	International Association for Impact Assessment
ICES:	Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad
ICLEI:	International Council for Local Environmental Initiatives
INVISIO:	Industrialización de Viviendas Sostenibles
IPPC:	Integrated Pollution Prevention and Control
ISMA:	Índice de Sensibilidad Medioambiental
ISO:	International Organization for Standardization
LEED:	Leadership in Energy & Environmental Design
MCDM:	Multiple-criteria decision-making
MIVES:	Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles
MLC:	Madera laminada y correas
MTD:	Mejores técnicas disponibles
ONU:	Organización de Naciones Unidas
OHSAS:	Occupational Health and Safety Assessment Series
PNUD:	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RCI:	Random Consistency Index
RITE:	Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
RSC:	Responsabilidad Social Corporativa
SFF:	Seguridad frente al fuego
SGA:	Sistemas de gestión ambiental
SOC:	Sociales
UML:	Uso de materiales locales
UNE:	Una Norma Española
VERDE:	Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios
VIKOR:	Vlsekriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje
VLE:	Valores Límite de Emisión
WBCSD:	World Business Council for Sustainable Development
WRI:	World Resources Institute

Capítulo 1.
INTRODUCCIÓN

1.1.- Motivación

Las culturas griega y romana nos legaron una arquitectura que por siglos rigió los principios estéticos y formales de la arquitectura universal. El manual de construcción redactado por Vitrubio en el siglo I a. de C. sirvió de referencia hasta el siglo XIX. En sus diez volúmenes podía estudiarse, desde el comportamiento de los diferentes materiales, hasta la construcción de edificios tan variados como templos, teatros o bibliotecas. Como consecuencia de las necesidades surgidas con la Revolución Industrial, las técnicas constructivas se modificaron gracias a la aplicación de técnicas más racionales y eficaces y a la ayuda de nuevos materiales como el hierro, el gran protagonista de esta nueva arquitectura (Sebastiá, 2007). En la misma época el hormigón, empieza a utilizarse en estructuras de grandes luces. La industria de los elementos prefabricados de hormigón experimenta un paulatino incremento favorecido por la creciente industrialización. La construcción abandona el carácter artesanal de sus comienzos para repetir con el hormigón los procedimientos típicos de la técnica de las estructuras metálicas (Páez, 1989).

Pero el modelo productivo que se originó en la Revolución industrial, basado en el uso indiscriminado de fuentes de energía y de minerales, produjo un gran crecimiento en el consumo de recursos y en la consiguiente generación de residuos (Wadel et al., 2010). Con la aparición del informe Nuestro futuro común (Brundtland, 1987) se introduce el concepto de sostenibilidad y se toma conciencia del problema ambiental.

El 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios: durante la construcción en forma de energía interna y durante su vida útil en forma de energía de funcionamiento. Por lo tanto, la reducción del consumo de energía en el sector de la edificación constituye una parte importante de las medidas necesarias para reducir la dependencia energética de la Unión y las emisiones de gases de efecto invernadero, ayudando así a cumplir con el protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UE, 2010a). En los últimos años ha aumentado el número de artículos que investigan sobre la mejora de la sostenibilidad en el campo del diseño de edificios: Nassar et al. (2003) desarrollan una herramienta

informática que selecciona la mejor solución para los elementos constructivos que componen un edificio: fachada, cubierta, forjados, tabiquería, ventanas y puerta. Turskis et al. (2009) desarrollan un modelo de evaluación para la optimización de fachadas multicapa, Akadiri et al. (2013) seleccionan materiales sostenibles en proyectos de edificios, Collier et al. (2013) evalúan distintas alternativas tecnológicas para cubiertas sostenibles, Kuzman et al. (2013) comparan diferentes tipos de construcción para viviendas pasivas o viviendas de muy bajo consumo de energía.

Dado que estamos en una época de gran concienciación medioambiental, la investigación en la mayoría de estos artículos se centra en conseguir una reducción del consumo energético, sobre todo en el sector residencial y de oficinas, mejorando la eficiencia energética de los materiales que forman parte de las envolventes para reducir las pérdidas térmicas y trasladando los valores de la producción industrial al sector de la construcción para aumentar la calidad del proceso constructivo, y conseguir así una racionalización de los recursos. En los edificios para uso residencial y de oficinas el elemento que más influye es la fachada, (Rakhshan et al., 2013), pero cuando la función a la que va a ser destinado el edificio requiere unas luces mayores de las usadas habitualmente en este tipo de edificios, la decisión más importante es la tipología estructural de la cubierta, no la fachada. La tipología estructural elegida tendrá influencia sobre el resto de los elementos del edificio: estructura vertical, cimentación, cerramientos e instalaciones.

Para conseguir realizar con éxito la arquitectura de principios del siglo XXI, es necesario, desde la misma concepción del proyecto, estudiar, además de la adecuación técnica de las distintas soluciones, la sostenibilidad del edificio a lo largo de toda su vida, desde la extracción de las materias primas hasta su demolición. Y cuando se trata de edificios de luces medias, la estructura de la cubierta es un factor muy importante que es necesario tener en cuenta para conseguir una mayor sostenibilidad.

1.2.- Definición del problema

La elección de una solución constructiva es la decisión más importante con consecuencias a largo plazo (Kuzman et al., 2013) y debe realizarse en términos de sostenibilidad, olvidando la tradicional consideración de una única métrica –coste– y pensando en el “triple principio” (triple bottom line), que se refiere a consideraciones económicas, sociales y medioambientales (Reza et al., 2011).

Por otro lado, la progresiva industrialización, la mejora tecnológica y la innovación, tanto en los materiales como en las técnicas constructivas han permitido desarrollar nuevas soluciones en el diseño de las cubiertas (Walentynski & Cybulski, 2012; Wu et al., 2006; Fan, 2001; La Puebla-Ferri et al., 2009). En todo tipo de infraestructuras, los esfuerzos para conseguir sostenibilidad deben incluir innovación (Cantó-Perelló & Curiel-Esparza 2013). La elección de una solución estructural para la cubierta, en edificios de luces medias, es importante para reducir el consumo de energía y la generación de residuos y es un problema complejo ya que existen múltiples alternativas y criterios de selección formando una intrincada red de elementos interactivos donde las primeras causas y los efectos finales no pueden ser identificados fácilmente. Así por ejemplo, el coste de los materiales depende de la energía utilizada en su fabricación y esa energía determina el impacto en el medio ambiente, el aislamiento térmico influye en el consumo energético y disminuye el impacto en el medio ambiente, la falta de seguridad en las obras puede conllevar pérdidas financieras y retrasos en el contrato... Esta complejidad hace que a menudo sea difícil ponerse de acuerdo sobre qué criterios son más determinantes y qué alternativa es preferible. Además, la construcción es un sector que acepta las innovaciones muy lentamente, por lo que es necesario desarrollar modelos complejos que valoren las soluciones tecnológicas y faciliten la generación y desarrollo de productos comerciales viables (Zavadskas et al., 2013).

Las últimas normativas de estructuras en España (Instrucción de hormigón estructural, EHE-08; Instrucción de acero estructural, EAE y Código Técnico de Edificación, CTE) han incluido consideraciones sobre sostenibilidad, de forma que es posible determinar un índice de sostenibilidad para la estructura, comparándola con las mejores

técnicas disponibles (MTD). Se basan en criterios medioambientales y sociales, pero no tienen en cuenta los criterios económicos. Por otro lado, los edificios terminados están sometidos por ley a una evaluación de eficiencia energética que determina el consumo energético en la etapa de funcionamiento del edificio. Cuando se estudia la eficiencia energética del edificio construido, se tienen en cuenta factores como el aislamiento de fachadas, ventanas y cubierta y la eficiencia de las instalaciones, pero no se estudia la influencia de la estructura.

1.3.- Objetivo de la tesis

Esta tesis doctoral se ha centrado en la obtención de una herramienta que permita implementar criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones para la valoración de estructuras de cubiertas de luces medias en la fase de diseño. Para ello presenta un sistema capaz de considerar el “triple principio” que tiene en cuenta criterios económicos, sociales y medioambientales, en lugar de la tradicional consideración de una única métrica que sólo tiene en cuenta criterios económicos. Se consideran soluciones con distintos materiales: hormigón, acero y madera laminada, estudiando tanto soluciones tradicionales como soluciones desarrolladas en los últimos años por la industria de la construcción. En la evaluación de las distintas tipologías estructurales se tiene en cuenta tanto la fase de construcción como la de uso o funcionamiento, considerando además todo el ciclo de vida de los materiales de construcción.

Como ejemplo, se analiza un pabellón polideportivo escolar. Se ha elegido este caso particular porque en la época actual, las tareas de mejora y construcción de infraestructuras deportivas constituyen un elemento significativo.

1.4.- Método de investigación

Se aplica un modelo híbrido de criterios múltiples y diferentes técnicas, que utiliza un panel de expertos para valorar un conjunto de alternativas. El método propuesto combina el proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) (Saaty, 2012) con la técnica Delphi (Dalkey & Helmer, 1963) y el método VIKOR (Duckstein & Opricovic, 1980). El AHP se utiliza para descomponer un problema complejo en sus partes, ordenar estas partes en un orden jerárquico,

asignar valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable y sintetizar los juicios para obtener las prioridades de cada una de ellas. La técnica Delphi, se utiliza a la hora de gestionar los cuestionarios que proporcionan los juicios del panel de expertos, necesarios para aplicar el AHP y por último, el método VIKOR se utiliza para la evaluación de las distintas alternativas.

Los sistemas multicriterio se han utilizado ampliamente en el análisis de diferentes problemas de construcción y medioambientales. Cómo medir los intangibles es la principal preocupación de las matemáticas del método AHP, tal como se mostrará en esta tesis. Los criterios considerados serán económicos, sociales y medioambientales. Las posibles alternativas incluyen tipologías tradicionales para luces medias, como son celosías metálicas y vigas prefabricadas de hormigón pretensado en forma de doble T, junto con otras soluciones desarrolladas por la industria de la construcción en los últimos años.

1.5.- Estructura de la tesis

La tesis está estructurada en 10 capítulos y dos anexos.

En el capítulo 1 se realiza una introducción en la que se expone el motivo por el que se ha considerado realizar esta tesis, cuál es el motivo por el que no se aplican criterios de sostenibilidad en el momento de seleccionar una tipología estructural, cómo plantea esta tesis solucionar ese problema y por último el método de investigación que se ha seguido.

En el capítulo 2 se estudia el concepto de sostenibilidad, haciendo un repaso a la evolución de la política internacional desde su preocupación inicial por el medio ambiente hasta la consolidación del concepto de sostenibilidad, a través de las distintas conferencias internacionales y de los logros conseguidos en cada una de ellas. A continuación se ve cómo la Unión Europea, siguiendo las pautas marcadas en los acuerdos internacionales, ha integrado las consideraciones medioambientales en su política, y por último, se han realizado un resumen de las herramientas existentes para evaluar la sostenibilidad, tanto a nivel de empresa como de producto.

En el capítulo 3, construcción y sostenibilidad, se reflejan en primer lugar los principales impactos producidos por la construcción en el medio ambiente así como el impacto social más importante en el sector

de la construcción, la seguridad y salud y las medidas que pueden aplicarse para reducir estos impactos. A continuación se exponen los principales instrumentos que existen para aplicar esas medidas: el control reglamentario y la evaluación. En cuanto al control reglamentario se indica la evolución de las Directivas adoptadas por la Unión Europea para solucionar los problemas de sostenibilidad en la construcción y su transposición a la legislación española. En cuanto a la evaluación, se exponen las principales herramientas multi-criterio de evaluación tanto de los edificios terminados como de las estructuras. En este punto se han explicado también conceptos como la energía de un edificio, que es muy importante en las evaluaciones que consideran criterios medioambientales, o el método del Análisis del Ciclo de Vida, que es uno de los métodos más utilizados por las herramientas de evaluación de producto en la construcción.

En el capítulo 4, Metodología de la investigación, se describe el modelo híbrido multi-criterio, combinación del AHP con el método Delphi y la técnica VIKOR, utilizado en esta tesis. A continuación se realiza una breve descripción de cada una de estas técnicas que incluye el objetivo, el origen, sus principales características y cómo se aplica.

En el capítulo 5, Obtención de la estructura jerárquica, se procede a definir el objetivo y establecer los criterios y alternativas utilizando la técnica Delphi para obtener el árbol jerárquico, primera fase del AHP.

En el capítulo 6, Evaluación de criterios y alternativas, utilizando la técnica Delphi y el método AHP, se ha obtenido, en primer lugar, el vector de prioridad de los sub-criterios respecto del objetivo global para el conjunto de expertos. A continuación, se ha estimado la prioridad de las alternativas con respecto a cada sub-criterio, explicando la forma de evaluar las distintas tipologías estructurales cuando se consideran criterios tangibles y utilizando la técnica Delphi y el método AHP cuando los criterios son intangibles.

En el capítulo 7, Obtención de la solución de consenso, se utiliza el método VIKOR para determinar la tipología estructural más adecuada aplicando criterios de sostenibilidad.

En el capítulo 8 se describe una herramienta informática que, empleando hojas de cálculo, permite determinar la solución que mejor cumple los criterios de sostenibilidad entre las cinco alternativas

estudiadas en esta tesis para cualquier caso, aprovechando los vectores de prioridad de criterios y alternativas respecto de criterios intangibles obtenidos en esta tesis.

Por último, en el capítulo 9, se incluyen las conclusiones y en el capítulo 10 las referencias utilizadas en esta tesis.

En el anexo 1 se adjuntan la primera y la última hoja del artículo publicado durante la redacción de esta tesis y titulado “Implementing Sustainability Criteria for Selecting a Roof Assembly Typology in Medium Span Buildings”.

En el anexo 2 se adjunta el dimensionamiento de elementos estructurales realizado para la solución de viga de acero en celosía y correas.

Capítulo 2.
DESARROLLO SOSTENIBLE

2.1.- Política internacional de sostenibilidad

El término desarrollo sostenible fue acuñado en el Informe Brundtland titulado “Nuestro futuro común” (Brundtland, 1987). A él se debe también la definición más utilizada para desarrollo sostenible: es el tipo de desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Para alcanzar un desarrollo sostenible se necesita la cooperación internacional, ya que las decisiones que se adoptan en una parte del mundo pueden afectar a los habitantes de otras regiones. También es necesario adoptar medidas a largo plazo para promover las condiciones mundiales que apoyen este desarrollo. Así pues, las Conferencias de las Naciones Unidas proporcionan una gran oportunidad de avance hacia un futuro sostenible.

Desde el punto de vista medioambiental, las Conferencias más importantes son las celebradas en Estocolmo (1972), Río de Janeiro (1992) y Johannesburgo (2002) (Fig. 2.1). Si bien éstos no han sido los únicos eventos que han tenido lugar en este período, se destacan porque a ellos asistieron representantes de los gobiernos al más alto nivel y porque se centraron en una amplia gama de cuestiones relacionadas con lo que ha llegado a ser conocido como el desarrollo sostenible. Estocolmo se ocupó principalmente del aspecto ambiental, Río de Janeiro se centró en los aspectos ambientales y económicos y el mayor avance realizado en Johannesburgo fue la incorporación de la dimensión social (Fig. 2.2). En estas Conferencias puede apreciarse el cambio de tendencia desde un enfoque puramente ambiental hacia otro más amplio de desarrollo sostenible (Najam & Cleveland, 2004).

Conferencia de Estocolmo (1972)

La Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano, también conocida como Conferencia de Estocolmo, celebrada en 1972, fue la primera gran conferencia de la ONU sobre cuestiones ambientales y marcó un punto de inflexión en el desarrollo de la política internacional del medio ambiente. La Conferencia acordó una Declaración que contiene 26 principios sobre el medio ambiente y el desarrollo, un plan de acción con 103 recomendaciones y una resolución.

2.- DESARROLLO SOSTENIBLE

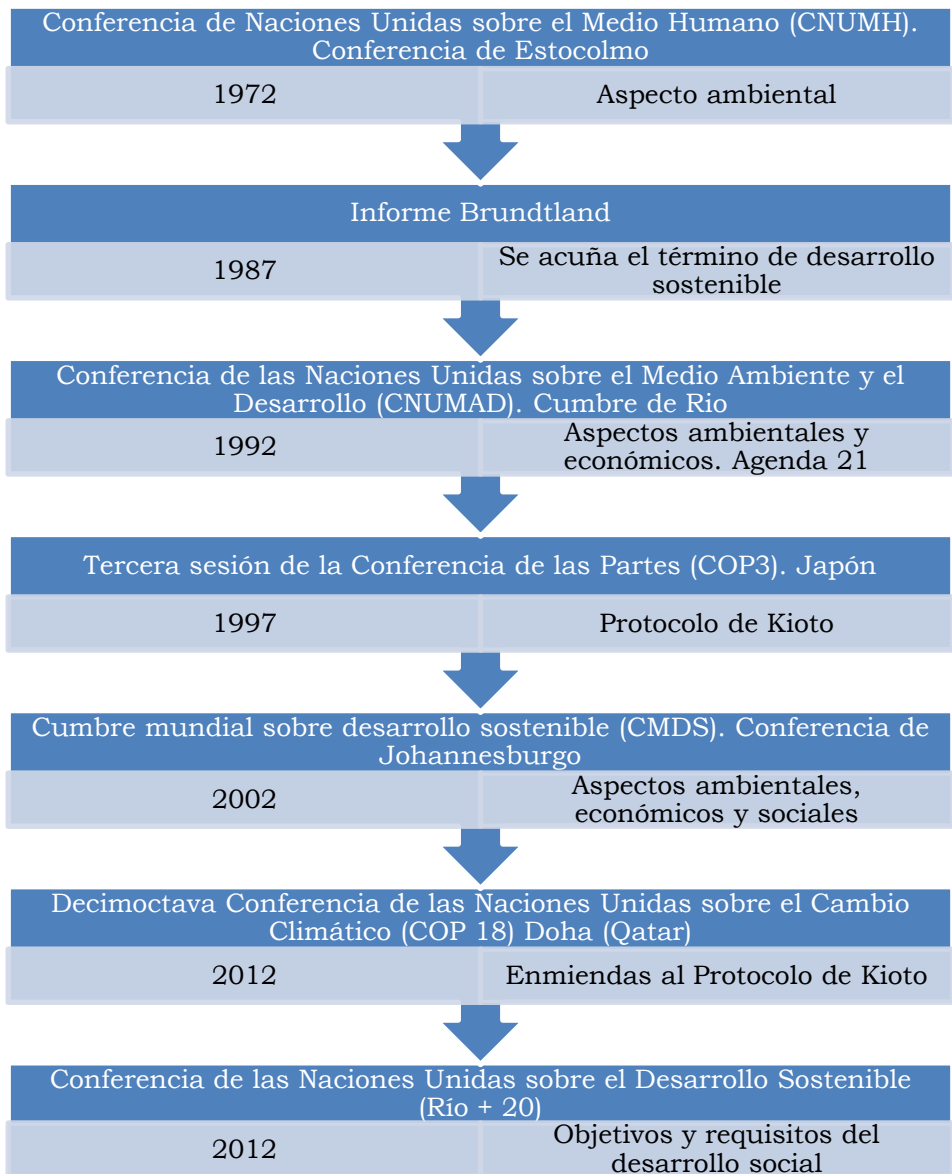


Fig. 2.1. Principales hitos del desarrollo sostenible

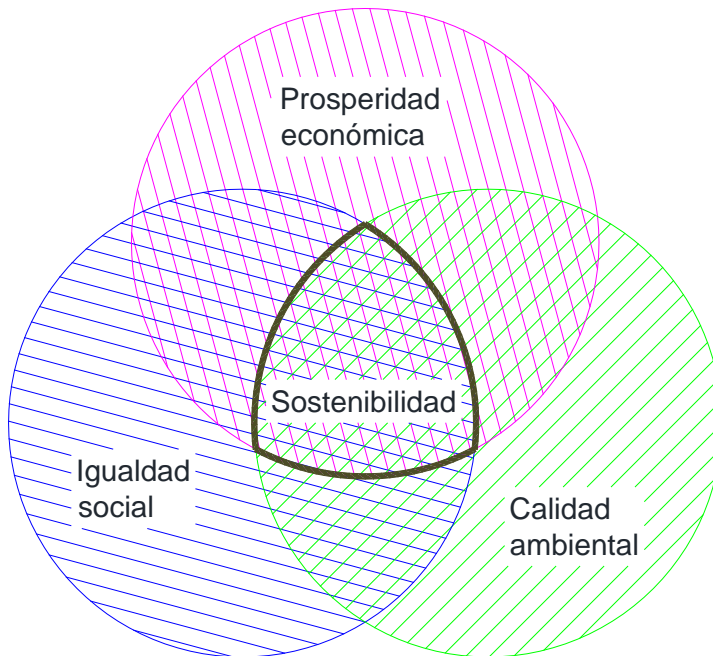


Fig. 2.2. Sostenibilidad

Atenta a la necesidad de un criterio y unos principios comunes que ofrezcan a los pueblos del mundo inspiración y guía para preservar y mejorar el medio humano (Baylis & Smith, 2005; Linnér & Selin, 2003). El principal legado institucional de esta conferencia fue la creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CMMAD). El aumento de la evidencia científica de la degradación ambiental inducida por el hombre y una ola simultánea de creciente conciencia ambiental en los países industrializados de América del Norte y Europa Occidental, fueron los detonantes que llevaron a la Conferencia a un intento de convertir el medio ambiente en un tema más global, sobre todo por la significativa incorporación de los países en desarrollo del Sur en el emergente discurso ambiental global. A pesar de las intensas diferencias Norte-Sur, y posiblemente a causa de ellas, la conferencia se inclinó hacia una más auténtica agenda global que pretendía fusionar la creciente preocupación del Norte sobre la calidad del medio ambiente

y el arraigado interés del Sur en el desarrollo humano. Con el tiempo, el deseo de formular los dos intereses en un marco único llevaría al concepto de desarrollo sostenible (Najam & Cleveland, 2004).

Las conclusiones de esta Conferencia se recogieron posteriormente en el Informe Brundtland titulado "Nuestro futuro común" (Brundtland, 1987), en el que fue acuñado el término desarrollo sostenible.

Conferencia de Río de Janeiro (1992)

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), celebrada en Río de Janeiro en 1992, la ONU pidió ayuda a los gobiernos para replantear el desarrollo económico y encontrar la manera de poner fin a la destrucción de los recursos naturales irremplazables y a la contaminación del planeta. Los gobiernos reconocieron la necesidad de asegurar que todas las decisiones económicas tuvieran en cuenta el impacto ambiental. Al término de la Conferencia, Maurice Strong, Secretario General de la misma, llamó a la Cumbre un "momento histórico para la humanidad". La cumbre de Río, popularmente conocida como la cumbre de la Tierra, fue un hito importante en la consolidación y difusión de la evaluación del impacto ambiental, que es oficialmente reconocida como una herramienta fundamental en la toma de decisiones para una sociedad encaminada a un desarrollo sostenible (Sánchez & Croal, 2012). El logro más importante de la Cumbre de Río podría ser el hecho de poner juntos dos términos, Medioambiente y Desarrollo, que habían estado en conflicto en Estocolmo. La diplomacia mundial adoptó para sus políticas el concepto de desarrollo sostenible, que había sido acuñado 5 años antes en la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. En los veinte años transcurridos desde la de Estocolmo, el interés por el Medio Ambiente se ha incrementado. Ya no preocupa sólo la contaminación debida a los residuos industriales. Problemas como el agujero de Ozono y el cambio climático han entrado de lleno en el campo de la política mundial y la energía se ha convertido en una preocupación importante para la seguridad económica (Najam & Cleveland, 2004). La Agenda 21, que hace referencia al siglo XXI, es uno de los documentos resultantes de esta cumbre. Se trata de un plan de amplio alcance para conseguir el desarrollo sostenible en todo el mundo y consiste en una lista de asuntos que requieren atención. Sus cuarenta

capítulos se agrupan en cuatro secciones (Kubiszewski & Cleveland, 2012):

1. Dimensiones económicas y sociales: países en vías de desarrollo; pobreza; patrones de consumo; población; salud; asentamientos humanos; integración medioambiental y desarrollo.
2. Conservación y gestión de los recursos: atmósfera; tierra; bosques; desiertos; montañas; agricultura; biodiversidad; biotecnología; océanos; agua dulce; productos químicos tóxicos; residuos peligrosos, radiactivos, y desechos sólidos.
3. Fortaleciendo el rol de grupos importantes: mujeres; niños y jóvenes; indígenas; Organizaciones no gubernamentales; autoridades locales; trabajadores; negocios e industria; agricultores; científicos y técnicos.
4. Medios de implementación: finanzas; transferencia de tecnología; ciencia; educación; creación de aptitudes; instituciones internacionales; medidas legales; información.

Conferencia de las Partes (COP3). Protocolo de Kioto (1997)

En la Tercera sesión de la Conferencia de las Partes (COP3), celebrada en Japón en 1997, se adoptó el Protocolo de Kioto, que hasta la fecha es el principal acuerdo internacional en materia de cambio climático. Este Protocolo estableció un compromiso de reducción de gases de efecto invernadero concreto y jurídicamente vinculante para cada país. La Unión Europea y sus estados miembros se comprometieron a reducir las emisiones de CO₂ en el primer periodo de compromiso (2008-2012), en un 8% respecto del año base (1990/1995). España asumió la obligación de que la media de emisiones netas de gases de efecto invernadero en el periodo 2008-2012 no supere el 15% del nivel de emisiones año base (1990/1995). A más largo plazo, de aquí a 2020, sería necesario reducir dichas emisiones entre el 20% y el 40% mediante un acuerdo internacional eficaz (UN, 1998).

En el período 2013-2020, la unión Europea tiene intención de reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero en un 20 % como mínimo con respecto a los niveles de 1990.

Conferencia de Johannesburgo (2002)

La Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible de Johannesburgo (2002) fue el testimonio de que el término Desarrollo Sostenible había ganado aceptación política. Fue convocada para valorar el desarrollo de la sostenibilidad desde la cumbre de Río de 1992 y evaluar la efectividad de Agenda 21. Kofi Annan, Secretario General de la ONU, agrupó en cinco áreas temáticas lo que debían ser puntos clave a discutir en la cumbre:

- (1) Agua y Saneamiento
- (2) Energía
- (3) Salud humana
- (4) Productividad agrícola
- (5) Biodiversidad y la gestión de los ecosistemas

Pero en el período previo a Johannesburgo el mundo había cambiado. Las grandes esperanzas de una nueva era de cooperación ambiental global que se habían encendido en Río, pronto resultaron ser falsas. Los países industrializados del Norte habían permanecido reacios a proporcionar a los países en desarrollo del Sur los recursos y el apoyo que habían comprometido en Río. Además, la esperanza de una cosecha de tratados ambientales globales posterior a Río resultó infundada en estados clave, en particular, aunque no exclusivamente en los Estados Unidos, que se resistió a avanzar en temas clave como el cambio climático. Como resultado, un gran malestar, agravado por el trágico atentado terrorista en los EEUU y por una creciente sensación de inseguridad y violencia en todo el mundo, se había apoderado de la cumbre. La CMDS se diferenció de Estocolmo y Río de Janeiro en que no nació en el optimismo y grandes esperanzas que había acompañado a las cumbres anteriores (Sibley, 2007).

Conferencia de las partes COP18 (2012)

En la conferencia de las partes COP18 que tuvo lugar en Doha (Qatar) en 2012 se adopta un conjunto de enmiendas al Protocolo de Kioto, necesarias para hacer posible el cumplimiento del mismo a partir del 1 de enero de 2013. Así se garantiza la continuidad del único instrumento internacional jurídicamente vinculante existente en estos momentos.

Conferencia de Río + 20 (2012)

En el Documento Final de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río+20), los Jefes de Estado y de Gobierno aclararon los objetivos y requisitos del desarrollo social y enunciaron principios rectores de la política económica verde. En ese Documento Final se dice que "...la erradicación de la pobreza, la modificación de las modalidades insostenibles y la promoción de modalidades de consumo y producción sostenibles, y la protección y ordenación de la base de recursos naturales del desarrollo económico y social son objetivos generales y requisitos indispensables del desarrollo sostenible".

2.2.- Política de sostenibilidad en el seno de la Unión Europea

La consecución de un medio ambiente saludable para los ciudadanos de hoy y de un desarrollo sostenible para las generaciones futuras figura entre los objetivos oficiales de la Comunidad. La mayoría de los problemas del medio ambiente tiene su origen en sectores como la agricultura, el transporte, la energía o la industria. Las nuevas tecnologías y prácticas de gestión pueden ser la respuesta a algunos de esos problemas.

La aplicación de una normativa medioambiental ha conseguido una serie de logros, pero no ha servido para resolver todos los problemas planteados. La necesidad de integrar las consideraciones medioambientales en las demás políticas de la Unión se reconoce por primera vez en el Acta Única Europea y constituye una de las prioridades del V Programa de Medio Ambiente de 1993. El desafío consiste en actuar de manera que puedan cumplirse todos los objetivos comunitarios de forma integrada. En eso consiste precisamente el desarrollo sostenible, un concepto que se refiere tanto al desarrollo social y económico como a la protección del medio ambiente. El desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas que intenten evitar la degradación del medio ambiente puede ser rentable para la industria y, además, genera beneficios de mayor alcance porque crea valor añadido y empleo. La integración plena del medio ambiente en todas las demás políticas comunitarias constituye una empresa a largo plazo. A corto plazo se da prioridad a la Agenda 2000 y a la ejecución del Protocolo de Kioto. En el Consejo Europeo de Cardiff (1998) se comprobó la voluntad

de la Comisión y el Consejo de integrar los aspectos medioambientales en todas las políticas comunitarias y se subrayó la necesidad de evaluar el impacto medioambiental de las propuestas de la Comisión que tengan repercusiones significativas (COM, 1998).

En el VI Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente, denominado «Medio ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos», la Unión Europea define las prioridades y objetivos de la política de medio ambiente europea hasta 2010 y con posterioridad a dicha fecha, y detalla las medidas que se deben adoptar para contribuir a la aplicación de su estrategia en materia de desarrollo sostenible. El VI Programa cubre el período comprendido entre el 22 de julio de 2001 y el 21 de julio de 2012 y se concentra en cuatro ámbitos de acción prioritarios: el cambio climático, la biodiversidad, el medio ambiente y la salud y la gestión sostenible de los recursos y de los residuos. El objetivo a corto plazo, en el ámbito del cambio climático, es alcanzar los objetivos del Protocolo de Kioto. Para lograrlo la Comunidad plantea integrar los objetivos del cambio climático en las políticas de energía y transporte, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mejorando la eficiencia energética, utilizar energías renovables y ahorrar energía. En el ámbito de la biodiversidad propone fomentar el desarrollo sostenible de los bosques y proteger los suelos. Para alcanzar una calidad del medio ambiente que contribuya a garantizar la salud pública propone actuar sobre la legislación relativa al agua, el aire, los residuos y el suelo, garantizar la aplicación de las normas sobre calidad del aire y sobre el ruido. Por lo que se refiere a los residuos, el objetivo es reducir su cantidad final en un 20 % de aquí a 2010 y en un 50 % para 2050. Para lograr este objetivo es necesario establecer una jerarquía de prioridades, diseñar una estrategia de reciclado de residuos, mejorar la gestión de los residuos e invertir en la prevención cuantitativa y cualitativa (COM, 2001).

2.3.- Herramientas para evaluar la sostenibilidad

El camino hacia la sostenibilidad recorrido mediante acuerdos internacionales se ha visto reflejado en la política de las empresas sobre sostenibilidad, incorporando éstas a su gestión, además de los tradicionales aspectos económicos, primero aspectos medioambientales y con posterioridad aspectos sociales. Actualmente existen herramientas

orientadas a todos los sujetos de la actividad económica: gobiernos, empresas, instalaciones y productos.

2.3.1. Herramientas orientadas a empresas y organizaciones

El desarrollo sostenible sólo es posible si las empresas, como principales motores de la economía, incorporan la sostenibilidad a su política. Se entiende como Sostenibilidad Corporativa la consideración sistemática de las cuestiones ambientales y sociales para integrarlas en la gestión económica de una empresa con el fin de obtener beneficios competitivos y financieros (Shrivastava & Stuart, 1995).

Existen numerosas herramientas para evaluar la sostenibilidad de las empresas. La mayor parte de las normas cubren sólo un pequeño dominio dentro del alcance total de la sostenibilidad. Estándares como ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001, por ejemplo sólo se centran en la calidad, medio ambiente y la seguridad y salud respectivamente. Tras el cambio de la calidad del producto a la Calidad Total, en las organizaciones surge una demanda creciente para gestionar los impactos ambientales y sociales en una gestión de calidad moderna que se basa en los valores relativos a la organización, al medio ambiente y a la responsabilidad social. En este contexto, la Fundación Europea para la Gestión de la Calidad pone en marcha el "marco EFQM para la RSC". Dentro de esta abundancia de normas relacionadas con la sostenibilidad, la publicación de la guía ISO 26000, proporciona una pauta generalizada y holística internacional, que rompe el punto muerto percibido en ese momento (Maas & Reniers, 2014).

Actualmente, muchas empresas están preocupadas por valores como la integridad y sienten que deben cumplir con el "triple principio" que expresa las expectativas de las partes interesadas con respecto a la contribución de la empresa a los beneficios, el planeta y las personas, pero esta preocupación sólo será percibida correctamente por el público, si su creación de valor social y ambiental es transparente. Una forma de mejorar esa transparencia es someterse a una evaluación comparativa por parte de institutos independientes (Graafland et al., 2004).

Sistemas de gestión ambiental (SGA)

Un sistema de gestión ambiental (SGA) es una herramienta potencialmente aplicable en todo el mundo por cualquier tipo de organización con el fin de mejorar la gestión de ciertos aspectos ambientales tales como el registro y uso de la información, el conocimiento y la aplicación de los requisitos de autorización y el mantenimiento de la planta, para así alcanzar una mejora continua del comportamiento ambiental. EMAS III e ISO 14001 son las principales normas para implementar un SGA y obtener una certificación medioambiental. La ISO 14001 es una norma internacional diseñada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la EMAS III (Eco-Management and Audit Scheme) es una norma europea de gestión y auditoría medioambientales que está regulada por el Reglamento Europeo CE 1221/2009. Los Estados miembros y las autoridades locales apoyan la adopción de EMAS e ISO 14001 a través de incentivos como la extensión de la duración del permiso ambiental, la reducción del número de inspecciones o el beneficio fiscal. La adopción de la norma ISO 14001 parece conseguir mejoras principalmente en la fase inicial de implementación. Al ser una regulación privada, parece que las empresas pretenden conseguir una certificación internacional que corresponda a las inversiones ecológicas realizadas y que responde a presiones externas. Por el contrario, las organizaciones que optan por el EMAS entran en un proceso que está fuertemente influenciado por la participación de las autoridades competentes en las fases de verificación, lo que produce una presión más fuerte hacia mejoras tangibles y continuas en el desempeño ambiental (Testa et al., 2014). Parece que las dos normas se encuentran en una situación de enfrentamiento en el presente, pero que podrían ser complementarias en el futuro (Neugebauer, 2012).

Análisis de riesgos ambientales

En el campo de los instrumentos para la gestión ambiental, el concepto de riesgo está cobrando un protagonismo creciente, en particular en los estudios ambientales previos, preceptivos para la autorización de instalaciones industriales (AENOR, 2008). En la Directiva 2004/35/CE se introduce el concepto de “quien contamina paga y repara” por el que los operadores de las actividades deben constituir las garantías financieras necesarias para devolver los recursos naturales que puedan

dañarse a su estado original. La cuantía de las garantías financieras se establecerá teniendo en cuenta los informes de análisis de riesgos medioambientales que los operadores deben elaborar. En los informes de riesgos ambientales se determinan los posibles escenarios de riesgo medioambiental de las instalaciones combinando la probabilidad de que ocurra y el potencial daño al entorno medido en términos de su extensión, intensidad y temporalidad. El valor del riesgo obtenido para los diferentes escenarios aporta una información muy útil a la hora de priorizar las actuaciones de evaluación y gestión de los riesgos. El análisis de riesgos medioambientales se realizará según el esquema establecido en la norma UNE 150008:2008 (Carretero Peña, 2009). Esta norma define el riesgo medioambiental como el resultado de una función que relaciona la probabilidad de ocurrencia de un determinado escenario de accidente y las consecuencias negativas del mismo sobre el entorno natural, humano y socioeconómico.

Certificados de Seguridad y Salud en el Trabajo

Los certificados de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) se han multiplicado en todo el mundo en los últimos años. La certificación OHSAS 18001, de AENOR, es una herramienta para evaluar la adecuación de la política de SST en las empresas.

Las empresas implantan y certifican un Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo con tres objetivos: disminuir la siniestralidad laboral con el consiguiente aumento de la productividad; cumplir la legislación en materia de prevención, integrando ésta última en los procesos de la organización y por último, fomentar una cultura preventiva.

Modelo de excelencia EFQM

El modelo de excelencia de la Fundación Europea para la Gestión de la Calidad (European Foundation for Quality Management, EFQM) surge en la década de los ochenta y ha sido especialmente aceptado en Europa en los últimos años. Esta fundación define el modelo EFQM de Calidad y Excelencia como vía para la autoevaluación y la determinación de los procesos de mejora continua en entornos empresariales tanto privados como públicos. El modelo de excelencia EFQM es un marco no prescriptivo basado en nueve criterios. Cinco de ellos podrían agruparse en una categoría denominada “agentes”

(liderazgo, personas, política y estrategia, alianzas y recursos, y procesos) y cuatro en el grupo de "resultados" (resultados en las personas, en los clientes, en la sociedad y resultados clave). Existe una relación dinámica entre los agentes y los resultados, la excelencia en los primeros será visible en los segundos. El modelo EFQM a través de una auto-evaluación inicial permite a la organización identificar sus puntos fuertes y sus puntos débiles y culmina con la realización de acciones de mejora. En una siguiente fase puede solicitarse una evaluación externa por un organismo independiente acreditado por la EFQM (Sánchez et al., 2006).

Sistemas de responsabilidad social corporativa

La responsabilidad social corporativa (RSC) se ha convertido en una tendencia mundial difundida a través de sociedades comerciales, estados, organizaciones internacionales y organizaciones de la sociedad civil (Sahlin-Andersson, 2006). El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD de sus siglas en inglés) describe la RSC como "el compromiso de las empresas para contribuir al desarrollo económico sostenible, trabajando con los empleados, sus familias, la comunidad local y la sociedad en general para mejorar su calidad de vida". Sin embargo el concepto de RSC se aplica de manera diferente según el contexto social, económico, cultural, jurídico y político (Gjølborg, 2009). Esto, unido a la falta de datos comparables a nivel de empresa hace difícil la comparación de las prácticas de RSC en las distintas organizaciones. Como suele ocurrir con los movimientos y tendencias en la actual cultura de gestión global, los consultores han desarrollado distintas normas, marcas e índices que sirvan de referencia para evaluar la RSC.

La norma SA8000 ofrece a las empresas la oportunidad de medir su responsabilidad al gestionar sus cadenas de suministro en relación con los derechos humanos de los trabajadores. Desarrollado por Social Accountability International en 1997, el SA8000 está basado en acuerdos de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Declaración Universal de Derechos Humanos y la Convención de la ONU sobre los Derechos del Niño. Está modelado de acuerdo con la ISO 9000 y cubre las siguientes áreas: compensación, medidas disciplinarias, trabajo infantil, trabajo forzado, salud y seguridad en el

trabajo, libertad de asociación, discriminación, horario de trabajo y los sistemas de gestión (Giannarakis, 2011).

La norma ISO 26000 no es una norma de sistema de gestión ni pretende servir para propósitos de certificación. Proporciona orientación sobre los principios, materias fundamentales y asuntos que subyacen en la responsabilidad social y sobre las maneras de integrar un comportamiento socialmente responsable en una organización. La ISO 26000 considera siete principios de responsabilidad social. Una organización debería rendir cuentas sobre sus impactos en la sociedad, la economía y el medio ambiente; ser transparente en sus decisiones y actividades que impactan en la sociedad y el medio ambiente; tener un comportamiento ético; respetar, considerar y responder a los intereses de sus partes interesadas; aceptar que el respeto al principio de legalidad es obligatorio; respetar la normativa internacional de comportamiento y por último, respetar los derechos humanos (AENOR, 2012).

Índices de sostenibilidad

La evaluación de la sostenibilidad de las empresas es una práctica cada vez más relevante sobre todo porque el mercado de capitales y otros mercados prestan cada vez mayor atención al tema. Recientemente, los índices se han convertido en una forma de evaluación importante y hoy en día existe una gran variedad de organizaciones y proveedores de servicios financieros que realizan sus propias clasificaciones (Windolph, 2011). El Dow Jones Sustainability Index, surge en 1999 como el primer índice mundial que analiza el comportamiento de empresas que aplican criterios de sostenibilidad a la gestión. Dow Jones Sustainability Index selecciona, entre las 2.500 mayores compañías del mundo, aquellas que superan a sus competidores en términos de sostenibilidad según criterios económicos, ambientales y sociales.

Otros índices de referencia internacional son FTSE 4 GOOD y Ethibel Sustainability Index. El FTSE 4 GOOD, creado en 2001, pertenece a la familia de índices éticos creada por Financial Times Stock Exchange (FTSE) e incluye aquellas empresas que cumplen los criterios éticos, sociales y medioambientales fijados por FTSE. Estos criterios se fijan en colaboración con distintas organizaciones sociales. Los criterios sociales de selección de valores de FTSE 4 GOOD están basados en principios

internacionales generalmente aceptados. El Índice de Sostenibilidad Ethibel, lanzado en 2002 por una agencia consultora independiente, se compone de cuatro índices regionales, ESI Global, ESI Américas, ESI Europa y ESI Asia-Pacífico. El ESI Global rastrea 162 empresas en 19 países diferentes. La selección de las empresas se basa en un conjunto de criterios positivos, que examinan las empresas mejores en el sector y las mejores en la región. La metodología de selección e investigación se centra en dos elementos: (1) el desarrollo sostenible, que orienta la investigación hacia políticas y aspectos ambientales, sociales, tanto internos como externos, económicos y éticos; (2) participación de los interesados, que se traduce en un diálogo a lo largo de la investigación entre ESI y las partes interesadas (Hoti et al., 2008).

Memorias de sostenibilidad

La integración estratégica de la RSC en las organizaciones implica la comunicación con sus grupos de interés. Aunque son posibles muchos medios de comunicación, las memorias de sostenibilidad son la herramienta más utilizada por las empresas para presentar su impacto económico, ambiental y social. La comunicación de actitudes de RSC está inexorablemente ligada a la existencia de un comportamiento responsable o, al menos, a tener algunos hechos de responsabilidad social para comunicar. Existen varios organismos internacionales encargados de promover la RSC. El Global Reporting Initiative (GRI) es ampliamente reconocido como el marco más fiable para la divulgación de información sostenible. GRI ha desarrollado el principal estándar de guías para la presentación de memorias de Sostenibilidad. En 2000 publicó el primer conjunto de Guías G1. En 2013 se publica el último conjunto G4. Entre otros aspectos, el G4 mejora la información sobre gobernabilidad, ética e integridad, la cadena de suministro, la corrupción y la lucha contra las emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de que no es un requisito, un gran número de empresas certifican las memorias por un tercero independiente. El uso de las directrices GRI está en continuo crecimiento (Fernández-Feijoo et al., 2014).

2.3.2. Herramientas orientadas al producto

Pero si una empresa quiere avanzar más en el camino de la sostenibilidad, además de una gestión sostenible debe implantar

también herramientas orientadas al diseño de los productos y de los procesos.

Análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) es un método que sirve para comprender mejor y así poder tratar los impactos asociados con un producto. El ACV trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales, como el uso de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones, de un producto a lo largo de su ciclo de vida (de la cuna a la tumba). Con este método pueden compararse productos diferentes que cumplan las mismas funciones.

La norma básica para realizar el análisis del ciclo de vida (ACV) fue publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) como ISO 14040 a ISO 14042 en 1996 y reorganizada, en gran parte sin cambios, en las normas ISO 14040 a ISO 14044 en 2006.

Generalmente el ACV no considera los aspectos económicos o sociales de un producto, pero a éstos también se les pueden aplicar los métodos descritos en las normas ISO correspondientes (AENOR, 2006).

Ecodiseño

El ecodiseño pretende integrar las consideraciones medioambientales en el desarrollo de productos con el objetivo de minimizar los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida del producto, sin perjuicio de otros criterios esenciales tales como el rendimiento, la funcionalidad, la calidad y el costo. La aplicación del Ecodiseño es esencial para las empresas que han reconocido que la responsabilidad del producto relacionada con el medio ambiente es vital para conseguir sostenibilidad a largo plazo, ya que promueve la innovación, la mejora de la calidad y de la imagen, el cumplimiento legal, el costo y la reducción de riesgos, el desarrollo de nuevos mercados, etc. De acuerdo con la norma ISO 14006:2011, todas las organizaciones pueden beneficiarse del ecodiseño, con independencia de su tamaño, ubicación y cultura corporativa y de la sofisticación de sus sistemas de gestión. (Pigosso et al., 2013).

La norma UNE-EN ISO 14006:2011 proporciona directrices para ayudar a las organizaciones a establecer, documentar, implementar, mantener y mejorar de forma continua su gestión del ecodiseño como parte de un

sistema de gestión ambiental (SGA). Se aplica a aquellos aspectos ambientales relacionados con el producto en los que la organización pueda tener control o influencia. (AENOR, 2011).

Etiquetado ecológico

El objetivo de los programas nacionales e internacionales de ecoetiquetado es animar a los consumidores a elegir los productos menos dañinos para el medio ambiente. En general, las organizaciones a cargo de programas de ecoetiquetado, afirman que utilizan un método multi-criterio basado en el análisis del ciclo de vida para definir la etiqueta apropiada para cada categoría de producto (Lavallée & Plouffe, 2004).

La ISO ha publicado tres normas para definir diferentes tipos de etiquetas ecológicas. Las etiquetas ecológicas tipo I, se rigen por la ISO 14024 y son programas voluntarios y multi-criterio de certificación por tercera parte independiente que concede etiquetas a los productos que reducen los efectos ambientales adversos, frente a otros de la misma categoría, basándose en consideraciones del ciclo de vida. Las etiquetas tipo II son autodeclaraciones que hacen los propios fabricantes y las tipo III son declaraciones ambientales que dan información cuantitativa basada en indicadores sobre productos.

Ejemplos de Etiquetado ecológico tipo I son la Etiqueta Ecológica Europea, regulada por el Reglamento CE/1980/2000, la Marca Aenor Medio Ambiente, la certificación alemana Ángel Azul y la estadounidense Green Seal. Es muy recomendable que el sector de la construcción utilice materiales poseedores de ecoetiqueta debido a que se está contribuyendo a una construcción sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Capítulo 3.
CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

Con el fenómeno del calentamiento global alcanzando niveles alarmantes, se considera que la industria de la construcción tiene una responsabilidad importante en la reducción de las emisiones de carbono debido al consumo intensivo de combustible y a la gran proporción de emisiones de carbono de la industria. Además, en todo el mundo, las obras siempre se han considerado uno de los lugares de trabajo más inseguros y propensos a accidentes de todas las industrias (Wai Wong et al., 2014). Estudios recientes indican que la demanda de instalaciones con bajo impacto ambiental es cada vez mayor. El aumento del coste de la energía y la creciente preocupación ambiental son los catalizadores del aumento de esta demanda. Los beneficios para la salud ambiental y humana de los edificios sostenibles han sido ampliamente reconocidos. Un ligero aumento del coste inicial de alrededor del 2% para mejorar la sostenibilidad del edificio, supone un ahorro de aproximadamente el 20% del coste total del edificio en todo su ciclo de vida. De ahí que los edificios sostenibles sean también viables económicamente (Azhar et al., 2011). Este ahorro económico es debido al aumento de la productividad de los empleados, al incremento de los beneficios producido por las mejoras en la seguridad y salud y al ahorro en los costes de energía, mantenimiento y funcionamiento (Ries et al., 2006).

3.1.- Impactos de la Construcción

De acuerdo con la Declaración de Tokio (Brundtland, 1987), la sostenibilidad requiere la conservación de las fuentes medioambientales como el aire puro, el agua, los bosques y los suelos, el mantenimiento de la diversidad genética y la utilización eficaz de la energía, el agua y las materias primas. Debe mejorarse la eficacia de la producción para reducir el consumo per cápita de los recursos naturales y alentar así un cambio hacia productos y tecnología no contaminantes y que produzcan pocos desechos.

En 1993, el Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute, WRI), en colaboración con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), realizó una revisión de la situación del medio ambiente mundial. Los datos obtenidos indicaban que se había llegado a una etapa crítica de la degradación en tres áreas: erosión del suelo,

que disminuye la capacidad de producción de alimentos, pérdida de bosques y acumulación de contaminantes y gases de efecto invernadero en la atmósfera. Aunque sea menos crítico, el estudio también detecta un agotamiento de los minerales y los recursos energéticos fósiles. Después de este estudio, el WRI indica que es crucial examinar todas las actividades para determinar cómo podría lograrse la sostenibilidad. La industria de la construcción contribuye de forma significativa a cada uno de los problemas del planeta detectados por el WRI (WRI, 1992):

- Pobreza debido a la pérdida de suelo agrícola por la explotación de canteras y minas para la obtención de materias primas utilizadas en la construcción.
- Pérdida de biodiversidad debido a la explotación no sostenible de bosques para la obtención de madera y otras materias primas, e indirectamente por la contaminación atmosférica y del agua.
- Contaminación atmosférica a todos los niveles: a escala local a través de las emisiones de polvo, fibras, partículas y gases tóxicos, a nivel regional a través de las emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre en la producción de materiales de construcción y a escala global por la emisión de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.

La Construcción es un sector que genera un importante impacto ambiental y que hace uso de grandes cantidades de energía y de recursos materiales. El 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios. La industria de la construcción consume hasta un 60% de las materias primas extraídas de la tierra y la transformación de estas materias primas en los materiales de construcción genera aproximadamente el 50% de las emisiones atmosféricas de CO₂. Un ejemplo es la fabricación de cemento, que genera entre el 3 y el 5% de todas las emisiones atmosféricas de CO₂ en todo el mundo (Worldwatch Institute, 2005).

En España, la construcción y el uso de los edificios, en el contexto del total de impactos de la sociedad, supone aproximadamente la tercera parte del consumo de energía, principalmente no renovable, de la generación de emisiones de CO₂ de efecto invernadero, de las extracciones de materiales de la corteza terrestre y de los residuos sólidos generados y una parte importante del agua potable consumida (Wadel et al., 2010).

La energía se relaciona con el desarrollo sostenible como fuente de estrés ambiental, como motor principal del crecimiento macroeconómico, y como requisito previo para satisfacer las necesidades humanas básicas. Estas tres dimensiones se corresponden con las tres dimensiones del desarrollo sostenible: los factores ambientales, económicos y sociales. Ya en el Plan de Acción aprobado en la Conferencia de Estocolmo, tres de las recomendaciones hacían referencia a la energía: la recomendación 57 pidió al Secretario General de la ONU que tome medidas para garantizar la correcta recogida, medición y análisis de datos relativos a los efectos ambientales del uso de la energía y de su producción. La recomendación 58 pidió un mejor intercambio de información sobre la energía, buscando mecanismos para acceder a la información y a los datos existentes, sobre todo sobre las consecuencias ambientales de los diferentes sistemas de energía. La recomendación 59 pidió que se llevara a cabo un estudio integral con el objetivo de presentar un primer informe sobre las fuentes de energía disponibles, nuevas tecnologías y tendencias de consumo, con el fin de ayudar a proporcionar una base para el desarrollo eficaz de los recursos energéticos del mundo, teniendo en cuenta los efectos ambientales de la producción y uso de energía (Najam & Cleveland, 2004).

Como se ha visto en el capítulo anterior, los aspectos sociales fueron los últimos en incorporarse al concepto de sostenibilidad. El aspecto social más importante en la industria de la construcción es garantizar la salud y la seguridad en las obras. La construcción es uno de los sectores más peligrosos en términos del número total de víctimas mortales (Korman, 2001).

Así pues, los principales impactos de la construcción son:

- Consumo de energía
- Agotamiento de recursos
- Generación de Residuos
- Emisiones a la atmósfera
- Pérdida de suelo
- Siniestralidad en la construcción

3.2.- Medidas para reducir los impactos

Para reducir el impacto ambiental de una construcción puede actuarse en primer lugar en la fase de planificación, eligiendo la mejor ubicación, realizando una valoración para conocer los materiales e instalaciones más adecuados en la fase de diseño y reduciendo los consumos y emisiones tanto en la fase de construcción como en la de uso.

La ubicación de un edificio tiene incidencia en el uso del suelo y la urbanización impactará de manera destructiva en los sistemas naturales que existen en la zona, reduciendo la calidad ecológica del suelo. Por eso es importante reducir el uso de la tierra virgen y desarrollar zonas en desuso o degradadas. En la fase de diseño también es importante la elección de los materiales. Cuando la vida útil de un edificio llega a su fin, todos los materiales utilizados en su construcción son a menudo convertidos en escombros, de manera que grandes cantidades de materiales de construcción desechados (alrededor del 50%) se destinan a vertedero. El uso de materiales ecológicos junto con el uso de materiales reciclados o reciclables reduce el impacto ambiental (San José Lombera & Garrucho Aprea, 2010).

Pero no existe una definición universalmente aceptada para materiales de construcción ecológicos. Debido a esta incertidumbre, se han puesto en el mercado algunos materiales con una declaración genérica de ecológicos, pero sin ninguna prueba para fundamentar esa afirmación o incluso con afirmaciones engañosas. En muchas ocasiones el carácter ecológico de los materiales se ha asociado a ser natural. Sin embargo, es más correcto definir como material de construcción ecológico aquél que no es peligroso para la salud humana, es decir, que no da lugar a efectos negativos en términos de calidad del aire interior. En particular, no debe causar contaminación interior (compuestos orgánicos volátiles, dispersión de fibras peligrosas, emisiones de radón, proliferación de contaminantes biológicos) ni condiciones ambientales interiores incómodas (por ejemplo, presencia de humedad). Partiendo de la base de que no existe ningún material con impacto cero, en el proceso de diseño deben elegirse los materiales más ecológicos entre los que están disponibles en el mercado, sobre la base de las mejores tecnologías disponibles (Franzoni, 2011).

Otra forma eficiente de actuar sobre la sostenibilidad para la industria de la construcción, es mejorar la capacidad de los materiales para mantener sus propiedades a lo largo del tiempo, es decir, su durabilidad. Al aumentar la vida útil del edificio se reduce el impacto producido por las obras de demolición y de reconstrucción. A veces, la durabilidad puede ir unida a la reutilización de productos de desecho de otras actividades industriales. Por ejemplo, el uso de materiales de desecho, como cenizas volantes y escorias de hierro, como sustitutos del cemento en la producción del hormigón, aumenta la durabilidad del mismo, con lo que se cumplen simultáneamente ambos propósitos. Ciertas tecnologías como la construcción modular podrían facilitar la sustitución parcial de los materiales defectuosos y mejorar con ello la durabilidad de la construcción (Peris Mora, 2007).

En lo relativo a las estructuras, las normativas correspondientes establecen en su articulado requisitos para mejorar la durabilidad, tanto en la fase de diseño como en la de manufactura. La durabilidad de una estructura de hormigón se mejora mediante la elección de una calidad de hormigón, un recubrimiento y una abertura de fisura máxima adecuados a la agresividad del ambiente al que se encuentra sometido (Ministerio de Presidencia, 2008). Un error en cualquiera de estas características, además de afectar a la durabilidad, también puede afectar a la seguridad de los usuarios (Lowinska-Kluge & Blaszczyński, 2012), influyendo por tanto en los aspectos social y medioambiental de la sostenibilidad. La durabilidad de una estructura de acero se conseguirá mediante la selección del tratamiento de protección adecuado (pintado, metalización, galvanización en caliente), establecimiento de un programa de inspecciones a efectuar durante y después de la pintura, y establecimiento de un programa de mantenimiento que cubra toda la vida útil de la estructura (Ministerio de Presidencia, 2011). La madera puede sufrir daños causados por agentes bióticos y abióticos. El objetivo de la protección preventiva de la madera es mantener la probabilidad de sufrir daños por este origen en un nivel aceptable. El fabricante de un producto deberá indicar en el envase y documentación técnica del dicho producto, las instrucciones de uso y mantenimiento (Ministerio de Vivienda, 2006).

La industria de la construcción ha sido criticada por ser una de las mayores emisoras de gases de efecto invernadero y por su baja

regulación en la gestión de las emisiones de carbono. A medida que la presión sobre los riesgos relacionados con el cambio climático aumenta, el recorte de las emisiones de carbono procedentes de las operaciones de construcción se está convirtiendo en una prioridad para las empresas de construcción con el fin de satisfacer un control de las emisiones cada vez más estricto. Mientras que el mercado dispone de herramientas para realizar análisis de la energía consumida en los edificios, hasta hace poco tiempo no se ha prestado atención a las emisiones procedentes de las actividades de construcción, ya que se creía que las emisiones en esta etapa eran menos importantes que en la etapa de uso del edificio. La necesidad de un medio eficaz para controlar las emisiones de CO₂ a un costo mínimo y un mecanismo efectivo se ha destacado en el ámbito académico, de investigación e industrial en los últimos años, sin embargo, la tecnología de visualización de las emisiones aún está en desarrollo y en las primeras etapas (Wong et al., 2013). Actualmente se están desarrollando modelos que tratan de cuantificar las emisiones en la actividad de la construcción. Así por ejemplo, Ahn et al., (2009) han realizado un análisis de la sostenibilidad en las operaciones de movimiento de tierras a través de la planificación, el seguimiento y el control de las emisiones producidas por la maquinaria, Mercader et al. (2012) han diseñado un modelo para cuantificar las emisiones de CO₂ que se producen en la ejecución de bloques residenciales de protección oficial.

La carencia de regulación del consumo de energía y emisiones ambientales vinculados a grandes vehículos y otros equipos de construcción, junto con el escaso conocimiento del consumo de energía de la industria debido a la naturaleza descentralizada de las actividades de construcción y de subcontratación, hacen de éste un campo con un gran potencial para una reducción significativa de las emisiones atmosféricas de las obras de construcción, reducción que podría beneficiar al medio ambiente sin sacrificar la productividad (Sharrard et al., 2007). En esta línea, el 25 de septiembre de 2014, la Comisión Europea ha publicado una propuesta de Reglamento cuyo objetivo es reducir progresivamente las emisiones de gases de los motores nuevos instalados en la maquinaria móvil no de carretera para ir sustituyendo los más antiguos y contaminantes (COM, 2014). Este Reglamento se

aplica a una amplia variedad de máquinas que se utilizan para construir edificios e infraestructuras o trabajar en canteras.

En España, el proyecto de investigación INVISIO (Industrialización de Viviendas Sostenibles) es un Proyecto Singular y Estratégico financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, que promueve la industrialización de los procesos constructivos, abordando el desarrollo de soluciones constructivas modulares, la incorporación de técnicas sostenibles en las viviendas y el desarrollo de una serie de herramientas de diseño y gestión que facilite la consecución de estos objetivos, tanto a los promotores y proyectistas como a los fabricantes y constructores (Queipo et al., 2009).

Con el fin de conocer la influencia de la forma, los materiales utilizados o las instalaciones en la eficiencia energética de un edificio, es necesario realizar una evaluación durante el proceso de diseño. Las emisiones que se producen en la fase de uso de un edificio están directamente relacionadas con la energía que se consume con el fin de mantener su capacidad de uso. Es necesario suministrar energía para calefacción o refrigeración con el fin de mantener un cierto nivel de confort, para iluminación y para el resto de instalaciones del edificio. Debido a la mayor conciencia del consumo de energía y las consecuentes emisiones de CO₂, en los últimos años han aparecido normativas como la Directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios en Europa, que se han transpuesto a la legislación nacional, o programas como VERDE en España, o LEED en los EE.UU. Los arquitectos y planificadores están cada vez más obligados a considerar el consumo de energía y el impacto medioambiental de sus edificios (Schlueter & Thesseling, 2009).

Los programas de diseño para conseguir un edificio sostenible actúan sobre cuatro áreas: diseño pasivo, reducción de la demanda de energía, uso de sistemas mecánicos eficientes y suministro de energía renovable. El diseño pasivo puede utilizarse en beneficio de la mejora de la eficiencia energética optimizando la orientación y la envolvente del edificio. El uso de sistemas de construcción suficientemente eficaces para evitar las pérdidas de calor a través de la envolvente puede reducir considerablemente el impacto ambiental de un edificio. Respecto a un edificio sin aislamiento, las pérdidas de calor pueden reducirse 10-20% a través de pisos, 25-30% a través de fachada, 25-30% a través de la cubierta y 30-40% a través de las ventanas (Turskis et al., 2009). El

siguiente paso para bajar la demanda de energía debe ser la reducción de la energía eléctrica utilizada en iluminación y aparatos de baja potencia, que puede conseguirse por ejemplo con el uso de ordenadores de bajo consumo energético o iluminación por LED. Una vez que la demanda se ha disminuido con los dos pasos anteriores, deben instalarse sistemas activos de refrigeración y calefacción eficientes. Si se ha seguido el proceso de diseño de baja energía anterior, la demanda de energía del edificio se reducirá considerablemente, por lo que es potencialmente más fácil suministrar la energía restante con sistemas de energía renovable "activos", tanto para la energía eléctrica como para la térmica (Jones et al., 2015). En la Fig. 3.1. se reflejan las medidas que pueden aplicarse para reducir el impacto de la construcción en el Medio Ambiente.

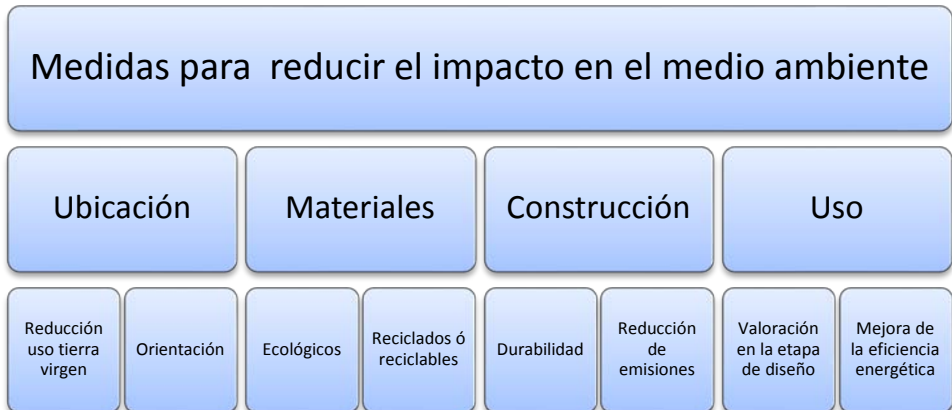


Fig. 3.1. Medidas para reducir el impacto en el medio ambiente.

En cuanto al aspecto social, a nivel mundial existe una corriente para reducir la siniestralidad en la construcción que implica involucrar a los arquitectos e ingenieros en la consideración de la seguridad de la construcción durante el proceso de diseño (CHPtD de sus siglas en inglés) (Korman, 2001). En países como EEUU, Reino Unido o Australia existen estudios que analizan la vinculación entre los accidentes y la falta de gestión preventiva en la fase de proyecto. Behm (2005) estableció una clara relación entre las muertes en la construcción y el concepto de diseño para la seguridad. En muchos casos, el riesgo que contribuye a que se produzca un accidente puede eliminarse o reducirse si se realiza un diseño pensando en la seguridad.

Esteban et al., (2013) realizan un estudio de la integración de la prevención en la fase de diseño en España y Europa y encuentran que en España no existe un proceso preventivo real en fase de proyecto y una de las circunstancias que puede tener relación con este problema es que mientras en algunos países como Reino Unido, Alemania e Italia, el sistema de obligaciones y responsabilidades está definido para todos los intervinientes, incluidos los proyectistas, en España el sistema de responsabilidades está basado más en la premisa de la responsabilidad del empresario.

Como consecuencia de la aparición de esta corriente, están apareciendo estudios de investigación que desarrollan herramientas que ayudan a los diseñadores a reconocer los riesgos y optimizar el diseño. Gangoells et al. (2010) presentan un método cuantitativo, basando en el análisis de riesgos, que permite evaluar el comportamiento de las distintas soluciones para una construcción residencial en relación con la seguridad en la fase de diseño. Wai Wong et al. (2014) desarrollan un prototipo virtual para visualizar las emisiones potenciales de carbono en un proyecto de construcción y detectar fuentes de peligro con el fin de evitar accidentes mortales, considerando que los principales riesgos en las obras son caídas desde altura o los golpes producidos por objetos o vehículos en movimiento.

3.3.- Instrumentos para aplicar las medidas correctoras

El diseño de un edificio sostenible incluye iniciativas formales e informales presentadas por gobiernos, organizaciones profesionales e industria privada, centradas en el desarrollo de guías de diseño de construcción, en la mejora de los códigos energéticos, en el uso y desarrollo de materiales de construcción de bajo impacto ambiental y que reduzcan el uso de energía y recursos renovables y, por último, en potenciar el análisis de los efectos que pueden tener las distintas opciones de diseño durante el ciclo de vida completo de un edificio (Bunz et al., 2006). Es decir, la lucha por la mejora de la sostenibilidad se realiza a través del Control reglamentario y la evaluación.

3.3.1. Control reglamentario.

Como se ha indicado en el capítulo 2, la prioridad de la Unión Europea a corto plazo es cumplir el Protocolo de Kioto y la Agenda 21. Para

lograrlo, ha adoptado una serie de Directivas que afectan a la construcción, centradas en reducir las repercusiones de las obras sobre el medio ambiente, en mejorar la eficiencia energética de los edificios en su fase de uso y en mejorar la sostenibilidad de la industria de la construcción. La lucha contra el consumo de energía a través del diseño y desarrollo de edificios de baja emisión de carbono forma parte de las políticas más amplias promovidas por el compromiso europeo de reducir el consumo de energía.

A nivel nacional, la Estrategia para una Economía Sostenible, aprobada por el Consejo de Ministros en noviembre de 2009, articula un programa de reformas, que profundiza en la prioridad otorgada al incremento en la inversión en investigación, desarrollo e innovación, o al fomento de las actividades relacionadas con las energías limpias y el ahorro energético. La Ley 2/2011 de Economía Sostenible incluye un elenco de iniciativas legislativas que tienen como objetivo contribuir a un desarrollo equilibrado y duradero, base principal de la sostenibilidad. En el sentido económico pretende un desarrollo sólido basado en la mejora de la competitividad, en la innovación y en la formación, en el medioambiental obliga a una gestión racional de los medios naturales y por último, en el sentido social intenta garantizar la igualdad de oportunidades y la cohesión social (Jefatura del Estado, 2011).

Repercusión de los proyectos sobre el medio ambiente.

Según la International Association for Impact Assessment (IAIA), Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es el proceso de identificar, predecir, evaluar y mitigar los impactos ambientales relevantes de los proyectos antes de adoptar decisiones y contraer compromisos.

La Directiva EIA es el principal instrumento de legislación de EIA en la Unión Europea. La versión inicial de 1985 y sus enmiendas fueron codificadas por la Directiva 2011/92/UE, que a su vez ha sido modificada por la Directiva 2014/52/UE. La Directiva EIA se aplica a proyectos con repercusiones importantes sobre el medio ambiente. En estos proyectos se incluyen los trabajos de construcción y las intervenciones destinadas a la explotación de los recursos del suelo. La evaluación debe efectuarse tomando como base la información proporcionada por el promotor y eventualmente completada por las

autoridades y por el público al que pueda interesar el proyecto. La Directiva EIA introduce los requisitos mínimos para cada tipo de proyecto, las obligaciones de los promotores, el contenido de la evaluación y la participación de las autoridades competentes y del público y contribuye a garantizar un nivel elevado de protección del medio ambiente y de la salud humana (UE 2011).

Algunos autores consideran la Directiva EIA como un "nuevo instrumento medioambiental", ya que su regulación procesal prevé la participación de los actores privados, en oposición a las políticas command and control CAC (command and control) tradicionales en las que existían unos estándares de contaminación máxima permitida y se sancionaba su incumplimiento. Dado que el daño ambiental de las actividades humanas no respeta las fronteras nacionales, el Estudio del Impacto Ambiental (EIA) de un proyecto en las etapas previas desempeña un papel importante en la la prevención de conflictos entre países vecinos (Makarenko, 2012).

La ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental transpone al ordenamiento nacional la Directiva 2011/92/UE, de 13 de diciembre, de evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente .

Eficiencia energética de los edificios

La energía es una de las prioridades de la Unión Europea (UE) por tres razones:

- El cambio climático: la combustión de combustibles fósiles para producir energía constituye la principal fuente antropogénica de gases de efecto invernadero.
- El uso continuado y a gran escala de combustibles fósiles no renovables y la necesidad de alcanzar la sostenibilidad.
- La seguridad de abastecimiento: la UE importa más del 50% del combustible que necesita y se prevé que ese porcentaje ascienda a más del 70% en los próximos 20 a 30 años.

La manera más rápida, eficaz y rentable de hacer frente a estos problemas es aumentar la eficiencia en el uso de la energía (COM, 2008). La Directiva 93/76/CEE, relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética

(SAVE), fue la primera en señalar la alta relevancia del sector de la construcción en el consumo energético y emisiones de CO₂, instando a mejorar la eficiencia energética en este sector mediante la aplicación de programas, entre otros ámbitos, en la certificación energética de los edificios (UE, 1993). Sin embargo, la Directiva no establecía obligaciones, lo que condujo a una desigual aplicación en los distintos Estados. La Directiva 2002/91/CE, que fue inspirada por el Protocolo de Kioto, supone un avance y una concreción de las líneas de acción de la Directiva de 1993. Para lograr una mejora en la eficiencia energética del parque edificado, la Directiva se apoya en tres herramientas: el establecimiento de requisitos mínimos de eficiencia energética en edificios; la introducción de certificados de eficiencia energética y las inspecciones de sistemas de climatización. Sin embargo, a pesar de su filosofía, la Directiva presenta varios inconvenientes, como la falta de una definición clara de indicadores y métodos de evaluación de la eficiencia energética de los edificios, o la no incorporación del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para la evaluación energética del edificio, lo que limita el alcance de la evaluación a la energía de funcionamiento del edificio excluyendo la energía interna de los materiales (Casals, 2006).

En la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición), el desarrollo de los métodos de cálculo de la eficiencia energética y el establecimiento de los requisitos sobre los edificios siguen en manos de los Estados Miembros, pero se marca una pauta para su convergencia. Esta directiva establece la obligatoriedad de que antes del 31 de diciembre de 2020, todos los nuevos edificios tengan un consumo de energía casi nulo (UE, 2010a).

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) aprobado por el Real Decreto 1027/2007 transpone en España la Directiva 2002/91/CE. Este Reglamento se desarrolla con un enfoque basado en prestaciones u objetivos que deben satisfacer las instalaciones térmicas, sin obligar al uso de una determinada técnica, lo que permite la aplicación de nuevas tecnologías. Las medidas que contempla presentan una clara dimensión ambiental, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático (Ministerio de Presidencia, 2007).

Mediante el Real Decreto 235/2013 que aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, se transpone parcialmente la Directiva 2010/31/UE. El certificado de

eficiencia energética de un edificio tiene como objetivo favorecer la promoción de edificios de alta eficiencia energética y las inversiones en ahorro de energía. Además, este real decreto contribuye a valorar las emisiones de CO₂ por el uso de la energía en el sector residencial, lo que facilitará la adopción de medidas que sirvan para reducir las emisiones. En el Procedimiento se establece la metodología de cálculo de la calificación de eficiencia energética, así como la aprobación de la etiqueta de eficiencia energética (Fig. 3.2) como distintivo común en todo el territorio nacional. Para ello se crean los documentos reconocidos que podrán ser programas informáticos de calificación de eficiencia energética; especificaciones y guías técnicas o comentarios sobre la aplicación técnico-administrativa de la certificación de eficiencia energética; cualquier otro documento que facilite la aplicación de la certificación de eficiencia energética, excluidos los que se refieran a la utilización de un producto o sistema particular o bajo patente. (Ministerio de Presidencia, 2013).



Fig. 3.2. Etiqueta de Eficiencia Energética

Mediante la orden FOM/1635/2013, que actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, se transpone parcialmente al ordenamiento jurídico español la Directiva 2010/31/UE en lo relativo a los requisitos de eficiencia energética de los edificios, así como la Directiva 2009/28/CE en lo relativo a la

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

exigencia de niveles mínimos de energía procedente de fuentes renovables en los edificios. La actualización del Documento Básico de Ahorro de energía, DB-HE, constituye el primer paso hacia el objetivo de conseguir «edificios de consumo de energía casi nulo» (Ministerio de Fomento, 2013).

A raíz de la aprobación de la Orden FOM/1635/2013, la Subdirección General de Arquitectura y Edificación dependiente del Ministerio de Fomento ha creado la herramienta unificada LIDER-CALENER que servirá para la evaluación de la demanda energética y del consumo energético establecidas en el DB-HE. Se tiene además la intención de que en un futuro posibilite la certificación energética (Ministerio de Fomento, 2014). Durante el periodo de adecuación al nuevo DB-HE, el esquema de procedimientos a emplear para la Certificación Energética de Edificios será el de la Tabla 3.1. (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2014).

Tabla 3.1.- Procedimientos para Certificación energética de edificios

Edificios nuevos	Vivienda	CALENER VyP
		CE2
		CERMA
Otros usos	CALENER VyP	
	CALENER GT	
Edificios existentes	Vivienda	CALENER VyP
		CE3
		CE3X
		CERMA
	Otros usos	CALENER VyP
		CALENER GT
		CE3
		CE3X

Emisiones industriales

Antes de 1996, los estados miembros de la Unión Europea utilizaban reglamentos separados para abordar el control de la contaminación y las medidas de prevención. La Directiva IPPC 96/61/CE (Integrated

Pollution Prevention and Control) supuso la integración de estos dos conceptos. Esta directiva con sus modificaciones se codifica en la Directiva 2008/1/CE relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación. La Directiva IPPC se centra en el sistema de permisos para las instalaciones industriales con el fin de proteger el medio ambiente en su conjunto reduciendo en lo que sea posible las emisiones a la atmósfera, el agua y el suelo, incluidas las medidas relativas a los residuos (Samarakoon & Gudmestad, 2011). Entre las actividades industriales de las que se ocupa se encuentran instalaciones de fabricación de materiales de construcción como cemento, acero, vidrio o productos cerámicos (UE, 2008a).

El concepto de mejores técnicas disponibles (MTD) juega un papel muy importante en la Directiva. No prescribe la utilización de una técnica o tecnología específica, sino que los valores límite de emisión, los parámetros y las medidas técnicas equivalentes se basarán en las MTD, dependiendo de las características de la instalación, su localización geográfica y las condiciones locales del medio ambiente, aunque sí podrán existir unos requisitos obligatorios generales. Cada Estado deberá establecer cómo podrán considerarse estas variables. Mejores técnicas disponibles se refiere a la tecnología mas efectiva y avanzada que puede utilizarse en una instalación, en condiciones técnicas y económicas viables, para determinar los valores límite que minimizan el impacto ambiental de las emisiones. Las técnicas incluyen la tecnología utilizada para la producción y el diseño, construcción, mantenimiento, funcionamiento y demolición de la instalación. La definición de las MTD se basa en un intercambio de información entre los distintos Estados y las industrias. Al final de los trabajos técnicos, dirigidos por la Comisión Europea, se propone un documento BREF (Best available Techniques (BAT) Reference) europeo, que incluye las conclusiones sobre las MTD.

En la nueva Directiva de Emisiones Industriales (DEI) 2010/75/UE, además de aspectos medioambientales como las emisiones y la gestión de residuos se integran también aspectos económicos y sociales al incluir la eficiencia energética y la prevención de accidentes. En ella se refuerza el papel de las MTD en la Unión Europea. La DEI exige a los Estados que los valores límite de emisión VLE-MTD (también conocidos por sus siglas en inglés BAT-AEL) se establezcan de acuerdo con las

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

conclusiones de los documentos BREF. Cuando la actividad implique la posibilidad de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas en el emplazamiento de la instalación, el titular presentará un informe de la situación de partida (UE, 2010b).

La Ley 16/2002 de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, que es la ley de transposición de La Directiva 2008/1/CE, incluye el concepto de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) como medida de protección del medio ambiente. Ha sido modificada por la Ley 5/2013 para incorporar al ordenamiento español las modificaciones introducidas por la Directiva 2010/75 (Jefatura del Estado, 2013).

La Ley 6/2014, de Prevención, Calidad y Control Ambiental de Actividades en la Comunitat Valenciana configura un sistema de intervención integral, coordinando la integración de los trámites de los dos principales sistemas de intervención administrativa para prevenir y reducir en origen la contaminación: la autorización ambiental integrada y la evaluación de impacto ambiental. Los instrumentos de intervención administrativa ambiental, dependiendo del grado de potencial incidencia sobre el medio ambiente son: Autorización ambiental integrada, Licencia ambiental, Declaración responsable ambiental y Comunicación de actividades inocuas.

La solicitud de la autorización ambiental integrada contendrá un proyecto que incluya, entre otros, los siguientes aspectos: control de las actividades con repercusión en la seguridad, salud de las personas o el medio ambiente; estado ambiental del lugar en el que se ubicará la instalación y los posibles impactos que se prevean; tecnología prevista para reducir las emisiones procedentes de la instalación indicando cuales de ellas se consideran mejores técnicas disponibles y medidas relativas a la aplicación del orden de prioridad que dispone la jerarquía de residuos de los residuos generados por la instalación. En relación con la protección del suelo y de las aguas subterráneas se incorpora, entre la documentación necesaria para solicitar la autorización ambiental integrada, la presentación de un «informe base» o «informe de la situación de partida» como instrumento que permita realizar una comparación entre el estado del emplazamiento de la instalación descrita en el informe y el estado de dicho emplazamiento tras el cese definitivo de actividades.

Desde el punto de vista ambiental, en cuanto a Residuos, la Directiva 2008/98/CE establece la siguiente jerarquía de residuos que servirá de orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos: a) prevención; b) preparación para la reutilización; c) reciclado; d) otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética; e) eliminación (UE, 2008b). Por lo tanto para una buena gestión de residuos, es necesario considerar este aspecto desde la etapa de diseño.

La ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva 2008/98/CE.

Seguridad y salud en las obras de construcción

La Directiva 92/57/CEE considera que gran parte de los accidentes de trabajo en las obras está relacionada con una mala planificación en la fase de proyecto, por lo que obliga a los proyectistas a tener en cuenta en los proyectos los principios generales de prevención en materia de seguridad y salud (UE, 1992).

El Real Decreto 1627/1997 por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción transpone al Derecho español la Directiva 92/57/CEE. Este Real Decreto establece la obligatoriedad de inclusión de un estudio de seguridad e higiene en los proyectos de edificación y obras públicas. Además, se ocupa de las obligaciones de algunos sujetos que no son habituales en otros ámbitos, como el promotor, el proyectista, el contratista, el subcontratista y los trabajadores autónomos e introduce las figuras de los coordinadores en materia de seguridad y salud durante la elaboración del proyecto y durante la ejecución de la obra (Ministerio de Presidencia, 1997).

3.3.2. Evaluación

Ya se ha visto el gran impacto que causa la construcción, las medidas correctoras que pueden aplicarse y la preocupación de las administraciones por este tema. No sorprende pues, que tanto en los edificios como en los productos de construcción, se estén adoptando algunas de las herramientas de evaluación enumeradas en el capítulo anterior. En diversos países se están desarrollando herramientas objetivas específicas que permiten valorar la sostenibilidad de las

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

edificaciones tanto existentes como de nueva construcción. Algunas evalúan aspectos parciales como el comportamiento energético de los edificios, los residuos generados en las fases de construcción y demolición o el comportamiento ambiental de los materiales. Las más completas son los sistemas de evaluación y certificación ambiental de edificios, como VERDE en España, LEED en Estados Unidos o BREEAM en Reino Unido. Con estas herramientas puede determinarse el impacto del consumo de energía, la emisión de gases de efecto invernadero y la generación de residuos sólidos que tendrá un edificio (Wadel et al., 2010).

El Análisis del ciclo de vida (ACV) establecido en las normas ISO 14040/44 es uno de los métodos más utilizados en la industria de la construcción para evaluar edificios desde el origen (extracción de materias primas), hasta el final de su vida (demolición). Pons & Aguado (2012) consideran 5 fases en el ACV de un edificio:

Fase 1: desde la extracción de materias primas a la producción de componentes, incluyendo los procesos correspondientes al acero, hormigón y madera.

Fase 2: el impacto del transporte de los materiales de construcción desde la fábrica hasta el sitio. En esta fase influyen el tamaño y el peso de los materiales y la distancia hasta la obra.

Fase 3: construcción y montaje de la estructura, considerando la maquinaria utilizada y los procesos constructivos.

Fase 4: uso y mantenimiento.

Fase 5: demolición o desmontaje.

Considerando la necesidad de conservar las reservas de energía, es crucial el análisis de los efectos que pueden tener las distintas opciones de diseño durante el ciclo de vida completo de un edificio. La energía de un edificio a lo largo de toda su vida incluye la energía interna y la energía de funcionamiento (Fig. 3.3) (Ding, 2004).

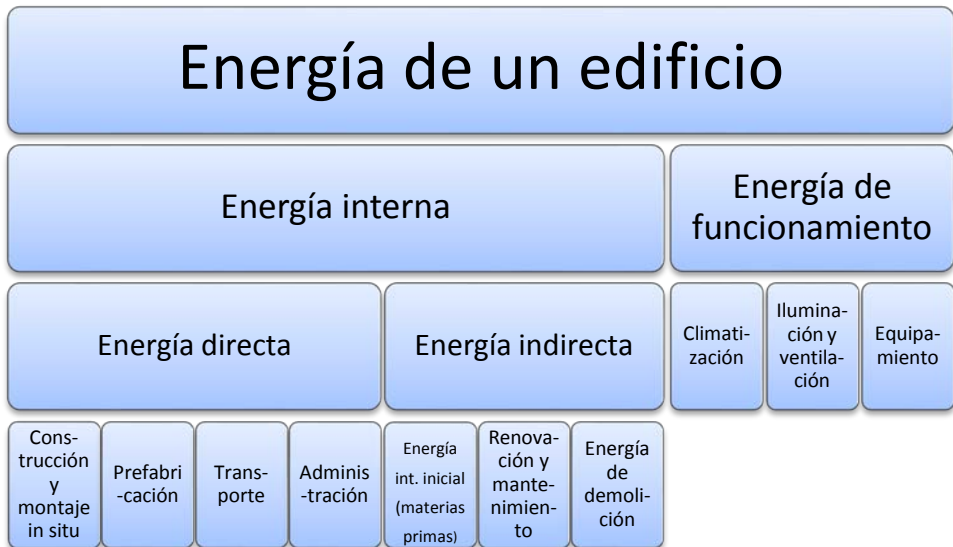


Fig. 3.3. Energía de un edificio

La energía interna de un edificio puede definirse como la energía total que se requiere en la creación del edificio, incluyendo la energía directa, usada en el proceso de construcción y montaje y la energía indirecta que se requiere para la manufactura de materiales y componentes de un edificio. Esta energía indirecta incluye la energía interna de las materias primas, que se refiere a la requerida desde su extracción pasando por su procesamiento y manufactura incluyendo también la energía usada en el transporte y la proporción correspondiente de energía interna de las infraestructuras de las industrias y maquinaria utilizada en la manufactura y transporte (Crowther, 1999). Para calcular la energía indirecta también hay que tener en cuenta el mantenimiento y renovación y la demolición y eliminación final.

La energía de funcionamiento es la consumida durante la vida útil del edificio a través de procesos tales como climatización, producción de agua caliente, iluminación y ventilación. Tiene en cuenta también la energía consumida por el equipamiento del edificio. La energía de funcionamiento tiene un mayor peso en el total de la energía consumida, por lo que inicialmente los esfuerzos se centraron en la reducción del consumo de esta energía a través de la innovación técnica, el control reglamentario y la evaluación a través de una amplia

gama de métodos de certificación, ignorando la energía interna de los materiales de construcción (Hernández & Kenny, 2011). Sin embargo, con la mejora en la eficiencia de los equipos y la aparición de materiales aislantes, ha disminuido la energía de funcionamiento y en las investigaciones se incluye cada vez más el estudio de la energía interna de los materiales (Dixit et al., 2010). Nielsen (1995) demostró que mientras un edificio moderno, en la fase de uso, utiliza sólo una fracción de la energía que usaban los edificios de los años setenta del siglo pasado, la energía total consumida en los edificios modernos se encuentra en el mismo nivel o incluso un nivel más alto que entonces.

El consumo de energía en la etapa de funcionamiento está controlado por los usuarios del edificio y por lo tanto sólo puede ser alterado en parte por el diseño del edificio. Sin embargo, la energía interna está totalmente bajo el control de la industria de la construcción, los diseñadores, constructores y productores de materiales de construcción. La energía consumida en la producción de los materiales de construcción supone aproximadamente un 75% del total de la energía interna de un edificio. Gran parte de esta energía se encuentra concentrada en procesos que implican la consecución de altas temperaturas, especialmente producción de acero y cemento. El montaje representa aproximadamente 15 a 25% de la energía interna en los edificios, lo que supone también una importante proporción. Además de las contribuciones realizadas por la mejora de la eficiencia energética en la producción de materiales de construcción y el proceso constructivo, hay una gran oportunidad para reducir la energía interna del edificio mediante la elección adecuada de materiales y tecnologías en la etapa de diseño. Puede contribuirse a ello a través de las siguientes estrategias: uso de menos cantidad de materiales, selección de materiales y sistemas estructurales de bajo consumo energético, diseño de elementos reciclables, de larga vida y que se adapten a distintas necesidades y elección de materiales que utilicen materias primas locales y sean manufacturados localmente con la consiguiente reducción del consumo de energía en el transporte (Spence & Mulligan, 1995).

Las bases de datos existentes con datos de energía interna de los materiales de construcción son muy variables. Dixit et al. (2010) realizan un análisis con el fin de identificar diferentes parámetros que

faciliten el desarrollo de una base de datos consistente y comparable. En ese estudio se revela que existen 10 parámetros que influyen en la calidad del cálculo de energía interna. Uno de los más importantes es el Método de análisis. Los principales métodos para calcular la energía interna son: análisis de procesos, análisis estadístico, análisis de input/output y análisis híbrido. El análisis de procesos es uno de los métodos más extendidos por ser el que proporciona los resultados más exactos y fiables. El análisis comienza considerando el material de construcción como producto final y trabaja hacia atrás teniendo en cuenta todas las posibles entradas de energía, directa o secuestrada, de cada material que interviene. Sin embargo, este método es impracticable e incompleto debido a la exclusión de muchos procesos anteriores. Un análisis de input/output puede tener en cuenta la mayoría de los consumos de energía directos e indirectos en el proceso de producción de los materiales de construcción y por lo tanto se considera relativamente completo. Este método hace uso de los datos económicos de flujo de dinero entre los diversos sectores de la industria basándose en tablas de input/output publicadas por el gobierno nacional, transformando a continuación los flujos económicos en flujos de energía mediante la aplicación tarifas medias de energía. Por lo tanto, en un análisis de input/output, la energía interna se calcula multiplicando el costo del producto por la intensidad de energía de ese producto. Este método se supone que es completo, ya que abarca casi todos los límites del sistema. Sin embargo, también sufre de problemas intrínsecos, como las hipótesis de homogeneidad y proporcionalidad, los errores y la incertidumbre de los datos económicos, por ejemplo la tarifa energética y el coste del producto, y la agrupación de sectores. Estos problemas hacen que sus resultados sean poco fiables, pudiendo alcanzar errores hasta del 50 por ciento. Intentando unificar los beneficios de los dos métodos se diseñó un análisis híbrido que eliminara los errores y limitaciones fundamentales de ambos métodos. Sin embargo, estos métodos deben ser comparados y validados. Los métodos híbridos comienzan con un análisis de los procesos que dispongan de datos precisos de entrada de energía en la etapa de producción final y datos probables en una etapa anterior y a continuación los sustituye con el método de input/output cuando es difícil conseguir información fiable y consistente en los procesos anteriores. Treloar (1998) divide este método en dos tipos: Análisis

híbrido basado en procesos y análisis híbrido basado en input/output. El análisis híbrido basado en procesos utiliza el método input/output para piezas complejas de la producción del material y por lo tanto evita el carácter incompleto inherente en el análisis de procesos. Sin embargo, los materiales complejos, que involucran a más de un material, podrían plantear problemas a este método. Por otra parte, los precios sobreestimados de los productos también podrían distorsionar los resultados. El análisis híbrido basado en input/output incorpora la identificación y extracción de trayectorias energéticas directas desde el análisis basado en input/output a fin de integrarlas en el proceso fiable y análisis preciso basado en procesos para evitar efectos indirectos. Según Treloar (1998) el error en el cálculo de energía interna es de aproximadamente un 20 por ciento y por lo tanto no existe un método disponible que sea totalmente eficiente, sin embargo, el análisis híbrido basado en input-output se considera casi perfecto en el análisis del ciclo de vida de los edificios.

Otros parámetros que también influyen en la calidad del cálculo de la energía interna son los límites del sistema, la localización geográfica del área de estudio, la energía primaria y suministrada, las fuentes de datos y su antigüedad. Debido a su complejidad, cuando se realiza un ACV es necesario establecer unos límites para el sistema. La exclusión de algunos inputs de energía en los componentes de un edificio o en su proceso constructivo puede causar grandes variaciones en los resultados del cálculo de la energía interna (Ding, 2004). Sartori & Hestnes (2007) afirman que a causa de la variación del clima, del tipo de edificios, de los métodos constructivos y de las exigencias de climatización interior, diversas ubicaciones geográficas provocan que los resultados de los cálculos energéticos sean inconsistentes y difícilmente comparables. Las diferencias de los precios de los materiales y de las tarifas energéticas en los diferentes países también producen errores en el cálculo de la energía interna (Pullen 1996). Fay & Treloar (1998) y Fay et al. (2000) definen la energía primaria como "la energía de la naturaleza (por ejemplo, el carbón) utilizada en la energía consumida por el comprador (por ejemplo, electricidad) y la energía suministrada como "la energía utilizada por el consumidor". Si el cálculo se basa en la energía primaria consumida, las mediciones son relativamente consistentes, pero si también se toma en cuenta la energía suministrada, los resultados podrían resultar engañosos y ambiguos.

Además, tanto la energía de funcionamiento como la energía interna deben medirse en términos de consumo de energía primaria con el fin de lograr coherencia y de considerar las implicaciones ambientales más apropiadas en términos de emisiones de CO₂. Los investigadores utilizan distintas fuentes de datos. Esta elección subjetiva influye significativamente en los resultados finales (Junnila & Horvath 2003). La fuente de datos es un parámetro importante y su fiabilidad, y transparencia debe ser considerada en el ACV (Pullen et al. 2006; Alcorn & Wood, 1998). Por último, la antigüedad de estas fuentes de datos tiene una importancia decisiva en la comparabilidad de las bases de datos energéticas. Los datos antiguos derivan de una tecnología obsoleta en la manufactura de los materiales, que no es energéticamente tan eficiente como una tecnología moderna. Lo mismo ocurre con el transporte.

Nässén et al. (2007) realizan un análisis input-output en el sector de la construcción en Suecia y lo comparan con estudios bottom-up previos usando el método de ACV. Según los resultados de este análisis, la energía interna de un edificio calculada con el método top-down es un 90% más alta. Las diferencias son sólo de un 20% cuando se considera la producción y proceso de los materiales de construcción, pero cuando se incorporan otros sectores como transporte, actividades de construcción, producción de maquinaria y sector servicios, el análisis input-output da valores mucho mayores. Estas diferencias pueden explicarse por los errores debidos a la definición de límites en el sistema bottom-up. El hecho de subestimar la energía utilizada en el transporte, servicios etc. en los estudios bottom-up, no tiene gran importancia cuando se trata por ejemplo de elegir materiales, pero cuando se compara la energía de funcionamiento con la energía interna, estos errores conducen a una infravaloración de esta última, ya que la energía de funcionamiento está dominada por la energía directa, que es más fácil de estimar. Los estudios que utilizan el método ACV obtienen resultados similares para el indicador GJ/m², independientemente del tamaño del edificio o del material utilizado. Sin embargo se observa una gran diferencia entre los estudios basados en el método ACV y los estudios basados en un análisis input-output. Según estos últimos el consumo de energía es considerablemente mayor.

Además del ACV, las herramientas de evaluación utilizan otros métodos. San-José Lombera & Cuadrado Rojo (2010) realizan una

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

clasificación de las herramientas para evaluar el impacto ambiental de un edificio según el método en que se basan:

- 1) Análisis del ciclo de vida a través de una evaluación multicriterio de los impactos que produce: GBC-GBTool, PromisE (Finlandia), BREEAM (Inglaterra), ESCALE (Francia), Eco/Quantum (Holanda), EcoEffect (Suecia), LInx (Canadá) y VERDE (España).
- 2) Análisis de una serie de requisitos (check-list): LEED (USA).
- 3) Evaluación de impacto usando "eco-puntos" (utilizados para establecer comparaciones y mejorar el diseño ambiental): Invest (BRE-Reino Unido) o el concepto de eco-eficiencia utilizado en CASBEE (Japón). Métodos de análisis de Ciclo de Vida de costos ambientales (LCECA de sus siglas en inglés), que se refieren al equilibrio entre el gasto económico y beneficio ecológico.

En el "International Council for Local Environmental Initiatives" de 1994 (ICLEI, 1994) se señaló que debería promoverse un desarrollo sostenible. En los años siguientes a este Consejo, la mayoría de los estudios, bases de datos, guías de diseño y herramientas de valoración sobre construcción sostenible se centraron exclusivamente en los requerimientos medioambientales. Sin embargo, recientemente se ha incrementado el número de artículos de investigación y herramientas de valoración que también incorporan requerimientos económicos y sociales. Al mismo tiempo han aparecido las primeras normas que legislan aspectos sociales (ISO 26000) (Pons & Aguado, 2012). La Tabla 3.2. muestra 10 conocidas herramientas para la valoración del impacto medioambiental de la edificación. La mayoría de ellas muestra esta nueva tendencia, ya que incorporan requerimientos sociales y económicos.

De acuerdo con la complejidad de su aplicación, estas herramientas pueden clasificarse en dos grupos:

- Herramientas completas, que incluyen gran cantidad de indicadores y tienen una aplicación compleja y laboriosa. Se desarrollan a partir de la herramienta GB del Green Building Council.
- Herramientas sencillas que tienen menos indicadores y su aplicación resulta ágil y simple.

Tabla 3.2.- Herramientas para valoración de impacto ambiental en edificación (Pons & Aguado, 2012)

Nombre	Institución	Origen	Uso	E	MA	S	RT	Com.
BREEAM	BRE	U.K. 1990	I	-	X	X	X	X
CASBEE	IBEC	Japan 2004	N	-	X	-	X	X
DGNB-Seal	DGNB	Germany 2008	B/N	X	X	X	X	X
EcoEffect	KTH, HIG	Sweden 2000	N	X	X	-	X	X
Green Globes	ECD	Canada, U.K. 1996	N	-	X	-	X	-
Green Star	GBCA	Australia 2003	N	-	X	X	X	X
HQE	AssoHQE	France 1996	N	-	X	X	X	X
BEAM	BEAM HKGBC	Hong Kong 1996	N	-	X	X	X	X
LEED	USGBC	U.S.A. 2000	I	-	X	-	-	-
VERDE	GBCE	Spain 2010	B	X	X	X	X	X

Leyenda:

Uso: I=consolidada internacionalmente, N=consolidada nacionalmente, B=siendo implementada.

E: Requerimientos Económicos (coste, tiempo)

MA: Requerimientos Medioambientales (consumo de energía, agua, emisiones de CO₂, residuos)

S: Requerimientos Sociales (salud, seguridad, calidad)

RT: Rating tool. Valoración con asignación de pesos a diferentes criterios

Com: Complejidad: Herramienta con aplicación compleja.

A continuación se describen los principales sistemas de evaluación de edificios:

LEED

Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED) es el sistema de certificación de edificios sostenibles más ampliamente adoptado en los Estados Unidos. Para obtener la certificación LEED, los proyectistas tienen que realizar un análisis en profundidad de la sostenibilidad, basado en la forma de un edificio, los materiales, el entorno y las instalaciones.

LEED, desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (US Green Building Council), fue inicialmente implantado en el año 1999, utilizándose en varios países desde entonces. Su objetivo es proporcionar a los promotores y operadores de edificios un marco conciso para identificar e implementar soluciones prácticas y medibles en el diseño, construcción, uso y mantenimiento de edificios sostenibles (Azhar et al., 2011). Se basa en la incorporación al proyecto de aspectos relacionados con la eficiencia energética, el uso de energías alternativas, la mejora de la calidad ambiental interior, la eficiencia del consumo de agua, el desarrollo sostenible de los espacios libres de la parcela y la selección de materiales. Existen cuatro niveles de certificación: certificado (LEED Certificate), plata (LEED Silver), oro (LEED Gold) y platino (LEED Platinum).

BREEAM

El certificado de sostenibilidad del edificio BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) fue desarrollado en el Reino Unido en 1990 por el BRE. BREEAM es un sistema voluntario de evaluación y certificación de la sostenibilidad de un edificio basado en las siguientes áreas: gestión, uso de energía, salud y bienestar de los usuarios, emisiones de CO₂ durante la vida útil del edificio, transporte, uso del suelo y ecología, los materiales y el agua. Los créditos se asignan a las áreas de desempeño que cumplen o superan las buenas prácticas. Ponderando los resultados de cada área para tener en cuenta su importancia en el impacto medioambiental global del edificio, se obtiene una puntuación general que clasifica el edificio como correcto, bueno, muy bueno o excelente en términos de rendimiento (Bunz et al., 2006).

VERDE

Siguiendo las Directivas europeas sobre eficiencia energética, en España el Comité Técnico de Green Building Council España (GBCE) ha formulado una serie de criterios y de reglas aceptadas para definir los límites y requisitos necesarios para que un edificio pueda obtener la Certificación GBC España-VERDE, que determina si un edificio cumple los requisitos necesarios para ser merecedor de una Certificación Medioambiental. El sistema de evaluación se basa en un método prestacional de acuerdo con la filosofía de las Directivas Europeas y del Código Técnico de la Edificación.

Las herramientas desarrolladas por el GBC España utilizan la metodología de Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios (VERDE), que está basada en una aproximación del ciclo de vida.

Existe un conjunto de herramientas VERDE para distintas actuaciones:

VERDE nueva edificación

VERDE NE - Residencial y Oficinas

VERDE NE –Equipamiento

VERDE NE-Unifamiliar

VERDE Rehabilitación

VERDE RH – Residencial

VERDE RH – Equipamiento

Además de la certificación VERDE, GBCE ha creado la Herramienta de Ayuda al Diseño de Edificios Sostenibles (HADES), que ayuda a incorporar los principios de sostenibilidad en la etapa de diseño del edificio cuantificando las mejoras ambientales que se producen al aplicar criterios de sostenibilidad en el proyecto.

La Certificación VERDE consiste en la evaluación, de acuerdo con una lista de criterios, de una lista de impactos. La herramienta asigna unos pesos, obtenidos por un sistema multi-criterio, a los diferentes criterios. Al valorar el edificio se obtienen los impactos asociados a cada criterio y el impacto final determinará la certificación del edificio (de una a cinco hojas). Es decir, está comparando el edificio evaluado con uno de referencia. Los criterios de evaluación están agrupados en las siguientes áreas:

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

- A. Selección del sitio, proyecto de emplazamiento y planificación
 - Estrategias para el reciclaje de residuos en la comunidad o proyecto
 - Uso de plantas autóctonas
 - Contaminación Lumínica
- B. Energía y Atmósfera
 - Uso de energía no renovable en los materiales de construcción
 - Uso de energía no renovable para el transporte en los materiales de construcción
 - Consumo de energía no renovable durante el uso, demanda y eficiencia de los sistemas
 - Demanda de energía eléctrica en la fase de uso
 - Producción de energía renovable en la parcela
 - Emisiones de sustancias foto-oxidantes
 - Emisiones de sustancias que reducen el ozono Estratosférico
- C. Recursos Naturales
 - Consumo de agua potable
 - Retención de aguas de lluvia para su reutilización
 - Reutilización de aguas grises
 - Impactos de los materiales de construcción
 - Estrategias para el desmontaje, reutilización y reciclado
 - Impactos generados en el proceso de construcción, residuos de construcción
- D. Calidad del espacio interior
 - Eliminación, previa a la ocupación del edificio, de los contaminantes emitidos por materiales nuevos de acabados interiores
 - Concentración de CO₂ en el aire interior
 - Limitación a la velocidad de aire en las zonas con ventilación mecánica
 - Eficiencia de la ventilación en las áreas con ventilación natural
 - Confort higrotérmico en los espacios con ventilación mecánica
 - Confort térmico en los espacios con ventilación natural
 - Iluminación natural en los espacios de ocupación primaria
 - Deslumbramiento en las zonas de ocupación no residencial
 - Nivel de iluminación y calidad de la luz en los puestos de trabajo
 - Protección frente al ruido a través de la envolvente y zonas de ocupación primaria

Protección frente al ruido a través de las salas de máquinas a las zonas de ocupación primaria

Protección frente al ruido entre áreas de ocupación primaria

E. Calidad del Servicio

Eficiencia de los espacios

Eficiencia volumétrica

Provisión y funcionamiento de un sistema de control de las instalaciones

Capacidad de funcionamiento parcial de las instalaciones y sistemas técnicos

Capacidad de control local del sistema de iluminación, en las áreas de ocupación no residencial

Capacidad de control local de los sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, en las áreas de ocupación no residencial

Posibilidad de modificación de las instalaciones técnicas en el edificio

Adaptabilidad de los espacios. Limitaciones impuestas por la estructura

Adaptabilidad de los espacios. Limitaciones impuestas por la altura de los pisos

Adaptabilidad de los espacios. Limitaciones impuestas por las fachadas y las instalaciones técnicas

Adaptabilidad a cambios futuros en el tipo de suministro energético

Desarrollo e implementación de un plan de gestión de mantenimiento

Monitorización y control del edificio durante el uso

F. Impacto socio económico

Estrategias para mejorar el acceso para personas discapacitadas

Derecho al sol

Acceso a espacios abiertos privados desde las viviendas

Protección a las vistas desde el exterior del interior de las viviendas

Acceso visual desde las áreas de trabajo

Coste de construcción

Coste de mantenimiento

Los impactos que considera VERDE y sus indicadores se muestran en la Tabla 3.3.

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

Tabla 3.3.- Impactos considerados en VERDE

IMPACTO	INDICADOR
Cambio Climático	kg de CO ₂ eq
Aumento de las radiaciones UV a nivel del suelo	kg de CFC ₁₁ eq
Perdida de fertilidad	kg de SO ₂ eq
Perdida de vida acuática	kg de PO ₄ eq
Producción de cáncer y otros problemas de salud	kg de C ₂ H ₄ eq
Cambios en la biodiversidad	%
Agotamiento de energía no renovable, energía primaria	MJ
Agotamiento de recursos no renovable diferente de la energía primaria	kg de material
Agotamiento de agua potable	m ³
Uso del suelo	m ²
Agotamiento de suelo para depósito de residuos no peligrosos	m ³
Peligro por la disposición o almacenamiento de residuos peligrosos	kg
Peligro por la disposición o almacenamiento de residuos radiactivos	kg
Salud, bienestar y productividad para los usuarios	%
Riesgo financiero o beneficios por los inversores-Coste del Ciclo de Vida	€/m ²

Evaluación de la sostenibilidad de las estructuras

Como consecuencia de la actual preocupación por la sostenibilidad en España, la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) (Ministerio de Presidencia, 2008) ha incluido un anejo en el que se define un índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad (ICES). Aunque el cumplimiento del anejo no es obligatorio, abre un camino a seguir para el diseño estructural sostenible en el futuro. Esta decisión es digna de mención porque representa una iniciativa pionera, es la primera vez que un código estructural ha incluido un anejo de este tipo. Otra razón por

la que se destaca es porque suele ser difícil introducir cambios en un sector como el de la construcción (Aguado et al., 2012). Posteriormente, en la Instrucción de Acero Estructural EAE (Ministerio de Presidencia, 2011), se ha incluido un modelo similar.

Obtenido a partir del índice de sensibilidad medioambiental (ISMA), el ICES sirve para comparar dos soluciones estructurales del mismo tipo (hormigón con hormigón y acero con acero) para una misma obra o para valorar cuantitativamente una obra según criterios de sostenibilidad. Están basados en métodos multi-criterio que comparan la solución evaluada con una de referencia, dando mucho peso a las certificaciones, de acuerdo con las Directivas europeas. El ISMA de una estructura se define mediante la siguiente expresión:

$$ISMA = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \beta_i \gamma_i V_i \quad (3.1)$$

siendo

$\alpha_i \beta_i \gamma_i$ Coeficientes de ponderación de cada criterio

V_i Coeficientes de valor obtenidos de cada criterio, de acuerdo con la siguiente expresión en función del parámetro representativo de cada caso

$$V_i = K_i \left[1 - e^{-m_i \left(\frac{P_i}{n_i} \right)^{A_i}} \right] \quad (3.2)$$

K_i, m_i, n_i y A_i Parámetros cuyos valores dependen de cada indicador

P_i Valor que toma la función representativa para cada indicador

Los valores de los coeficientes de ponderación y de los parámetros son valores fijos asignados por cada norma a los criterios, que determinarán el peso del mismo en la valoración de la solución.

A partir del valor obtenido para el ISMA se define el ICES mediante la siguiente expresión:

$$ICES = a + b \cdot ISMA \quad (3.3)$$

a Coeficiente de contribución social, que tiene en cuenta aspectos como que se adopten medidas preventivas adicionales a los mínimos establecidos en materia de seguridad y salud, que se apliquen métodos innovadores que aumenten la productividad, la

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

competitividad y la eficiencia de las construcciones como resultado de proyectos de I+D+i, así como la accesibilidad del usuario a las mismas, la formación de los trabajadores y la accesibilidad de los ciudadanos a la información sobre la obra.

- b) Coeficiente de contribución por extensión de la vida útil, que valora el aumento de la vida útil de la estructura por encima del valor marcado en la instrucción, con el consiguiente aumento del periodo de amortización de los impactos producidos en la fase de ejecución.

Con el valor del ICES obtenido se clasifica la contribución de la estructura a la sostenibilidad, según los siguientes niveles:

Nivel A: $0,81 < ICES < 1,00$

Nivel B: $0,61 < ICES < 0,80$

Nivel C: $0,41 < ICES < 0,60$

Nivel D: $0,21 < ICES < 0,40$

Nivel E: $0,00 < ICES < 0,20$

donde A indica máxima y E mínima contribución a la sostenibilidad.

En el momento de incluir un anejo de sostenibilidad en la EHE-08 se analizaron algunos de los sistemas existentes como una posible base para el nuevo modelo. Los métodos examinados incluían los que se basan en listas de control que otorga puntuaciones, como el LEED (US Green Consejo Building 2010) y los basados en indicadores que ponderan el peso de los distintos impactos en un análisis del ciclo de vida (ACV), como la Herramienta VERDE. Estos dos primeros modelos se descartaron porque no reflejaban la complejidad del problema.

El método ACV general es más completo y complejo. Consiste en la identificación y cuantificación de los recursos utilizados (entradas: energía, materias primas y agua) y las emisiones ambientales (salidas a la atmósfera, agua y suelo) asociados a cada etapa del ciclo de vida del producto, desde la cuna hasta la tumba, para estimar su potencial impacto en el medio ambiente. El ACV habría sido excesivamente complejo y difícil para una primera iniciativa, además de su limitación en el tratamiento de los aspectos sociales y económicos. Finalmente se optó por un modelo relacionado con las técnicas de análisis de valor con base en la metodología MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles), con el que podría hacerse frente a la complejidad del problema sin excesivas complicaciones y en cortos

períodos de tiempo. Por otra parte, a diferencia de otras técnicas más sofisticadas, se entiende fácilmente por los profesionales que trabajan en el campo de las estructuras (Aguado et al., 2012).

El método MIVES incluye varias etapas. Después de definir el problema, se crea un diagrama básico del modelo de decisión en el que se establecen todos los aspectos de la evaluación en forma de árbol. El siguiente paso es definir el peso relativo de cada uno de los aspectos que se tienen en cuenta para la evaluación. Las distintas alternativas son evaluadas utilizando el modelo creado anteriormente. Así, es posible tomar las mejores decisiones y elegir la alternativa más adecuada. En cuanto a los fundamentos matemáticos del método, MIVES se basa en Métodos de Decisión Multi-criterio (MCDMs) (del Caño et al., 2012).

Los indicadores utilizados por la EHE-08 son:

1. Características medioambientales del hormigón
2. Características medioambientales de las armaduras
3. Optimización del armado de los elementos
4. Optimización medioambiental del acero
5. Nivel de control de la ejecución
6. Empleo de áridos reciclados
7. Optimización del cemento
8. Optimización del hormigón
9. Medidas específicas para control de los impactos
10. Medidas específicas para gestionar los residuos
11. Medidas específicas para gestionar el agua

El valor de la función representativa P_i está marcado por la norma y será mayor en función del cumplimiento de unas condiciones como el uso de productos en posesión de distintivos de calidad oficialmente reconocidos, la implantación de sistemas voluntarios de certificación medioambiental para los procesos de fabricación de los productos empleados en la estructura, utilización de cementos con adiciones u obtenidos mediante procesos que consumen menos energía o reducen las emisiones de CO_2 a la atmósfera, empleo de elementos para minimizar los impactos de la ejecución de la estructura sobre el entorno (ruido, polvo, vibraciones...) (Ministerio de Presidencia, 2008).

3.- CONSTRUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

Para facilitar la comprensión y el cálculo de estos índices, la Comisión Permanente del Hormigón ha publicado el programa MIVES EHE-8. En la (Fig. 3.4) se representan los resultados que se obtienen con este programa.

MIVES-EHE-08 V01 - Herramienta Informática para el cálculo del Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES), según la EHE-08
Grupo de Ingeniería y Dirección de Proyectos - Universidad de La Coruña

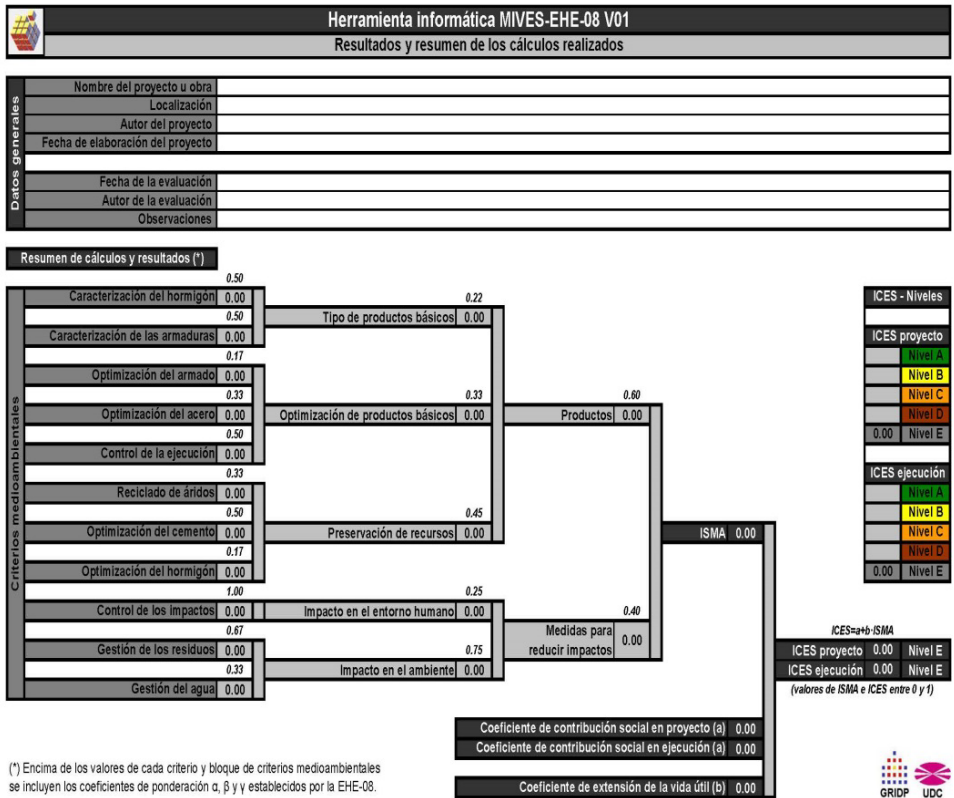


Fig. 3.4. Programa MIVES EHE-08

En el articulado de la EAE se incluye un requisito de higiene, salud y medio ambiente con objeto de fomentar la consideración de los aspectos medioambientales tanto en el proyecto como durante la ejecución de las estructuras. La propiedad decidirá si se considera o no este requisito. Cuando se exija, la estructura se proyectará y ejecutará minimizando el

impacto ambiental y la generación de residuos, y reciclando materiales en la medida de lo posible.

En la EAE se establecen seis criterios:

1. Características medioambientales de los productos de acero.
2. Optimización de la ejecución.
3. Nivel de control de la ejecución
4. Optimización medioambiental del acero.
5. Medidas específicas para control de los impactos.
6. Medidas específicas para gestionar los residuos.

El valor de la función representativa P_i está marcado por la norma y será mayor en función del cumplimiento de unas condiciones como el uso de productos en posesión de distintivos de calidad oficialmente reconocidos, la implantación de sistemas voluntarios de certificación medioambiental para los procesos de fabricación de los productos empleados en la estructura y en particular los de fabricación, transporte y montaje de la estructura, empleo de aceros obtenidos mediante procesos que reducen las emisiones de CO_2 a la atmósfera, empleo de elementos para minimizar los impactos de la ejecución de la estructura sobre el entorno (ruido, partículas...) (Ministerio de Presidencia, 2011).

Capítulo 4.
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.- Modelo de la investigación

El método propuesto combina el proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) con la técnica Delphi y el método VIKOR.

AHP se utiliza en procesos de toma de decisiones en grupo, en escenarios donde interactúan criterios tangibles e intangibles, cuando las percepciones humanas, los juicios y sus consecuencias tienen repercusión a largo plazo (Bhusman & Rai, 2004; Bitarafan et al., 2012; Cantó-Perelló et al., 2013). Es un método teórico capaz de convertir medidas relativas a escalas absolutas para hacer frente a criterios intangibles basándose en juicios de comparación por pares realizados por expertos (Kurka, 2013; Lee & Chan, 2008). Se utiliza para descomponer un problema complejo en sus partes, ordenar estas partes en un orden jerárquico, asignar valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable y sintetizar los juicios para obtener las prioridades de cada una de ellas. Los juicios, una vez traducidos a valores, deben evaluarse mediante una prueba de consistencia.

La técnica Delphi es un método muy adecuado para la creación de consenso mediante el uso de una serie de cuestionarios anónimos que recopilan datos de un panel de expertos seleccionados previamente, logrando un proceso eficiente y dinámico (Roubelat, 2011; Curiel-Esparza & Cantó-Perelló, 2013). En esta tesis se usa la técnica Delphi para gestionar los tres cuestionarios anónimos, realizados a un panel de expertos, que proporcionan los juicios necesarios para aplicar el AHP. Con el primer cuestionario se consensua la estructura jerárquica en la que se descompone el problema. En el primer nivel de la estructura jerárquica se encuentra el objetivo y en el nivel más bajo las diferentes alternativas o tipologías estructurales. Los niveles intermedios están ocupados por los criterios y sub-criterios que sirven para valorar esas tipologías. En el segundo cuestionario se pide a los expertos que realicen una comparación por pares que proporciona los datos para obtener los vectores de prioridad de los sub-criterios respecto del objetivo, utilizando el AHP. Se repite el proceso para obtener los vectores de prioridad de las alternativas respecto de cada sub-criterio intangible, con los datos proporcionados por un tercer cuestionario. Los vectores de prioridad de las alternativas respecto de

4.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

los sub-criterios tangibles se obtienen a partir de mediciones directas. Finalmente, el método VIKOR utiliza los vectores calculados con el AHP para obtener una solución de consenso cercana a la ideal, que es la que proporciona un consenso máximo de la mayoría y un rechazo mínimo individual del oponente (San Cristobal, 2012; Lee, 2013; Fouladgar et al., 2013). En la Fig. 4.1 se refleja el diagrama de flujo del método utilizado.

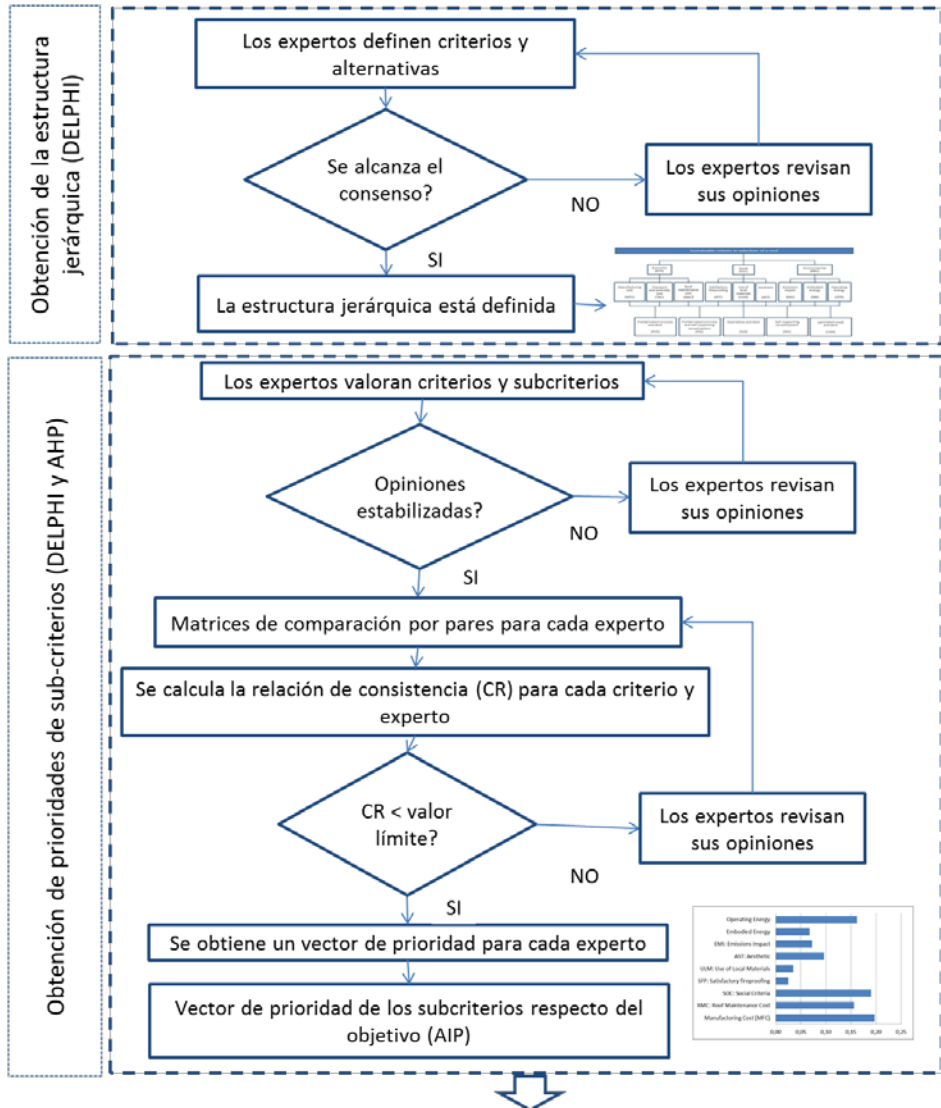


Fig. 4.1. Diagrama de flujo del método utilizado

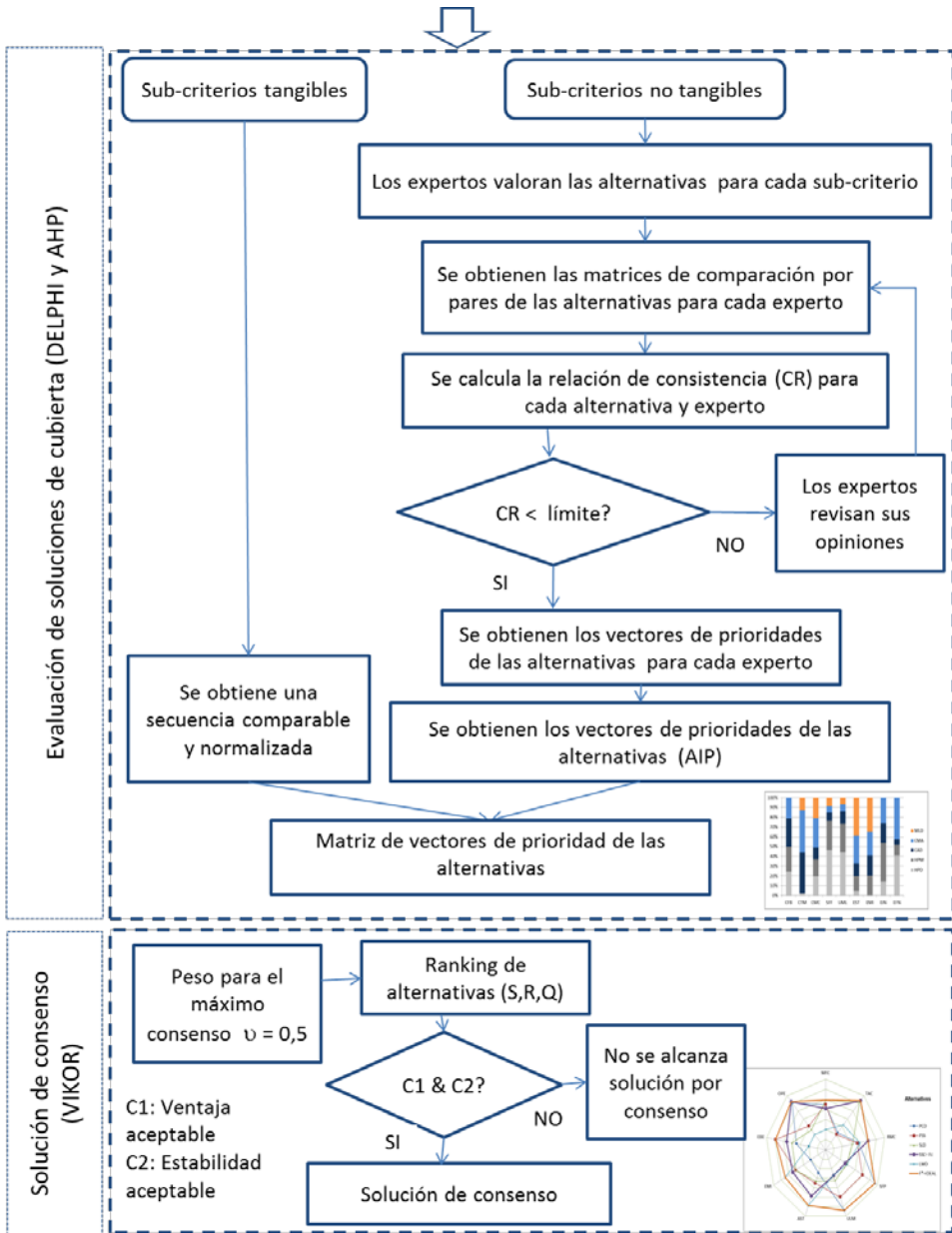


Fig. 4.1. (continuación).

La experiencia en la toma de decisiones, recogida durante años con el método AHP en una amplia variedad de áreas, demuestra que es una

técnica adecuada para la estructuración del conocimiento con objeto de obtener el consenso en problemas multi-criterio complejos.

4.2.- Método Delphi. Cuestionario

El método Delphi es una técnica de investigación social muy conocida, cuyo objeto es obtener una opinión fiable de un grupo de expertos, con el fin de resolver un problema del que se carece de información precisa, mediante la estructuración de la comunicación entre los miembros del grupo y la integración de sus aportaciones (Linstone & Turoff, 1975).

El método nació en los años 50 con fines militares, pero fue a principios de los años 60, cuando fue desclasificado y salió a la luz el primer artículo describiendo el procedimiento, pasando entonces a usarse también en ámbitos académicos y empresariales. Desde entonces, el método Delphi ha sido un instrumento ampliamente utilizado y reconocido y actualmente continúa siendo una herramienta válida como apoyo en los procesos de toma de decisiones (Landeta, 2006). La edición del libro de Linstone y Turoff sobre Delphi, en 1975, supuso un punto de inflexión, al extender el conocimiento del método a una audiencia mucho mayor (Rowe & Wright, 2011).

La técnica consiste en enviar un cuestionario individual a un panel de expertos, iterando el cuestionario de forma controlada las rondas que sea necesario y evitando la confrontación directa de unos expertos con otros. Las preguntas se eligen de forma que pueda conocerse el razonamiento del experto al responder al cuestionario, los factores que considera relevantes, su propia estimación de estos factores e información sobre los datos que considera que le ayudan a conseguir una mejor valoración de esos factores y, por lo tanto, una respuesta correcta. Entre una ronda y otra puede aportarse información a los expertos. Esta consiste bien en datos solicitados por alguno de los expertos, o en factores o consideraciones sugeridas como potencialmente relevantes por uno de ellos. Con respecto a este último tipo de información, es necesario intentar ocultar la opinión real de otros encuestados y limitarse a presentar el factor a considerar sin introducir un sesgo innecesario. Conforme transcurre el proceso, es inevitable que los juicios converjan al ir profundizando en el análisis del problema gracias a la retroalimentación explicada anteriormente. Como no puede esperarse que al final las respuestas siempre coincidan, a veces éstas

deben ser tratadas estadísticamente (Dalkey & Helmer, 1963; Gracht, 2012).

Así pues, las principales características definitorias del método Delphi, son (Landeta & Barrutia, 2011):

- 1) Proceso iterativo. Los expertos que toman parte en un proceso Delphi deben emitir su opinión en más de una ocasión. Esta forma de proceder ofrece al experto la posibilidad de reflexionar y, en su caso, reconsiderar su postura, debido a la aparición de nuevos planteamientos propios o ajenos (la dispersión de las respuestas se estabiliza).
- 2) Anonimato. Las respuestas se dirigen al coordinador del grupo y ningún experto debe conocer las respuestas del resto de participantes. Así se evita la influencia de factores asociados con la personalidad o estatus de los expertos.
- 3) Retroalimentación controlada. El intercambio de información entre los expertos no es libre, pero se produce a través del coordinador del estudio. Diversos experimentos han demostrado que los resultados del grupo son superiores a los individuales, gracias fundamentalmente a la interacción que en ellos se da. El Delphi mantiene y promueve esa interacción, solicitándola en cada ronda y facilitándola antes de la iniciación de la siguiente. Antes del comienzo de cada ronda los expertos conocen los resultados alcanzados en la precedente.
- 4) Respuesta estadística de grupo. Aunque se promueva el consenso, éste no es el objetivo último y no tiene porqué alcanzarse necesariamente. Puede realizarse un tratamiento cuantitativo o estadístico de las respuestas obtenidas.

Es necesario que los expertos seleccionados sean personas racionales con alto conocimiento en la materia. Se entiende por racional una persona cuyas estimaciones son internamente consistentes o, si no lo son y se le percibe de ello, se muestra deseoso de corregirlas y sus probabilidades subjetivas permanecen estables mientras no aparezcan nuevas evidencias reveladoras (Helmer & Rescher, 1959). Sus conocimientos y su experiencia en el tema ayudan a identificar y establecer prioridades y contribuir con criterios adicionales.

En los primeros años de la técnica Delphi se realizaron estudios empíricos por parte de los investigadores, tendentes a poner de manifiesto la relación entre el tamaño del grupo de expertos y la precisión de la estimación. Estos estudios indicaron que el error en la estimación disminuye notablemente por cada experto añadido, hasta llegar a siete elementos, por lo que éste será el número mínimo de integrantes del grupo (Dalkey et al., 1969). Teóricamente las iteraciones seguirán hasta que se determine que se ha logrado el consenso, sin embargo, en la mayoría de los casos la información que necesitamos se consigue con tres iteraciones (Hsu & Sandord, 2007).

4.3.- Técnicas de evaluación multi-criterio: AHP y VIKOR

4.3.1.- Técnicas de evaluación multi-criterio.

Las investigaciones realizadas por los economistas, a finales del siglo XIX y principios del XX, sobre el comportamiento de los consumidores, pueden considerarse un precedente de los MCDM. En un principio, se buscaba maximizar las funciones de utilidad, que expresaban la valoración del elector, que podía ser bien el consumidor o el productor. Las técnicas de evaluación multi-criterio (MCDM, Multiple criteria decision-making) comenzaron a surgir en los años 40 del pasado siglo con el objetivo de buscar un equilibrio entre los intereses contrapuestos de los distintos agentes económicos (García Cascales, 2009).

Las MCDM son fundamentales en las teorías de decisión y análisis. Buscan explícitamente tomar en cuenta más de un criterio para ayudar en los procesos de toma de decisiones. Su objetivo es ayudar, a los que deben tomar la decisión, a comprender aspectos de los problemas a los que se enfrentan, a conocer sus escalas de valores y los de las otras partes, a conocer los objetivos y valores de la organización y a través de la exploración y el conocimiento de estos aspectos, dentro del contexto del problema al que se enfrentan, guiarles en la elección de la decisión a tomar. En otras palabras, las MCDM son útiles en circunstancias que necesitan la consideración de diferentes aspectos para alcanzar el objetivo cuando estos aspectos no pueden ser evaluados en una escala de una única dimensión. (Al-Harbi, 2001).

En asuntos complicados, donde las fuentes de información y las opiniones son variadas, los procesos de pensamiento intuitivo pueden

conducir a error, mientras que el uso de técnicas de evaluación multicriterio permite identificar los factores más importantes y determinar en qué grado afectan unos a otros, lo que permite un rápido y eficaz manejo de la información, que ayuda a resolver los problemas planteados. Estas técnicas están basadas en el análisis, discusión y jerarquización de alternativas con el fin de generar soluciones a problemas concretos que no pueden ser comprendidos mediante una explicación deductiva lineal, de causa y efecto (Saaty, 1980).

La idea básica de un MCDM es muy simple: un conjunto de alternativas o soluciones, al menos dos criterios y obviamente, al menos una persona encargada de tomar decisiones (Turskis et al., 2009). En las decisiones que es necesario tomar en el sector de la construcción normalmente deben tenerse en cuenta aspectos conflictivos, por lo que son muy útiles los MCDM (Mela et al., 2012).

4.3.2.- Método AHP.

El Analytical Hierarchy Process (AHP) es una técnica de evaluación multicriterio, desarrollada en los años 70 por Thomas Saaty como un método para sopesar prioridades en estructuras jerárquicas, usando el autovector principal de una matriz de comparación por pares y que es capaz de medir la consistencia de los datos (Saaty, 1977). Desde entonces esta técnica ha sido ampliamente utilizada en los grupos de toma de decisiones para descomponer una situación compleja en sus partes componentes. Su objetivo es estructurar un problema de decisión a través de una serie de matrices de comparaciones por pares entre los elementos de decisión para obtener sus prioridades (Srdjevic et al., 2013).

El Analytical Hierarchy Process (AHP) contribuye a la resolución de problemas complejos a través de la simplificación de nuestros procesos naturales de toma de decisiones. Consiste en descomponer una situación no estructurada y compleja en sus partes, ordenar estas partes o variables en un orden jerárquico, asignar valores numéricos a juicios o pensamientos subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable y sintetizar los juicios para determinar qué variables tienen mayor prioridad y cómo debe actuarse sobre ellas para influir sobre el resultado de la situación. La necesidad de asignar un valor numérico a cada variable del problema ayuda, a quienes deben tomar las

4.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

decisiones, a mantener patrones de pensamiento consistentes y llegar a una conclusión. Para resolver problemas complejos no necesitamos una forma más complicada de pensar, sino un marco que nos permita pensar en problemas complejos de manera simple. El proceso analítico jerárquico ayuda también a evitar la simplificación excesiva y a identificar y evaluar costes y beneficios (Saaty, 2012).

Para resolver un problema primero se define claramente el objetivo a conseguir. A continuación, este objetivo se descompone en una jerarquía de niveles de forma que cada uno de ellos puede ser estudiado de forma independiente. Los elementos que aparecen en cada nivel deben ser homogéneos para que los expertos sean capaces de evaluarlos haciendo comparaciones por pares. La evaluación entre pares puede realizarse mediante datos de los ítems considerados cuando éstos sean cuantificables o mediante opiniones subjetivas de los expertos que intervienen cuando sean inconmensurables (Saaty, 2008). En el primer nivel de la jerarquía (Fig. 4.2) se encuentra el objetivo global, el siguiente nivel contiene los criterios y sub-criterios, mientras que las alternativas o soluciones del problema se encuentran en el nivel inferior de la jerarquía (Srdjevic et al., 2013).

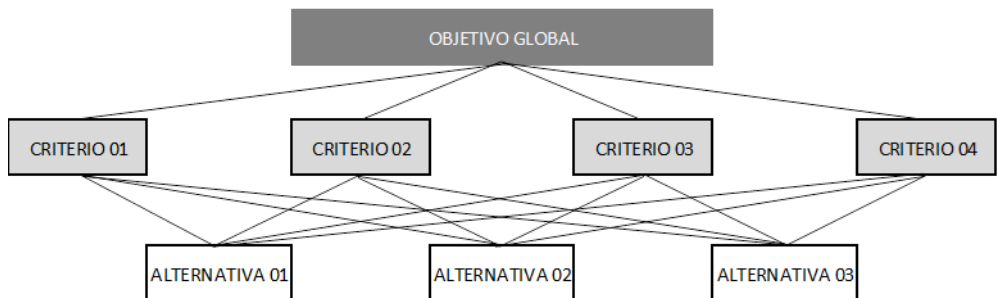


Fig. 4.2. Ejemplo de una jerarquía de objetivos / criterios / alternativas

Para realizar la comparación por pares se utiliza una escala, generalmente la escala sugerida por Saaty, que se adjunta en la Tabla 4.1, en la que se atribuyen valores impares entre 1 y 9 para determinar la importancia relativa de una opción cuando se compara con otra de su mismo nivel.

Gracias a esta técnica, las comparaciones pueden transformarse en valores numéricos aunque respondan a cuestiones intangibles. Esta

capacidad de convertir datos empíricos en valores numéricos distingue la técnica AHP de otras técnicas de comparación de variables.

Se utilizan los números impares con el objeto de que exista una diferencia razonable entre las dos opciones planteadas. Los números pares se reservan para llegar a consenso entre los evaluadores consultados, cuando sea necesario llegar a una negociación entre dos posturas muy cercanas (Saaty, 1980).

Tabla 4.1.- Escala fundamental para comparaciones por parejas (Saaty, 2012).

Intensidad de la Importancia	Definición	Explicación
1	Igual Importancia	Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Importancia Moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
5	Fuerte Importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad se ve favorecida con mucha fuerza sobre la otra. Su dominio puede demostrarse.
9	Extrema importancia	La evidencia a favor de una actividad sobre otra es del mayor orden posible.
2,4,6,8	Para interpolar entre los valores anteriores	A veces es necesario interpolar numéricamente entre juicios, puesto que no hay una palabra apropiada para describirlo.
Recíprocos de los anteriores	Si a la actividad i se le asigna un valor cuando se compara con la actividad j , entonces j tiene el valor recíproco cuando se la compara con i	Una comparación que surge de la elección del elemento más pequeño como unidad, para estimar el mayor como múltiplo de esa unidad.

4.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Una vez realizada la comparación por pares de cada opción con el resto de opciones según se indica en la Tabla 4.2., con los valores resultantes se genera una matriz de comparación por pares A. Si el evaluador decide que el criterio i tiene una importancia moderada frente al criterio j , de acuerdo con la Tabla 4.1., se coloca un 3 en la casilla correspondiente al elemento a_{ij} y el recíproco en la casilla correspondiente al elemento a_{ji} .

Tabla 4.2.- Esquema de comparación por pares

	Opción 1		Opción i		Opción n
Opción 1	1	...	a_{1i}	...	a_{1n}
	\vdots		\vdots		\vdots
Opción i	$1 / a_{1i}$...	1	...	a_{in}
	\vdots		\vdots		\vdots
Opción n	$1 / a_{1n}$...	$1 / a_{in}$...	1

Una vez obtenidos los valores que se encuentran por encima de la diagonal, ya puede completarse la matriz asignando automáticamente los recíprocos y el valor 1 a los elementos de la diagonal, ya que cuando se compara un criterio consigo mismo la respuesta siempre será “las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo”.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & \dots & 1 & \dots & a_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & \dots & 1/a_{in} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

El vector propio de cada matriz A es el vector ω de prioridades que determina el peso de cada elemento respecto del nivel superior. Para encontrar estos vectores propios, se resuelve el sistema lineal $A\omega = \lambda\omega$.
 $\det [A - \lambda \cdot I] = 0$

$\lambda =$ autovalor de la matriz

Pero los juicios, una vez traducidos a valores, deben evaluarse mediante una prueba de consistencia, ya que no dejan de ser aproximaciones de la realidad. Una de las ventajas de AHP frente a otros MCDM es la posibilidad de medir la consistencia de esos juicios, con el fin de garantizar que no se supera un valor límite. La razón (o proporción) de consistencia (CR) se utiliza como el principal indicador de la consistencia. Después de obtener la matriz de comparación por pares, se determina la consistencia utilizando el autovalor $\lambda_{\text{máx}}$ para calcular el índice de consistencia (CI) de la siguiente forma: $CI = (\lambda_{\text{máx}} - n)/(n-1)$ donde n es el orden de la matriz. La consistencia de los juicios se valora con la relación de consistencia CR que resulta de dividir el índice de consistencia CI por un valor que depende del orden de la matriz y que se obtiene de la Tabla 4.3. La matriz de comparación es aceptable si CR es menor de 0,05 cuando $n = 3$, de 0,09 cuando $n = 4$ ó menor de 0,10 si el orden de la matriz es mayor o igual que 5. Si CR es mayor que los valores indicados, el juicio es inconsistente. Para obtener una matriz consistente, los juicios deben ser revisados y mejorados.

Tabla 4.3.- Consistencia media (RCI) (Saaty, 2012)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Saaty & Ozdemir (2003) observaron que cuando se hacen juicios de preferencia por pares, el número de elementos a comparar no debe ser mayor de siete. Cuando el número es mayor, en caso de que CR no sea aceptable, nuestra mente no es capaz de procesar la información para mejorar la consistencia de los juicios.

La aplicación de AHP requiere pues los siguientes pasos (Al-Harbi, 2001):

- 1) Definición del problema y determinación del objetivo que pretende conseguirse con el trabajo.
- 2) Estructura jerárquica desde el nivel más alto, que es el objetivo, hasta el más bajo, en el que se encuentran las distintas alternativas, pasando por los niveles intermedios constituidos por los criterios y sub-criterios.

- 3) Construcción de un conjunto de matrices de comparación por pares para cada uno de los niveles inferiores, con una matriz por cada elemento del nivel inmediatamente superior usando la escala de medida relativa mostrada en la Tabla 4.1. Las matrices de comparación por pares se construyen en términos de qué elemento domina al otro.
- 4) Obtención de los juicios necesarios para construir las matrices del paso 3. En cada matriz de comparación, los recíprocos se asignan automáticamente.
- 5) A continuación se obtiene el vector propio de cada una de las matrices, que proporciona el vector de prioridades de cada elemento respecto del nivel superior.
- 6) Después de obtener todas las matrices de comparación por pares, se determina la consistencia de cada una de ellas. La consistencia de los juicios se valora con la relación de consistencia (CR). Si CR es mayor que los valores límite, el juicio es inconsistente. Para obtener una matriz consistente, los juicios deben ser revisados y mejorados.
- 7) Se repiten los pasos 3-6 para todos los niveles de la jerarquía.

4.3.3.- Método VIKOR

La Optimización multi-criterio consiste en un proceso para determinar la mejor solución posible de acuerdo con unos criterios establecidos. Los problemas prácticos se caracterizan a menudo por la existencia de varios criterios no conmensurables y conflictivos por lo que es posible que no haya ninguna solución que satisfaga todos los criterios de forma simultánea. Por lo tanto, la solución habrá que buscarla en un conjunto de soluciones no-inferiores, o una solución de consenso de acuerdo con las preferencias de los expertos. La idea de la solución de consenso para un problema con criterios conflictivos fue introducida por Yu (1973) y Zeleny (1973) y puede ayudar, a quienes toman las decisiones, a obtener una solución final. La solución de consenso es una solución viable, que es la más cercana a la ideal, y el consenso significa un acuerdo establecido por concesiones mutuas (Sayadi et al., 2009).

En 1980 L. Duckstein y S.Opricovic presentaron una aplicación que utilizaba por primera vez el método de Optimización multicriterio y Solución de consenso (VišeKriterijumska Optimizacija Kompromisno

Resenje, VIKOR), basado en una función de adición que representa "cercanía al ideal". En VIKOR se determina una solución de consenso que proporciona un consenso máximo de la mayoría y un rechazo mínimo individual del oponente, utilizando la normalización lineal para eliminar las unidades de las funciones de criterio. Suponiendo que las alternativas se han evaluado en función de cada sub-criterio, el ranking de consenso puede realizarse mediante la comparación de la proximidad de cada alternativa a la ideal (Duckstein & Opricovic, 1980). La valoración de los criterios para la obtención de la solución de consenso se desarrolla a partir de un espacio L_p , utilizado como una función de adición en un método de programación por consenso. Para cada alternativa j , la prioridad obtenida según el criterio i -ésimo se denomina mediante f_{ij} . El desarrollo del método VIKOR, para I criterios y J alternativas, se inicia con la siguiente forma de métrica- L_p :

$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^I [\omega_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)]^p \right\}^{1/p} \quad (4.1)$$

$1 \leq p \leq \infty; j = 1, 2, \dots, J$

Para medir las distancias a la solución ideal, en del método VIKOR se utilizan dos métricas, que corresponden a los valores de $p = 1$ y $p = \infty$, con lo que se obtienen dos listas: S_j y R_j respectivamente (Opricovic & Tzeng, 2004). La alternativa que obtiene un mínimo valor de S_j es la que presenta el máximo consenso, y la solución que obtiene un valor mínimo de R_j es la que presenta un menor rechazo por parte del oponente. El método permite la introducción de un parámetro ν para controlar el equilibrio entre las dos métricas, según sea la estrategia que quiera seguirse, con lo que se obtiene una tercera lista Q_j que es la que proporciona la solución de consenso.

Para alcanzar la solución de consenso con el método VIKOR se siguen los siguientes pasos:

- Se obtiene el mejor valor de f_i^* y el peor de f_i^- para cada criterio usando las ecuaciones $f_i^* = \max_j \{f_{ij}\}; f_i^- = \min_j \{f_{ij}\}$,
y los valores S_j , R_j y Q_j usando las ecuaciones 4.2 a 4.4. para I criterios:

$$S_j = \sum_{i=1}^I \omega_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (4.2)$$

$$R_j = \max_i \left(\omega_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right) \quad (4.3)$$

$$Q_j = v \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (4.4)$$

donde

$$S^* = \min_j S_j$$

$$S^- = \max_j S_j$$

$$R^* = \min_j R_j$$

$$R^- = \max_j R_j$$

v es el peso para el máximo consenso

$1 - v$ es el peso para el menor rechazo individual.

- Se clasifican las alternativas colocando los valores Q , S , R en orden ascendente.
- La mejor clasificada según el valor de Q , es decir, la que tiene un valor mínimo, se propone como solución de consenso si se cumplen las siguientes condiciones:

Condición 1: *Ventaja aceptable*: la diferencia entre el primer y segundo clasificado en la lista de Q es mayor que DQ .

siendo

$$DQ = 1/(J-1)$$

J el número de alternativas.

Condición 2: *Estabilidad aceptable en la toma de decisiones*: la primera alternativa en la clasificación según Q también es la que resulta mejor clasificada según S y R .

Capítulo 5.
OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

Como se ha visto en el capítulo 3, con las herramientas existentes es posible valorar la eficiencia energética del edificio construido y a nivel estructural, las normas españolas permiten evaluar la sostenibilidad de la estructura, aplicando criterios medioambientales y sociales. En todos los casos se compara la solución que se está evaluando con las mejores técnicas disponibles (MTD). Cuando se trata de comparar distintos tipos estructurales, no existe una solución de referencia, por lo que, para introducir criterios de sostenibilidad en la elección de la estructura de una cubierta en edificios de luces medias, se aplica el modelo híbrido de criterios múltiples y diferentes técnicas definido en el capítulo 4, que permite comparar entre sí distintas tipologías estructurales, teniendo en cuenta el Análisis del Ciclo de Vida.

En este capítulo se procede a obtener la estructura jerárquica. En el primer nivel se encuentra el objetivo y en el nivel más bajo las diferentes tipologías estructurales. Los niveles intermedios están ocupados por los criterios y sub-criterios que sirven para valorar las diferentes tipologías.

5.1. Planteamiento del problema. Objetivo

La tecnología estructural es una cuestión de síntesis, donde deben cumplirse múltiples requisitos mediante la aplicación de distintas tecnologías básicas, tales como la tecnología de materiales, de fabricación, de información y de automatización. El diseño estructural incluye fases creativas, de análisis, de optimización y de síntesis. En cada una de estas fases hay muchos métodos para buscar la mejor solución. En la fase creativa se pueden aplicar varios métodos de innovación y de intercambio de ideas. La fase de análisis y optimización requiere de habilidades tales como las matemáticas aplicadas, física, química e incluso la biología (Sarja, 2002). Sin embargo, en los edificios con luces medias, se tiende a utilizar estructuras tradicionales, sin realizar un estudio, en la fase de diseño o creativa, de las diferentes soluciones existentes en el mercado o considerando únicamente el coste de la estructura. El objetivo de esta tesis doctoral y primer nivel de la jerarquía, es la implementación de criterios de sostenibilidad en la selección de la estructura de una cubierta en edificios de luces medias.

Para introducir criterios de sostenibilidad, es necesario pensar en el “triple principio”, que se refiere a la consideración de los aspectos

económicos, sociales y medioambientales. En la evaluación de las distintas tipologías estructurales debe tenerse en cuenta tanto la fase de construcción como la de uso o funcionamiento.

El edificio se encuentra situado en la Comunidad Valenciana o en una zona con clima y altitud similares. Como ejemplo, se analiza un pabellón polideportivo escolar de 17x30 m y una altura por debajo de la estructura de la cubierta de 7,0 m.

5.2. Establecimiento de criterios y alternativas

El primer nivel es el objetivo, que se descompone en una jerarquía de niveles de forma que cada uno de ellos puede ser estudiado de forma independiente. Los siguientes niveles contienen los criterios y sub-criterios, mientras que las alternativas o soluciones del problema se encuentran en el nivel inferior de la jerarquía. En la primera fase de Delphi se define un conjunto de criterios y alternativas mediante un cuestionario anónimo, realizado a un panel de expertos. Este panel está formado por diez técnicos que trabajan en el campo de las estructuras, construcción y medioambiente, en empresas de proyectos, constructoras y promotoras: dos ingenieros dedicados a la docencia y diseño de estructuras, tres arquitectos que trabajan en la ejecución de estructuras con luces medias, dos ingenieros dedicados a labores de gestión y dirección en empresas de construcción, un ingeniero con experiencia en ejecución de edificios de luces medias y en gestión de empresas inmobiliarias, un experto en calidad y medio ambiente que desarrolla su labor en empresas constructoras en el ámbito de la edificación y por último, un ingeniero dedicado al cálculo de estructuras. Su experiencia y conocimiento del problema les ayuda a identificar y establecer prioridades y les permite contribuir con criterios adicionales. Delbecq et al. (1975) sugieren que diez sujetos son suficientes si su origen es homogéneo. El cuestionario se repite para que los expertos revisen sus juicios iniciales hasta consensuar la lista organizada en niveles que se representa en la Fig. 5.1.

5.2.1. Definición de criterios

El nivel intermedio de la jerarquía comprende los criterios y sub-criterios que van a utilizarse para la evaluación de la cubierta en términos de sostenibilidad. De entre todos los criterios existentes para

valorar la sostenibilidad, los expertos han elegido aquéllos en los que más influencia tiene la tipología estructural. A lo largo de las sucesivas rondas, algunos de los criterios considerados inicialmente, como integración paisajística, posibilidad de reciclaje, aislamiento térmico y acústico o toxicidad, se han descartado. La durabilidad se ha considerado que está integrada en el coste de mantenimiento, la eficiencia energética inicial ha derivado a energía interna y energía de funcionamiento y el planteamiento inicial de los criterios económicos que se dividía en costes y facilidad de montaje también se ha modificado.

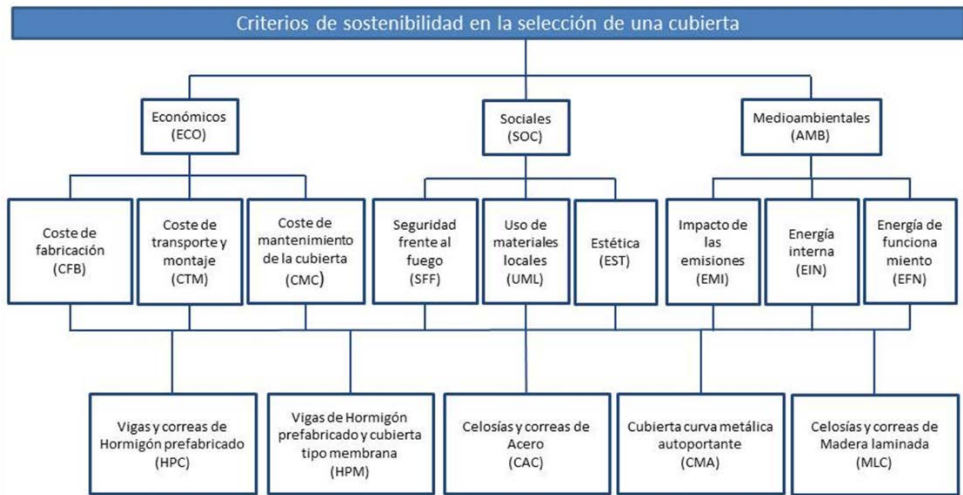


Fig. 5.1. Estructura jerárquica

Después de la primera encuesta, la estructura consensuada por los expertos en este nivel es la siguiente: Criterios económicos (ECO), que se estructuran en coste de fabricación (CFB), coste de transporte y montaje (CTM) y coste de mantenimiento de la cubierta (CMC). Criterios sociales (SOC), estructurados en seguridad frente al fuego (SFF), uso de materiales locales (UML) y estética (EST). Y, por último, los criterios ambientales (AMB), subdivididos en impacto de las emisiones (EMI), consumo de energía en la fabricación de la cubierta o energía interna (EIN) y la energía de funcionamiento (EFN).

Criterios económicos

El impacto económico de la cubierta debe ser considerado durante la etapa de construcción y también en términos de su mantenimiento y conservación a lo largo de su ciclo de vida (San José et al., 2006; San José Lombera et al., 2007). Los costes de fabricación se refieren al coste de la materia prima y de la fabricación y a la facilidad de adquisición (Reza et al., 2011). Los costes de transporte y de montaje se refieren al coste de los medios necesarios para el transporte y colocación en obra de los diferentes elementos, la velocidad de ejecución, el espacio necesario para acopio y el coste del control necesario durante la ejecución. En el transporte son factores importantes el peso de la carga, la distancia, el medio de transporte y el combustible empleado. En el coste de mantenimiento influye la durabilidad del material (Lowinska-Kluge & Blaszczynski, 2012), es decir, la capacidad que tiene para mantener sus propiedades físicas y mecánicas a lo largo de toda la vida útil de la construcción: reacción con agentes oxidantes, resistencia en ambientes ácidos o alcalinos, resistencia al agua basada en absorción de humedad. El mantenimiento tiene carácter preventivo, con el objeto de retrasar la aparición de problemas y facilitar su resolución. Incluye el coste de las inspecciones, los medios necesarios para la auscultación de la estructura y las actividades esenciales para el mantenimiento, reparación y refuerzo tanto de los elementos estructurales como auxiliares (Khosrowshahia & Alanib, 2011; Kim et al., 2013; Khosrowshahia et al., 2014; Kim et al., 2014).

La instrucción de hormigón estructural EHE-08 (Ministerio de Presidencia, 2008), incluye un capítulo dedicado al mantenimiento, en el que prescribe la obligatoriedad de incluir un Plan de Inspección y Mantenimiento en todas las estructuras. En este Plan debe incluirse la periodicidad de las inspecciones, la técnica de mantenimiento recomendada y los medios auxiliares necesarios.

El CTE DB SE-A, Seguridad estructural. Acero (Ministerio de Vivienda, 2006), recomienda que se realicen inspecciones periódicas, en las que se debe prestar especial atención a los síntomas de daños estructurales, como fisuras en cerramientos provocadas por deformaciones excesivas e identificar causas de daños potenciales como humedades o uso inadecuado. Con una periodicidad mayor deben realizarse inspecciones específicas a la estructura, con el objeto de detectar problemas de

corrosión o deslizamientos de uniones atornilladas, por ejemplo. Entre las operaciones de mantenimiento de la estructura de acero tiene especial importancia, la pintura y la protección contra incendios, que se ajustarán a los plazos de garantía marcados por los fabricantes de los productos. En cuanto a la madera, el CTE DB SE-M dice que debe realizarse una protección preventiva, con el objeto de mantener en un nivel aceptable la probabilidad de sufrir daños causados por agentes bióticos y abióticos. Los fabricantes deberán indicar las instrucciones de mantenimiento de su producto. Esto afecta tanto a los elementos de madera como a los adhesivos y a las uniones metálicas.

Una comparación de los datos de productividad entre el sector industrial y el de la construcción, revela que la industria presenta un aumento de productividad del 10% anual, mientras que la productividad en la construcción está disminuyendo continuamente. Este fenómeno se observa en casi todos los países y puede explicarse, entre otras razones, porque la construcción no tiene la capacidad de ensayar antes de construir (Li et al., 2008).

Criterios sociales

La satisfacción y seguridad del usuario son factores clave en la etapa de diseño. La resistencia al fuego es una cualidad importante para un material estructural. Reduce el riesgo de los usuarios frente a un desastre, y se puede evitar el uso de una protección adicional para obtener los valores mínimos requeridos por la normativa (Lo et al., 2008; Yu et al., 2013). Las vigas prefabricadas de hormigón pretensado pueden alcanzar fácilmente una resistencia al fuego de 180 minutos sin necesidad de revestimientos que alteren la estética de la estructura, mientras que en las vigas metálicas, con pintura intumescente generalmente puede llegarse hasta R120 y para alcanzar resistencias mayores es necesario recurrir a recubrimientos proyectados, que deben reducirse a estructuras con bajos requerimientos estéticos. La madera puede tratarse con productos que retardan el proceso de combustión y evitan la ignición (Tondi et al., 2013). Con la aplicación de barnices se pueden alcanzar estabildades de hasta 60 minutos. Cuando la madera comienza a arder, se forma una capa superficial de carbón que actúa como una barrera térmica, protegiendo las propiedades resistentes del interior de la viga, prácticamente intactas.

Los materiales que se extraen, procesan y fabrican en la región se consideran preferibles, ya que son de fácil acceso y ayudan al desarrollo de la economía local (Florez & Castro-Lacouture, 2013; Markelj et al., 2014).

El sub-criterio estético valora la calidad visual lograda en el interior del recinto y la flexibilidad de los materiales en cuanto a la elección de formas que mejoren esta calidad visual (Ghomeshi & Jusan, 2013; Alwaer & Clements-Croome, 2010).

Criterios medioambientales

El análisis del Ciclo de Vida optimiza soluciones de diseño favorables para el medio ambiente teniendo en cuenta los impactos tanto durante la ejecución y demolición final de la cubierta, como los debidos al funcionamiento del edificio (Malmqvist et al., 2011; Broun et al., 2014). El impacto ambiental de la cubierta se estudia a través del consumo de materias primas y energía y la consecuente contaminación y generación de residuos, considerando tres sub-criterios (Ramesh et al., 2010; Shao et al., 2014; Karaguzel et al., 2014): Impacto de residuos y emisiones, consumo de energía interna y por último, energía de funcionamiento.

El impacto de residuos y emisiones se refiere a los diferentes tipos de emisiones y residuos que se producen tanto en la fase de extracción y manufactura de los materiales como en la fase de construcción de la cubierta. El efecto invernadero antropogénico causado por la emisión de gases se expresa en términos de su potencial de calentamiento global calculado como el Dióxido de Carbono equivalente (Zapata-Poveda & Tweed, 2014; Fernandez-Ceniceros et al., 2013).

El consumo de energía interna es la energía utilizada durante la fase de construcción. Contenido de energía de los materiales referida a la energía utilizada en la extracción de las materias primas, la fabricación y el transporte a pie de obra y la energía invertida en la construcción de la cubierta. Al encontrarse el edificio una zona donde el agua es un recurso escaso, la demanda de agua también sería un indicador importante del impacto ambiental (Zabalza et al., 2011; Goggins et al., 2010), pero en este estudio sólo se incluyen los indicadores más significativos y discriminatorios. El consumo de agua en la fase constructiva no se considera porque, en el caso más desfavorable, es menos del 0,01% del consumo de agua durante el ciclo de vida del

edificio (Pons & Aguado, 2012). El consumo de agua en la fase de uso y mantenimiento tampoco se considera porque es el mismo independientemente de la tipología estructural.

El diseño térmico, referido a los procesos de transmisión de calor que tienen lugar entre el edificio y su entorno es un factor clave en la energía de funcionamiento. El uso de materiales de cubierta con alta calidad térmica reducirá sensiblemente la energía de funcionamiento del edificio y en consecuencia la demanda energética durante su ciclo de vida, incluso si esto supone un pequeño incremento del consumo de energía primario (Yu & Woo, 2013). De acuerdo con la Directiva 2010/31/UE, la eficiencia energética de los edificios debe calcularse con una metodología que puede ser diferente a escala regional, y debe basarse no solo en las temporadas en que es necesario el uso de calefacción, sino que debe cubrir los resultados de eficiencia de un edificio a lo largo del año. Pero la eficiencia energética de un edificio no sólo depende de las propiedades térmicas de los materiales utilizados, sino también de su forma. La geometría tiene una fuerte influencia sobre la demanda de energía de los edificios, ya que influye en la inercia térmica y en las pérdidas de energía (Roca et al., 2013). En términos de la demanda de energía o de otros recursos, las principales características de un edificio son el volumen y la compacidad. Los edificios con una envoltura externa de menor área, conteniendo la misma zona climatizada, experimentarán pérdidas de energía menores (Parasonis et al., 2012).

5.2.2. Definición de alternativas

De entre los edificios de luces medias, como naves industriales, centros comerciales, centros culturales o instalaciones deportivas, se ha decidido estudiar un pabellón polideportivo. Se ha elegido este caso particular por ser un elemento significativo con unas dimensiones regladas, ya que de acuerdo con la legislación española (Ministerio de Educación, 2010), uno de los requisitos que deben cumplir los centros docentes que imparten la educación primaria, la educación secundaria obligatoria y/o el bachillerato es contar con un gimnasio con una superficie adecuada al número de puestos escolares. La instalación mínima de cualquier instituto es el módulo M-3a de 15 x 27 metros de sala y 7 metros de altura, considerado como módulo de baloncesto

5.- OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

escolar (CSD, 2007). Según Adler (1999), los pabellones dedicados a actividades a nivel recreativo como baloncesto, balón-bolea, gimnasia, judo o kárate deben tener unas medidas en planta de 17x30 m y una altura por debajo de la estructura de la cubierta de 7,0 m. Por lo tanto, se han elegido estas medidas que cumplen también las marcadas por el CSD.

El Comité Olímpico Internacional concedió a Barcelona, en 1986, la organización de los Juegos de 1992. Este acontecimiento originó una política encaminada a resolver las limitaciones que ofrecía el país en materia de infraestructuras deportivas generales y en infraestructuras deportivas escolares. Como fruto de esta política surgió el acuerdo entre el Ministerio de Educación y el Consejo Superior de Deportes para la realización de un El Plan de Extensión de la Educación Física en Centros Escolares que asegurase la existencia de instalaciones deportivas en los centros públicos de enseñanza. El primer diseño de edificios del Plan Escolar presentaba módulos pensados para la prefabricación, que fueron construidos con estructuras de hormigón prefabricado. Posteriormente comenzó el desarrollo de otro tipo de módulos para realizar pabellones con estructura de acero y cerramientos de panel de chapa (CSD, 2007).

En el momento de abordar un proyecto, es fundamental la elección de un material estructural que permita un buen desarrollo del proyecto y un buen rendimiento en la fase de construcción (Valladares Pagliotti, 2013). El éxito de los sistemas prefabricados se debe a su alta velocidad de montaje, a su bajo coste y al control de calidad (Mirzaei, 2012).

Uno de los principales objetivos de la investigación en el campo de la construcción es intentar reproducir procesos de construcción estándar utilizando productos industriales (Skibniewski & Zavadskas, 2013). El desarrollo de los métodos y tecnologías constructivas en las últimas décadas ha cambiado las prácticas de construcción de todo el mundo, permitiendo el uso de estructuras ligeras estandarizadas con grandes ventajas económicas, estructurales y ambientales. Estos sistemas son limpios, rápidos y de fácil ejecución, además de reducir el consumo de materiales de construcción debido a su ligereza (Naji et al., 2014). Los fabricantes de láminas de acero han desarrollado una nueva aplicación: los arcos autoportantes conformados en frío, una forma estructural que resiste muy bien las cargas. Se han desarrollado dos tipos principales

de perfiles: el primero se compone de láminas acanaladas curvadas en forma de arco. La luz de estos arcos varía de cuatro a ocho metros y se colocan entre las vigas principales de la estructura. El segundo se obtiene por plegado de una chapa de acero plana para formar una gran nervadura con forma de omega y estampación en una forma curvada. La luz de estos arcos se extiende de 15 a 30 m (Casariego et al., 2011). Estos paneles de acero realizan al mismo tiempo la función de cubierta y de sistema estructural. Su popularidad se debe a su economía y a la facilidad de fabricación, producción e instalación (Xu et al., 2001).

La investigación en el campo de la tecnología de la construcción también se centra en otros materiales, tales como la madera, material natural ampliamente explotado en las estructuras, que se ha redescubierto gracias al desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación, como la madera laminada, que mejora su resistencia al fuego (Carpentieri et al., 2015). El desarrollo de la madera laminada ha ampliado la gama de usos de la madera proporcionando un gran potencial para aplicaciones en elementos estructurales de alto rendimiento (Kobel et al., 2014; Naslund & Johnsson, 2014). Su potencial deriva principalmente de sus apreciadas cualidades estéticas y perceptuales. El módulo de elasticidad de la madera es bajo comparado con otros materiales, por lo que los elementos estructurales tendrán un tamaño mayor, pero también presenta ventajas debido a su bajo peso (Valladares Pagliotti, 2013).

Se ha estudiado una muestra de pabellones polideportivos desarrollados en los últimos años en las comunidades de Valencia y las Islas Baleares. En el 75% de estos proyectos, la solución estructural está formada por celosías metálicas, en el 17% por vigas de hormigón prefabricado, que son las soluciones propuestas por el CSD y en un 8% se había elegido una cubierta curva autoportante.

Tanto las tipologías propuestas por el CSD, como otras producto del desarrollo tecnológico de la industria de la construcción, se han sometido al panel de expertos aplicando la técnica Delphi. Con la encuesta realizada a los expertos se han descartado algunas soluciones por motivos técnicos y otras por motivos económicos. Las vigas metálicas de alma llena, vigas Boyd y placas aligeradas pretensadas se descartan porque las luces a cubrir son excesivas para estos tipos estructurales. Además, estas últimas, igual que las estructuras mixtas

5.- OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

formadas por viga metálica y forjado con chapa colaborante, están indicadas cuando las cargas son elevadas. Las estructuras espaciales y otras soluciones no industriales, como estructuras textiles o mixtas con vidrio y acero están indicadas para estructuras de mayores luces o edificios singulares, por lo que no resultan económicas en este caso.

Después de eliminar las tipologías indicadas en el párrafo anterior, la lista de consenso con las soluciones a la que se ha llegado para esta tesis es la siguiente:

- Alternativa 1: Vigas y correas de hormigón prefabricado pretensado (HPC) y cubierta plana.
- Alternativa 2: Vigas de Hormigón prefabricado y cubierta curva autoportante tipo membrana (HPM).
- Alternativa 3: Viga en celosía y correas de acero y cubierta plana (CAC).
- Alternativa 4: Cubierta curva metálica autoportante apoyada en vigas metálicas de fachada (CMA).
- Alternativa 5: Celosías y correas de madera laminada y cubierta plana (MLC).

HPC y CAC son las soluciones tradicionales y entre ellas, CAC se prefiere generalmente a causa de su ligereza. HPM y CMA son producto de la investigación en construcción, que reproduce con materiales ligeros la forma tradicional del arco, estructura que mejor se adapta a las cargas que debe resistir. En la alternativa MLC se utiliza un producto natural ampliamente explotado en las estructuras de edificación, pero que ha aumentado sus prestaciones con el uso de la madera laminada. En todas las alternativas se ha considerado una cubierta tipo sándwich, con las mismas propiedades térmicas.

Con el objeto de valorar, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental, las distintas alternativas, éstas se han dimensionado considerando las siguientes acciones:

Peso propio de la estructura

Peso cubierta: 0,26 kN/m²

Sobrecarga de uso: 0,40 kN/m²

Nieve: se ha calculado de acuerdo con el Eurocódigo 1 para la Península Ibérica, zona 2 y topografía normal.

Viento: se ha calculado de acuerdo con el CTE-DB-SE-AE para zona A, velocidad básica 26 m/s y grado de aspereza IV, zona urbana industrial o forestal.

Para las distintas situaciones de proyecto, los coeficientes de mayoración de cargas y las combinaciones de acciones se han definido de acuerdo con los criterios del Código Técnico de edificación, Documento Básico Seguridad Estructural (CTE DB SE). Los coeficientes de seguridad y de combinación utilizados se recogen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Coeficientes de seguridad y Combinación

	Coeficientes de seguridad		Coeficientes de combinación		
	Favorable	Desfavorable	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Permanente	1,00	1,35	-	-	-
Sobrecarga	0,00	1,50	0	0	0
Viento	0,00	1,50	0,6	0,5	0
Nieve	0,00	1,50	0,5	0,2	0

Las combinaciones utilizadas son las siguientes:

Capacidad portante. Situación persistente o transitoria

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Aptitud al servicio. Combinación característica

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Aptitud al servicio. Acciones de corta duración

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Aptitud al servicio. Combinación casi permanente

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

5.- OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

- Alternativa 1: Vigas y correas de hormigón prefabricado pretensado (HPC) y cubierta plana.

La estructura resistente principal en la solución HPC está formada por vigas prefabricadas de hormigón pretensado en doble T y correas (Fig. 5.2). Las vigas en doble T son el producto básico más conocido de la prefabricación, ya que permiten el máximo aprovechamiento resistente con la mínima sección. Consisten en un alma con una cabeza superior de compresión y una inferior de tracción.

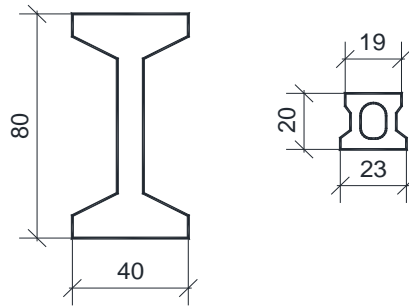


Fig. 5.2. Vigas y correas de hormigón prefabricado (HPC)

Se aplica en soluciones isostáticas con pendientes bajas, del 1 al 5% y permite alcanzar luces de hasta 45 m. En esta solución es necesario colocar unas correas de hormigón para apoyo de la cubierta. Se han colocado correas alveolares cada 2,83 m. Las vigas se colocan cada 5,0 m. y apoyan en los pilares (Fig. 5.3).

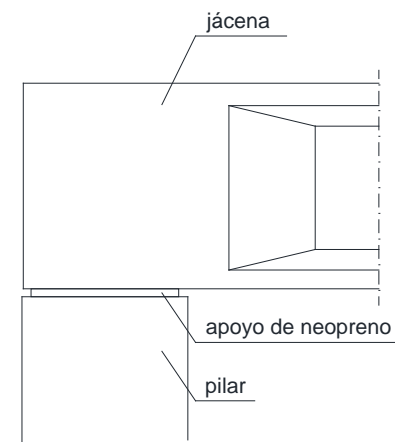


Fig. 5.3. Apoyo de vigas en pilar (HPC)

Para dimensionar la estructura se ha utilizado el programa CYPE 3D, obteniéndose unos momentos máximos de 11,43 kNxm en las viguetas y 407,28 kNxm en las vigas (Fig. 5.4). Las características de los elementos prefabricados elegidos se indican en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2.- Características técnicas de vigas y correas (HPC).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
		VIGAS	CORREAS
CANTO	(m)	0,80	0,20
PESO	(kN/m)	3,7	0,64
Mmáx.	(mkN)	694	16,40

5.- OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

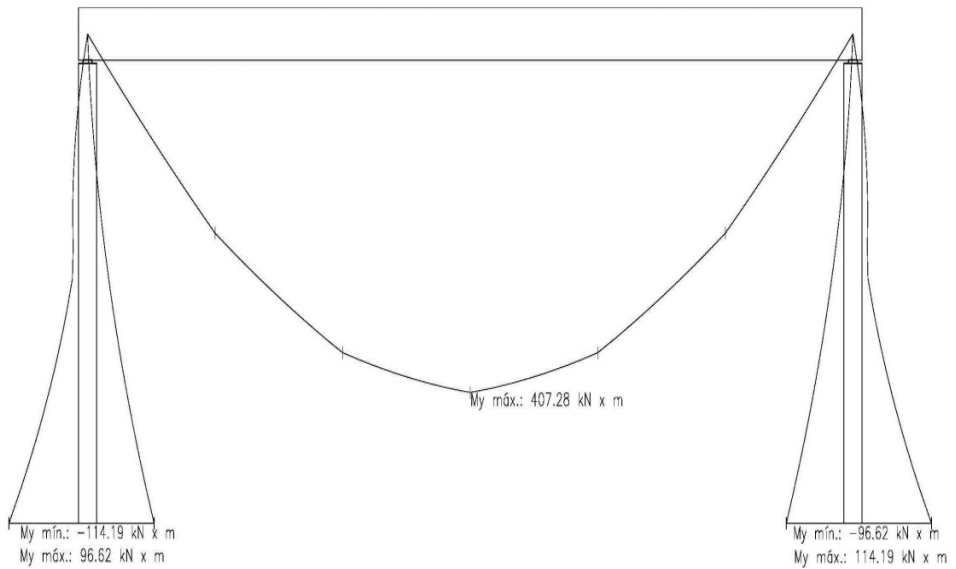


Fig. 5.4. Ley de momentos flectores en pórticos.

La cubierta sándwich se forma con dos perfiles metálicos de 0,8 mm de espesor (Fig. 5.5) separados por unos perfiles en forma de omega y con un aislamiento intermedio. Las características mecánicas del material del perfil de la cubierta se indican en la Tabla 5.3.

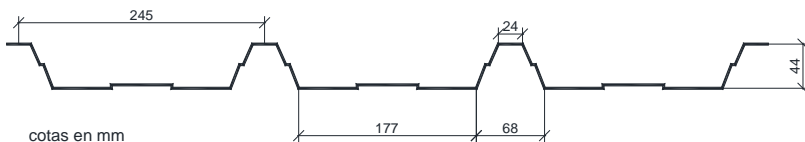


Fig. 5.5. Perfil metálico de la cubierta.

Tabla 5.3.- Características mecánicas del perfil de la cubierta.

Límite Elástico	$\geq 250 \text{ N/mm}^2$
Material Base Calidad	S250GD
Límite de Rotura	$\geq 330 \text{ N/mm}^2$
Módulo de Elasticidad	210.000 N/mm^2
Alargamiento de Rotura	Mín. 19%

- Alternativa 2: Vigas de Hormigón prefabricado y cubierta curva autoportante tipo membrana (HPM).

La estructura resistente principal en la solución HPM está formada por vigas prefabricadas de hormigón en forma de Y de 1,20 m de canto colocadas cada 5,0 m. y apoyadas en los pilares (Fig. 5.6). Para el dimensionamiento de las vigas se ha comprobado que la carga lineal que soportan, excluido el peso propio, es menor que la carga máxima indicada por el fabricante, considerando una limitación de flecha de $L/500$. Las características de los materiales que conforman la viga se indican en la Tabla 5.4.

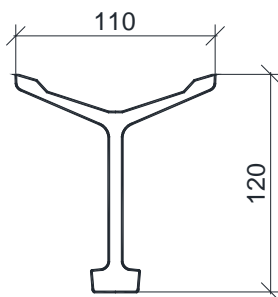


Fig. 5.6. Viga prefabricada de hormigón en forma de Y (HPM).

Tabla 5.4.- Características técnicas de los materiales de la viga Y.

Hormigón	HP60/AC/12/IIa
Armadura activa	Y1860 S7
Armadura pasiva	B500S

En ellas apoya una lámina acanalada curvada en forma de arco autoportante con un radio de 800 mm. El ámbito de aplicación de las vigas abarca luces desde 15 hasta 40 m. Respecto a las soluciones tradicionales, permite eliminar las correas para apoyo de las chapas y los canalones, ya que la misma viga hace de canalón, llevando el agua a las bajantes situadas en la fachada. Pueden diseñarse cubiertas con interejos de hasta 8,0 m. La cubierta sándwich se forma con dos perfiles metálicos curvados de 0,8 mm de espesor con la misma geometría que en la solución de cubierta plana, separados por unos perfiles en forma

5.- OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

de omega y con un aislamiento intermedio. Se ha comprobado que la carga que tiene que soportar es menor que la máxima indicada por el fabricante (Fig. 5.7).



Fig. 5.7. Vigas de Hormigón prefabricado y cubierta membrana (HPM).

- Alternativa 3: Viga en celosía y correas de acero y cubierta plana (CAC).

La estructura resistente principal en la solución CAC está formada por vigas en celosía tipo Warren de 1,40 m de canto, colocadas cada 5,0 m y apoyadas en los pilares. La viga triangulada no permite esbelteces tan grandes como la de alma llena, pero permite disminuir el peso y por tanto aumentar la luz, con la consiguiente ventaja económica.

Cuando la inclinación del faldón es pequeña se disponen vigas en celosía. La viga de celosía conserva las cabezas de la viga maciza, transformadas en los cordones inferior y superior, que trabajan respectivamente a tracción y compresión, pero el alma es sustituida por unos elementos en tracción o en compresión que absorben el esfuerzo cortante. En las vigas de acero, para aligerar el alma se empezó por sustituirla por una celosía simple muy cerrada. Después de probar

distintos tipos de vigas, las disposiciones que se mantuvieron fueron las triangulaciones simples con lados no muy diferentes en longitud y con ángulos comprendidos entre los 45° y los 60°. También interesa que los recuadros sean grandes para disminuir las tensiones secundarias (Torroja, 1984). El perfil elegido para los cordones y las diagonales es tubo estructural cuadrado (Fig. 5.8).

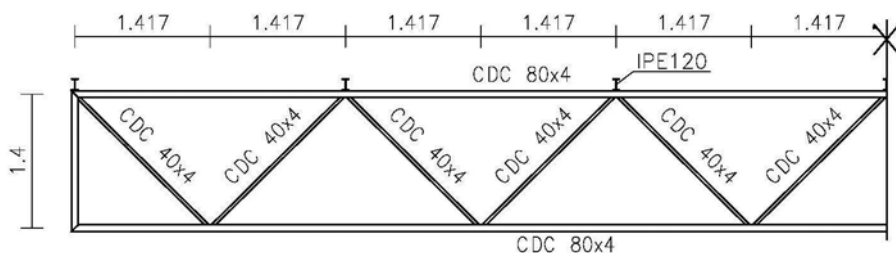


Fig. 5.8. Perfiles viga en celosía y correas (CAC).

La cubierta sándwich está formada por dos perfiles planos de 0.8 mm de espesor que apoyan en correas formadas con perfiles IPE120 colocados cada 2,83 m. Estas correas transmiten las cargas a las vigas en celosía. Las luces normales para este tipo de vigas son de 10 a 30 metros.

La viga Warren es la más representativa de esta tendencia. Tiene la ventaja de que todas las barras son iguales. La viga Pratt presenta, frente a ésta, la ventaja de que trabaja con los montantes verticales (más cortos) en compresión y las diagonales (más largas) en tracción. En la actualidad la tendencia es igualar las barras, realizar el máximo número posible de uniones soldadas en taller y atornillar las restantes en obra. La utilización de perfiles tubulares ha permitido suprimir las cartelas, mejorando la ejecución y la estética de las estructuras trianguladas.

Para dimensionar la estructura se ha utilizado el programa CYPE 3D siguiendo el Código Técnico de Edificación, Documento Básico Seguridad Estructural, Acero (CTE DB SE-A). En la Fig. 5.9 se representan los esfuerzos axiales obtenidos y el modelo de cálculo y en la tabla 5.5, las características mecánicas de los perfiles obtenidos en el cálculo.

5.- OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

Tabla 5.5.- Características mecánicas de las barras (CAC).

Descripción y Características mecánicas						
Barra	Perfil (Serie)	Longitud (m)	β_{xy}	β_{xz}	A (cm ²)	I _{yy} (cm ⁴)
Pilares	HEB 200	8,500	0,7	0,70	78,10	5696,00
Dinteles	IPE 140	2,833	1,0	1,00	16,40	541,20
Cordones	CDC 80x4	2,833	1,0	1,00	11,74	110,63
Diagonales	CDC 40x4	1,992	1,0	1,00	5,34	10,92
Correas	IPE 120	5,000	1,0	1,00	13,20	317,80
Arriostramientos	Ø10	5,747	0,0	0,00	0,79	0,05
Montantes	CDC 80x4	1,400	0,7	2,00	11,74	110,63
Pilares	HEB 200	7,100	0,7	2,00	78,10	5696,00
Notación:			A: Área de la sección transversal			
β_{xy} : Coeficiente de pandeo en el plano 'XY'			I _{yy} : Inercia de la sección alrededor del eje local 'Y'			
β_{xz} : Coeficiente de pandeo en el plano 'XZ'						

En el anexo 2 se adjunta el dimensionamiento de los perfiles más desfavorables para el cordón inferior, el superior y las diagonales. El coeficiente de aprovechamiento de las barras es en todos los casos inferior al 100%.

Material utilizado: Acero laminado S275:

E: Módulo de elasticidad:	210.000 MPa
ν : Módulo de Poisson:	0,300
G: Módulo de cortadura:	81.000 MPa
f_y : Límite elástico:	275 MPa
α_t : Coeficiente de dilatación:	0,000012 m/m°C
γ : Peso específico:	78,5 kN/m ³

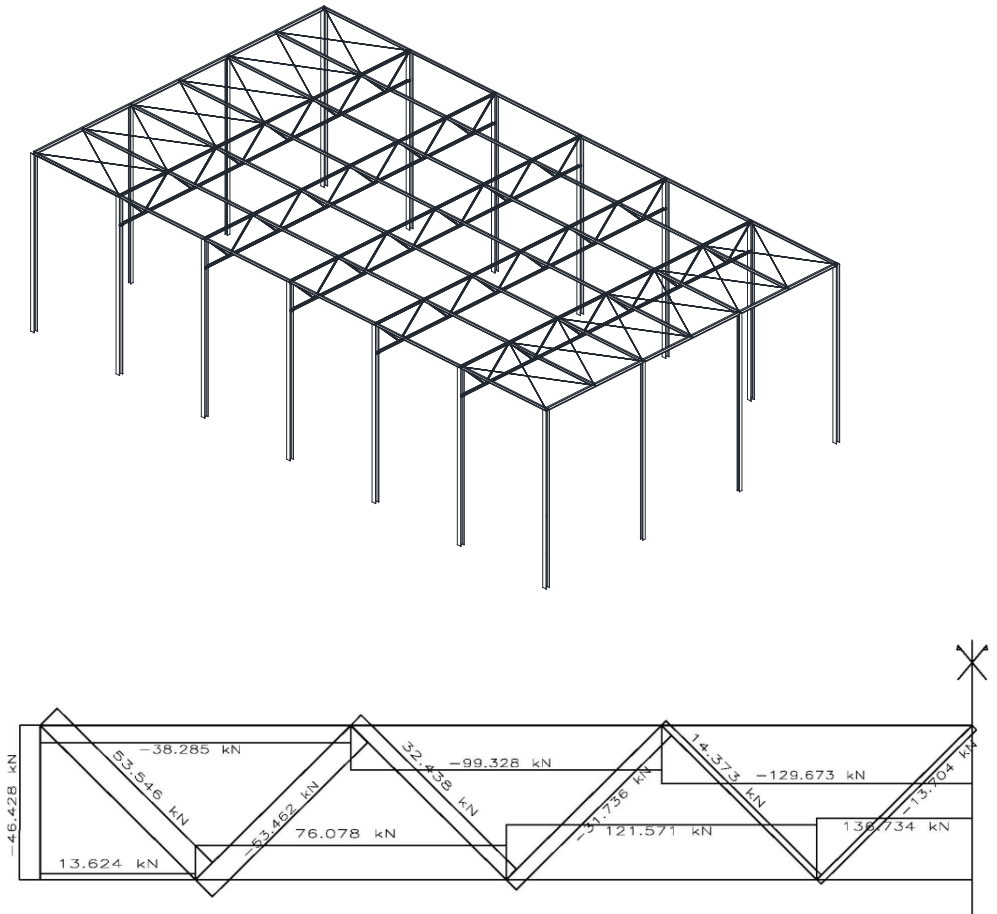


Fig. 5.9. Modelo de cálculo y leyes de axiles (CAC)

- Alternativa 4: Cubierta curva metálica autoportante apoyada en vigas metálicas de fachada (CMA).

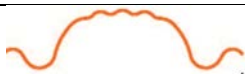
Las cubiertas metálicas autoportantes (CMA) están formadas por perfiles curvos de chapa perfilada de acero galvanizado con funciones estructurales y de cerramiento simultáneamente. Constituyen un cascarón tipo membrana que distribuye uniformemente las tensiones recibidas. El arco de acero hace al mismo tiempo de viga y de cubierta, eliminando las correas y las vigas o cerchas.

La cubierta sándwich se forma con un perfil en arco con geometría de omega, cuyas características se indican en la Tabla 5.6, y una chapa

5.- OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA JERÁRQUICA

curvada no estructural, ambos de 0,8 mm de espesor, separados por unos perfiles en forma de omega y con un aislamiento intermedio. La flecha es de 1,63 m. El espesor, la flecha y el tipo de perfil se han fijado de acuerdo con las tablas del fabricante para un edificio cerrado situado a menos de 700 m de altitud. La cubierta se fija sobre la estructura soporte a través de unos apoyos que a su vez van soldados a la viga de atado que une los pilares por la parte superior y que en este caso es un perfil HEB140 (Fig. 5.10) Los pilares están situados cada 5,0 m. Este sistema de cubierta está basado en el desarrollo de la teoría de un arco isostático con sus extremos unidos mediante un tirante. La característica principal de este tipo de cubiertas es que, como cualquier arco atirantado, sólo transmite esfuerzos verticales a la estructura de apoyo, ya que los tirantes absorben los impulsos horizontales. Además, se aprovecha del beneficio formal de la doble curvatura: ondulando la directriz de la bóveda, se obtiene una forma mucho más rígida y resistente sin aumentar el espesor de la lámina.

Tabla 5.6. Características de los perfiles estructurales (CMA).



altura 180 mm

Espesor (mm)	Peso (Kg/m ²)	i_{eff} (cm)	A_{eff} (cm ²)	I_{eff} (cm ⁴)	W_{eff} (cm ³)	M_{Rd} (kNm/m)	N_{Rd} (kN/m)
0,80	11,21	6,15	12,00	453,00	50,26	12,59	300,00

El sistema de cubierta metálica auto-portante isostática logra cubrir hasta 30 m de luz, por lo que esta solución es interesante para instalaciones deportivas, naves industriales, colegios o centros comerciales. Existen dos tipos de tirantes que se pueden utilizar en este tipo de cubiertas con dos objetivos distintos. Los tirantes horizontales se utilizan para reducir los esfuerzos horizontales que provoca la cubierta sobre las vigas donde descansa, con lo que puede reducirse la viga de apoyo. Los tirantes contraviento se utilizan para contrarrestar la acción de succión del viento y van desde la viga donde apoya la cubierta hasta el punto central de la cubierta.

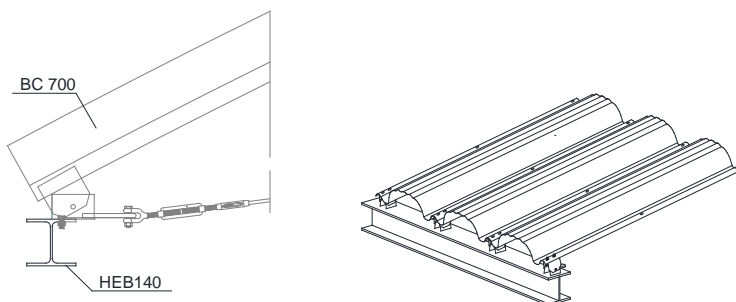


Fig. 5.10. Unión de cubierta con viga (CMA).

- Alternativa 5: Celosías y correas de madera laminada y cubierta plana (MLC).

En la alternativa MLC, la estructura portante está constituida por elementos de madera de abeto laminada encolada clase resistente GL24h, cepillada y tratada mediante impregnación de lasures protectores, con función fungicida, insecticida e hidrófuga, para cumplimiento de Clase Riesgo 1. El canto de la viga en celosía es 1,50 m y se coloca cada 5,0 m. Apoyan en los pilares. Los herrajes son metálicos electrocincados fabricados en acero tipo S235JR. Se colocan correas de madera cada 2,40 m. Las láminas de madera no son superiores a 45 mm y las juntas son tipo peine. Para el dimensionamiento se ha solicitado la ayuda del fabricante.

Capítulo 6.
EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

6.1.- Obtención de prioridades para criterios y sub-criterios

Siguiendo con la técnica Delphi, los expertos evalúan los diferentes criterios en un segundo cuestionario.

Tabla 6.1.- Cuestionario para valorar criterios y sub-criterios respecto al objetivo de implementar criterios de sostenibilidad en la selección de una cubierta.

Criterios	
QC1	Qué importancia tienen los criterios económicos (ECO) si se comparan con los criterios sociales (SOC)
QC2	Qué importancia tienen los criterios económicos (ECO) si se comparan con los criterios medioambientales (AMB)
QC3	Qué importancia tienen los criterios sociales (SOC) si se comparan con los criterios medioambientales (AMB)
Sub-criterios	
QS1	Qué importancia tiene el coste de fabricación (CFB) si se compara con el coste de transporte y montaje (CTM)
QS2	Qué importancia tiene el coste de fabricación (CFB) si se compara con el coste del mantenimiento de la cubierta (CMC)
QS3	Qué importancia tiene el coste de transporte y montaje (CTM) si se compara con el coste del mantenimiento de la cubierta (CMC)
QS4	Qué importancia tiene la resistencia al fuego (SFF) si se compara con el uso de materiales locales (UML)
QS5	Qué importancia tiene resistencia al fuego (SFF) si se compara con la estética (EST)
QS6	Qué importancia tiene el uso de materiales locales (UML) si se compara con la estética (EST)
QS7	Qué importancia tienen el impacto de las emisiones de CO ₂ (EMI) si se compara con la energía interna (EIN)
QS8	Qué importancia tiene el impacto de las emisiones de CO ₂ (EMI) si se compara con la energía de funcionamiento (EFN)
QS9	Qué importancia tiene la energía interna (EIN) si se compara con la energía de funcionamiento (EFN)

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

El proceso Delphi fomenta la interacción entre los expertos mediante una retroalimentación controlada que se produce con comentarios anónimos a través del coordinador del estudio. A través de sucesivas rondas, las encuestas de los participantes tienden a converger, terminando el proceso cuando se estabilizan los juicios. El método Delphi se utiliza para reducir la dispersión de las respuestas de los expertos. No se requiere lograr un consenso (Dalkey & Rourke, 1972).

La Tabla 6.1 muestra los cuestionarios específicos para la evaluación de los criterios y sub-criterios con respecto al objetivo general utilizando la escala de 9 puntos de la Tabla 6.2.

Tabla 6.2.- Escala de 9 puntos.

Notación	Significado		Intensidad de importancia
	C1	Extremadamente más importante que	C2 9
	C1	De mayor importancia demostrada que	C2 7
	C1	De mayor importancia que	C2 5
	C1	Moderadamente más importante que	C2 3
	C1	Igual de importante que	C2 1
	C1	Moderadamente menos importante que	C2 1/3
	C1	De menor importancia que	C2 1/5
	C1	De menor importancia demostrada que	C2 1/7
	C1	Extremadamente menos importante que	C2 1/9

Con la comparación por pares que realiza cada experto para indicar su preferencia por cada criterio, comparación que se ha reflejado en las Tablas 6.3.1 y 6.3.2, se crean las matrices de comparación por pares para los criterios (A_{i0}) y sub-criterios (A_{i1} to A_{i3}) para cada experto i , tal como se ha explicado en el capítulo anterior.

Para facilitar la comprensión de los gráficos y tablas, a cada criterio se le ha asignado una gama de colores. Los sub-criterios económicos se

han representado con distintas gamas de rojos, los sociales de azul y los medioambientales de verde. Para representar los resultados, cada celda se ha dividido en cuatro partes. Si la intensidad de un criterio cuando se compara con otro se valora con un 3, se colorea un cuarto de celda, con 5 se colorea la mitad, con 7 tres cuartos y con 9 se colorea totalmente, siempre con el color del criterio que domina, tal como se indica en la Tabla 6.2. Si se considera que los dos criterios tienen la misma importancia, la celda se deja en blanco. Por ejemplo, en la Tabla 6.3.1, el experto 1 considera que los criterios económicos son de mayor importancia que los sociales y moderadamente más importantes que los medioambientales, mientras que los criterios sociales son moderadamente menos importantes que los medioambientales. El color de la celda indica el criterio que se considera más importante y la proporción de celda coloreada la intensidad de esa importancia. Con esta forma de representar los resultados, se pretende que, a simple vista, pueda apreciarse qué criterios consideran más importantes los expertos y la dispersión entre expertos.

Una vez creadas las matrices, se calcula el vector propio de cada matriz A_{ij} , que es el vector ω_{ij} de prioridades. El vector ω_{i0} de A_{i0} determina el peso de cada criterio respecto del objetivo para el experto i , mientras A_{ij} ($j=1$ to 3) determina el peso de cada sub-criterio respecto de su criterio j para el experto i . Para encontrar estos vectores propios, se resuelve cada sistema lineal

$$A\omega = \lambda\omega.$$

$$\det [A - \lambda \cdot I] = 0$$

Tabla 6.3.1.- Evaluación de resultados de la comparación de criterios.

Experto	Resultados de cada experto									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Económicos vs. Sociales	3/4 Red	5/4 Red	3/4 Red	2/4 Red	5/4 Red	3/4 Red	5/4 Red	2/4 Red	3/4 Red	2/4 Red
Económicos vs. Medioambientales	3/4 Red			3/4 Red	5/4 Red	3/4 Red	5/4 Red	3/4 Red		1/4 Green
Sociales vs. Medioambientales	1/4 Green	2/4 Green	1/4 Green	1/4 Blue	1/4 Green	1/4 Blue	1/4 Green	1/4 Blue	1/4 Green	2/4 Green

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

Para cada matriz A_{ij} se determina la relación de consistencia CR dividiendo el valor del índice de consistencia CI por la consistencia media, RCI, obtenida por Saaty dependiendo del orden n de la matriz (Tabla 4.3). En este caso, tanto para las matrices de criterios como las de sub-criterios, $n = 3$, por lo que $RCI = 0,52$.

Tabla 6.3.2.- Evaluación de resultados de la comparación de subcriterios.

Experto	Resultados de cada experto									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fabricación vs Transporte y montaje	1	2		4	5		7			10
Fabricación vs. Mantenimiento cubierta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Transporte y montaje vs Mantenimiento cubierta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resistencia al fuego vs Materiales locales	1	2	3		5	6	7	8		10
Resistencia al fuego vs Estética	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Materiales locales vs Estética	1	2	3	4	5		7	8	9	10
Impacto vs Consumo energía	1	2		4	5					10
Impacto vs Energía funcionamiento	1	2	3	4	5	6	7	8		10
Consumo energía vs Energía funcionamiento	1	2	3		5	6	7	8		10

El índice de consistencia CI se calcula a partir del autovalor ($\lambda_{\text{máx}}$) como sigue

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

La matriz de comparación es aceptable si CR es menor de 0,05 ($n = 3$). Cuando es mayor, el juicio es inconsistente, por lo que se vuelve a enviar la encuesta al experto correspondiente hasta que la consistencia

es aceptable. Los valores de λ_{\max} , CI, y CR obtenidos para las matrices de comparación por pares correspondientes a los criterios principales y a los sub-criterios, para cada experto, se recogen en las Tablas 6.4, 6.5 y 6.6 respectivamente.

Tabla 6.4.- Autovalor λ_{\max} para criterios y sub-criterios.

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A₀	3,0385	3,0126	3,0000	3,0385	3,0385	3,0385	3,0385	3,0385	3,0000	3,0385
A₁	3,0385	3,0385	3,0000	3,0385	3,0385	3,0000	3,0385	3,0000	3,0000	3,0385
A₂	3,0291	3,0070	3,0385	3,0000	3,0291	3,0000	3,0385	3,0385	3,0291	3,0291
A₃	3,0070	3,0291	3,0000	3,0000	3,0385	3,0291	3,0000	3,0000	3,0000	3,0385

Tabla 6.5.- Índice de consistencia CI para criterios y sub-criterios.

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A₀	0,0193	0,0063	0,0000	0,0193	0,0193	0,0193	0,0193	0,0193	0,0000	0,0193
A₁	0,0193	0,0193	0,0000	0,0193	0,0193	0,0000	0,0193	0,0000	0,0000	0,0193
A₂	0,0145	0,0035	0,0193	0,0000	0,0145	0,0000	0,0193	0,0193	0,0145	0,0145
A₃	0,0035	0,0145	0,0000	0,0000	0,0193	0,0145	0,0000	0,0000	0,0000	0,0193

Tabla 6.6.- Relación de consistencia CR para criterios y sub-criterios.

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A₀	0,0370	0,0121	0,0000	0,0370	0,0370	0,0370	0,0370	0,0370	0,0000	0,0370
A₁	0,0370	0,0370	0,0000	0,0370	0,0370	0,0000	0,0370	0,0000	0,0000	0,0370
A₂	0,0279	0,0068	0,0370	0,0000	0,0279	0,0000	0,0370	0,0370	0,0279	0,0279
A₃	0,0068	0,0279	0,0000	0,0000	0,0370	0,0279	0,0000	0,0000	0,0000	0,0370

En la Tabla 6.7 se muestran los vectores de prioridad ω_{i0} que se han obtenido de la comparación de los criterios respecto del objetivo principal para cada experto i . Estos resultados se representan en la Fig. 6.1.

Los resultados de los vectores de prioridad ω_i de cada sub-criterio respecto de su criterio principal, para cada experto i , se muestran en la Tabla 6.8. A partir de los vectores de prioridad de cada criterio respecto del objetivo y de cada sub-criterio respecto de su criterio principal se obtiene el vector ω_i , que proporciona la prioridad de cada sub-criterio respecto del objetivo para el experto i . Estos vectores de prioridad obtenidos para cada experto se muestran en la Tabla 6.9 y se representan en la Fig. 6.2.

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

Tabla 6.7.- Vectores de prioridad: criterios respecto del objetivo principal.

	ECO	SOC	AMB
ω_{10}	0,6370	0,1047	0,2583
ω_{20}	0,4869	0,0778	0,4353
ω_{30}	0,4286	0,1429	0,4286
ω_{40}	0,6370	0,2583	0,1047
ω_{50}	0,6370	0,1047	0,2583
ω_{60}	0,6370	0,2583	0,1047
ω_{70}	0,6370	0,1047	0,2583
ω_{80}	0,6370	0,2583	0,1047
ω_{90}	0,4286	0,1429	0,4286
ω_{100}	0,2583	0,1047	0,6370

Tabla 6.8.- Vectores de prioridad: sub-criterios respecto de criterios principales.

	CFB	CMT	CMC	SFF	UML	EST	EMI	EIN	EFN
ω_1	0,6370	0,2583	0,1047	0,0629	0,2654	0,6716	0,0879	0,2426	0,6694
ω_2	0,6370	0,2583	0,1047	0,0879	0,2426	0,6694	0,0629	0,2654	0,6716
ω_3	0,2000	0,2000	0,6000	0,1047	0,2583	0,6370	0,1429	0,1429	0,7143
ω_4	0,1047	0,6370	0,2583	0,2000	0,2000	0,6000	0,0909	0,4545	0,4545
ω_5	0,6370	0,1047	0,2583	0,0704	0,1782	0,7514	0,6370	0,1047	0,2583
ω_6	0,4545	0,4545	0,0909	0,1429	0,4286	0,4286	0,1562	0,1852	0,6586
ω_7	0,2583	0,1047	0,6370	0,2583	0,1047	0,6370	0,1429	0,1429	0,7143
ω_8	0,4545	0,4545	0,0909	0,1047	0,2583	0,6370	0,2000	0,2000	0,6000
ω_9	0,1429	0,1429	0,7143	0,1562	0,1852	0,6586	0,3333	0,3333	0,3333
ω_{10}	0,1047	0,2583	0,6370	0,4054	0,1140	0,4806	0,6370	0,1047	0,2583

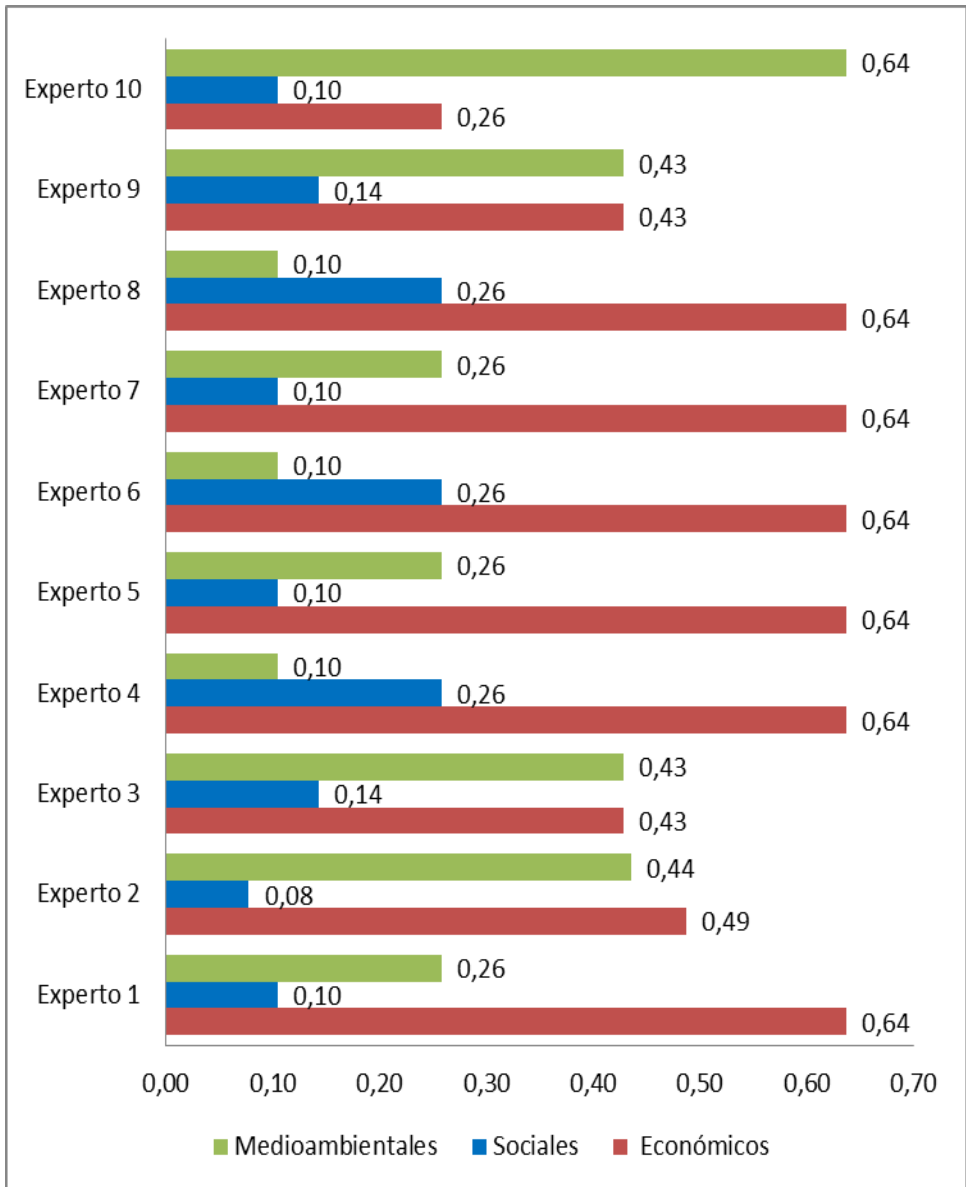


Fig. 6.1. Vectores de prioridad ω_i de los criterios para cada experto.

Una vez obtenida la información de cada experto, sus opiniones pueden agregarse de diferentes formas, dos de los mejores métodos son el AIJ (Aggregation of individual judgments) y el AIP (Aggregating Individual

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

Priorities). Cuando el grupo debe sus preferencias al bien de una organización y por lo tanto debe actuar como una unidad, debe aplicarse el AIJ (Forman & Peniwati, 1998). En la medida en que los individuos actúan individualmente, en esta tesis se ha utilizado el método AIP para la síntesis de las prioridades, es decir, no se hace el promedio de las opiniones sino de los vectores de prioridad que resultan de esas opiniones. El Principio de Pareto en esencia dice que dadas dos alternativas A y B, si cada miembro de un grupo de individuos prefiere A a B, entonces el grupo debe preferir A a B. La suma de las prioridades individuales satisface siempre este principio, ya sea con una media aritmética o geométrica, por lo tanto si se agregan los resultados utilizando el método AIP puede aplicarse con media aritmética o geométrica. En esta tesis se ha utilizado la media aritmética para agregar los resultados y obtener el vector de prioridad ω de los sub-criterios respecto del objetivo global (ver Fig. 6.3. y Tabla 6.9).

Tabla 6.9.- Vectores de prioridad: sub-criterios respecto del objetivo.

	CFB	CMT	CMC	SFF	UML	EST	EMI	EIN	EFN
ω_1	0,4058	0,1645	0,0667	0,0066	0,0278	0,0703	0,0227	0,0627	0,1729
ω_2	0,3102	0,1258	0,0510	0,0068	0,0189	0,0521	0,0274	0,1155	0,2923
ω_3	0,0857	0,0857	0,2571	0,0150	0,0369	0,0910	0,0612	0,0612	0,3061
ω_4	0,0667	0,4058	0,1645	0,0517	0,0517	0,1550	0,0095	0,0476	0,0476
ω_5	0,4058	0,0667	0,1645	0,0074	0,0187	0,0787	0,1645	0,0271	0,0667
ω_6	0,2895	0,2895	0,0579	0,0369	0,1107	0,1107	0,0164	0,0194	0,0690
ω_7	0,1645	0,0667	0,4058	0,0271	0,0110	0,0667	0,0369	0,0369	0,1845
ω_8	0,2895	0,2895	0,0579	0,0271	0,0667	0,1645	0,0209	0,0209	0,0628
ω_9	0,0612	0,0612	0,3061	0,0223	0,0265	0,0941	0,1429	0,1429	0,1429
ω_{10}	0,0271	0,0667	0,1645	0,0425	0,0119	0,0503	0,4058	0,0667	0,1645
ω	0,1969	0,1559	0,1896	0,0248	0,0348	0,0961	0,0723	0,0674	0,1621

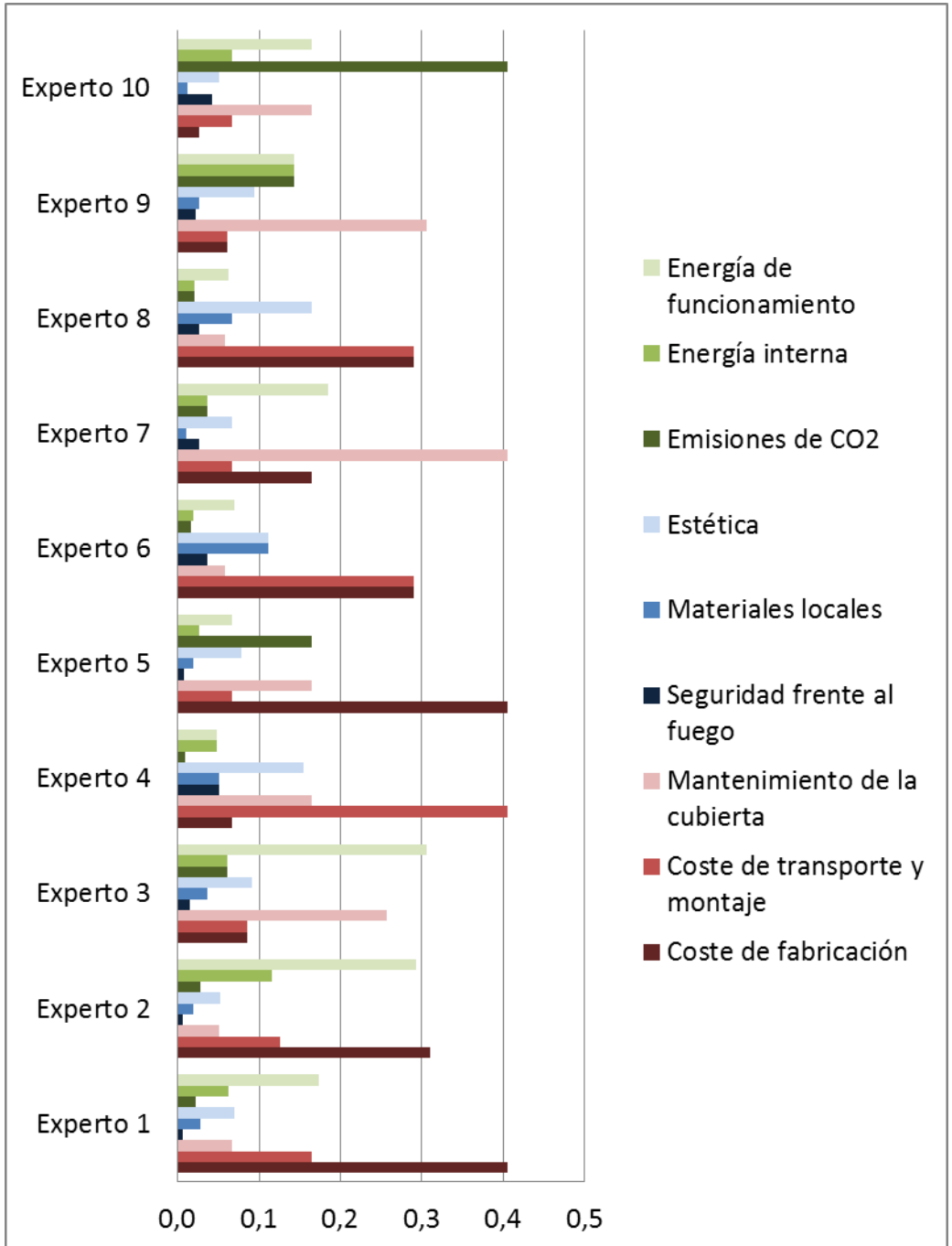


Fig. 6.2. Vectores de prioridad ω_i de los sub-criterios para cada experto.

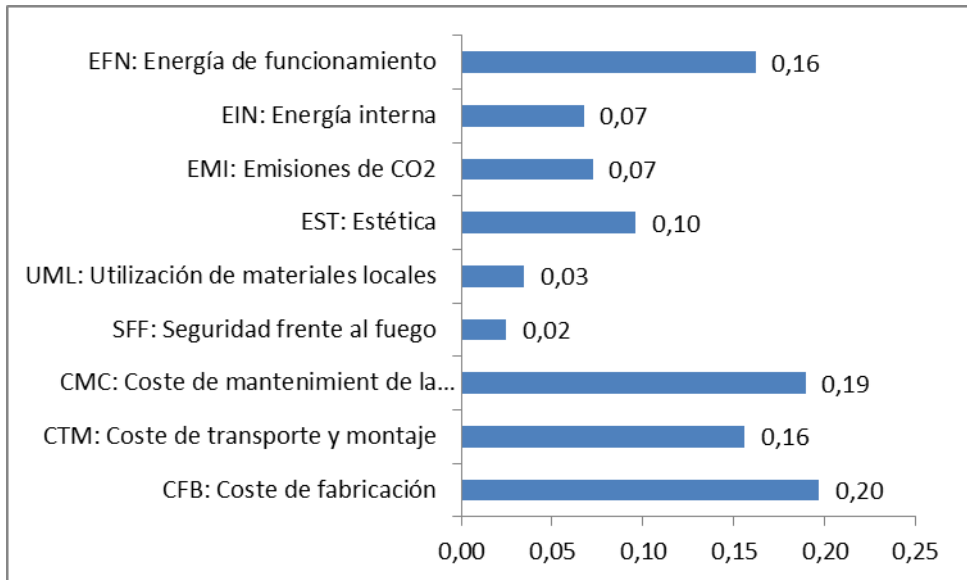


Fig. 6.3. Vector de prioridad agregado ω de los sub-criterios respecto del objetivo.

6.2.- Obtención de prioridades para las alternativas

El siguiente paso consiste en estimar la prioridad de las alternativas con respecto a cada sub-criterio. Cuando se trata de evaluar las alternativas, se realizan dos tipos de comparaciones, uno absoluto para sub-criterios tangibles y otro relativo para sub-criterios no tangibles.

6.2.1.- Sub-criterios tangibles

Los sub-criterios tangibles (CFB, CTM, EMI, EIN y EFN) sólo requieren una medición directa (Tatham et al., 2014). A continuación se explica el método seguido para obtener los valores para las prioridades.

Los costes de fabricación (CFB) y de transporte y montaje (CTM) se han estimado por m^2 de cubierta, a través de ofertas de casas comerciales (Tabla 6.10). A todas las empresas se les ha pedido oferta para un edificio de 30×17 m en planta y una altura libre mínima de 7,00 m. con pilares cada 5 m. Para luces de 17 m, en la solución de cubierta metálica autoportante (CMA) debe recurrirse a transportes especiales para desplazar las chapas hasta la obra o incluso transportar la

perfiladora a pie de obra. Para elevar las chapas en la fase de montaje es posible elevar paquetes de chapa y colocarlas manualmente. Sin embargo, en la solución CMA, los perfiles se suben uno a uno utilizando una barra estabilizadora para evitar abolladuras en la maniobra de elevación e incluso puede ser necesario apuntalar la cubierta.

El análisis del ciclo de vida (ACV) es un importante método del que dispone la industria de la construcción para evaluar las emisiones (EMI) y la energía interna (EIN) de un edificio desde el origen (extracción de materias primas), hasta el final de su vida (demolición). Existen numerosos estudios dedicados a edificios residenciales en USA y algunos países de Europa, pero hay pocos estudios para España. Como se ha indicado en el capítulo 3, uno de los factores que influyen en la calidad del cálculo es la localización geográfica del área de estudio. En esta tesis se han utilizado los datos obtenidos de la evaluación del impacto, en términos de energía y medio ambiente, de los materiales de construcción usuales en comparación con diferentes materiales ecológicos, realizada en España por Zabalza et al. (2011). En esa evaluación, que realiza un estudio ACV adoptando la metodología standard de las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, se consideran la demanda de energía primaria y el potencial de calentamiento global (Global Warming Potential GWP). La demanda de energía primaria (en MJ-Eq) es la suma de la energía directa consumida en la extracción de los materiales, el proceso de producción y manufactura y el transporte en las diferentes fases hasta su colocación a pie de obra. Se estudia con el método CED (Cumulative Energy Demand). Materiales como el acero y el cemento tienen un alto valor de energía primaria. El GWP se estudia de acuerdo con la IPCC2007. El efecto invernadero causado por las emisiones puede expresarse en términos de su GWP en CO₂-equivalente (Guinée et al., 2002). El concepto de CO₂-equivalente permite traducir la contribución de los diversos gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ y halocarbonos) a una unidad común, ya que unas sustancias inducen un mayor efecto que otras por unidad y que cada sustancia tiene una vida media diferente, cambiando su potencial de calentamiento en el tiempo. Combinando ambos factores, el Tercer Informe de Evaluación del Cambio Climático del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, TAR 2001) establece los valores de potencial

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

de calentamiento global para cada sustancia en un periodo de 100 años, por lo que de esta forma, la contribución al efecto invernadero para cada sustancia se traduce a su equivalente en CO₂ en un periodo de 100 años, siendo este valor para el caso del CO₂ de 1 (Mercader et al., 2012). La Tabla 6.11 muestra los valores de demanda de energía y potencial de calentamiento global que se han aplicado para cada material estructural.

La unidad funcional elegida para comparar el consumo energético y las emisiones es el m² de cubierta. Se ha estimado el peso de material necesario para construir la estructura y la cubierta de ese m², en cada alternativa. En algunas alternativas este dato ha sido proporcionado en la oferta y en otras ha sido necesario calcular la estructura, tal como se ha indicado en el capítulo 5. Con los valores de la Tabla 6.11 y el peso calculado, se obtienen los valores de las emisiones (EMI) y energía interna (EIN) por metro cuadrado de cubierta para cada alternativa. Estos valores se incorporan a la Tabla 6.10.

Tabla 6.10.- Valoración de alternativas según criterios tangibles.

	CFB	CTM	EMI	EIN	EFN
	(€ / m²)	(€ / m²)	(kg CO₂- Eq/ m²)	(MJ-Eq/ m²)	(m³)
HPC	65,46	40,01	49,79	644,09	4630
HPM	64,47	40,66	38,69	508,90	4862
CAC	57,00	27,74	38,55	614,85	4898
CMA	72,24	27,09	36,43	580,99	4618
MLC	110,46	36,82	30,93	722,53	4943

Tabla 6.11.- Resultados de ACV para los materiales de la estructura (Zabalza et al., 2011).

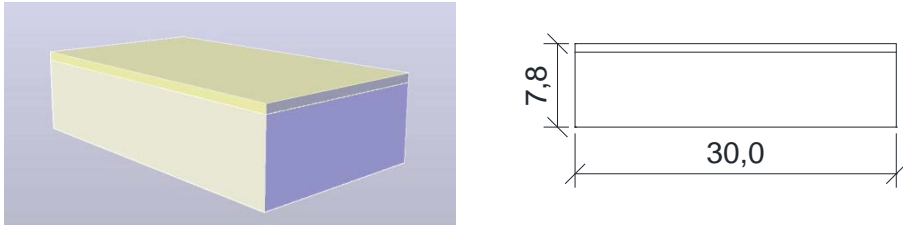
Material	Densidad (kg/m ³)	Demanda de energía primaria (MJ-Eq/kg)	Potencial de calentamiento global (kg CO ₂ -Eq/kg)
Hormigón armado	2546	1,802	0,179
Acero	7900	24,336	1,526
Madera laminada	600	27,309	0,541

Como ya se ha dicho en el capítulo cinco, la eficiencia energética de un edificio no sólo depende de las propiedades térmicas de los materiales utilizados, sino también de su forma. En esta tesis, centrada en distintas tipologías estructurales, las alternativas comparadas tienen el mismo material de cobertura, por lo que para valorar la energía de funcionamiento se tiene en cuenta la forma de la envolvente resultante con cada solución. En términos de la demanda de energía o de otros recursos, las principales características de un edificio son el volumen y la compacidad. Las alternativas con mayor volumen serán más costosas de calentar y refrigerar y las que tengan una envoltura externa de menor área, conteniendo la misma zona climatizada, experimentarán pérdidas de energía menores.

El efecto de la compacidad se determina comparando las soluciones con la más compacta (referencia). Existen múltiples formas para determinar la compacidad, siendo las más extendidas las que utilizan los valores A/V ó A/S , implicando que en ambos casos es la relación entre el área de la envolvente exterior del edificio y el volumen interior que alberga, o coeficiente de forma. Ourghi et al. (2007) proporcionan un método simplificado de análisis para predecir el impacto de la forma del edificio en la energía utilizada para su climatización, utilizando la compacidad relativa CR , que indica la relación entre el factor de forma del edificio que se estudia $(A/V)_{\text{edificio}}$ y el factor de forma mínimo, que corresponde

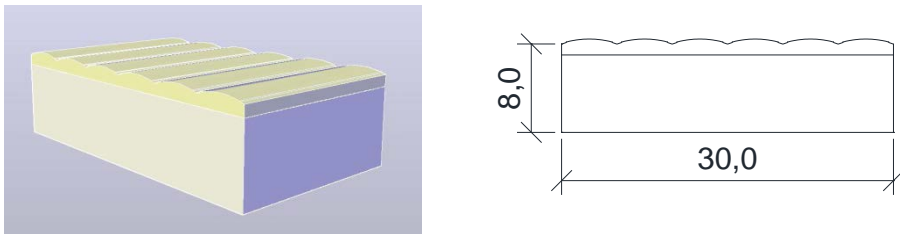
6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

al edificio cúbico del mismo volumen $(A/V)_{ref}$. Así pues, para comparar las distintas alternativas, afectaremos el volumen de cada solución con su compacidad relativa, con lo que se conseguirán unos valores proporcionales a la energía de funcionamiento (EFN). Estos valores se incluyen la Tabla 6.10. En las Figs. 6.4 a 6.8 se refleja la dimensión de cada alternativa, su volumen y su compacidad relativa.



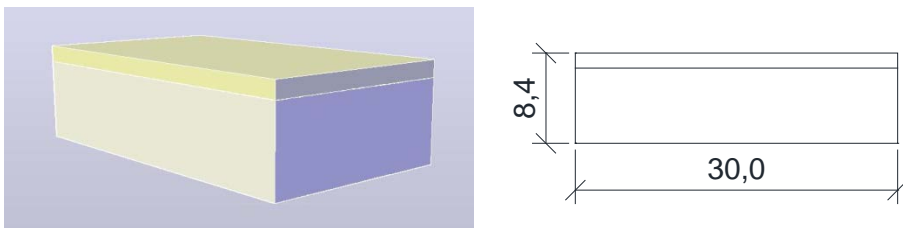
$(V = 3978 \text{ m}^3; CR = 1,164)$

Fig. 6.4. Envoltente de la alternativa HPC.



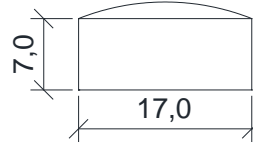
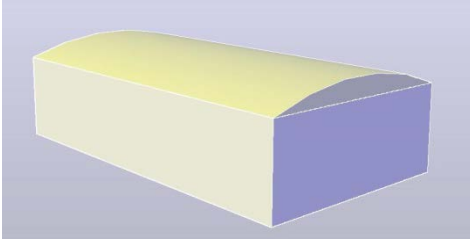
$(V = 4231 \text{ m}^3; CR = 1,149)$

Fig. 6.5. Envoltente de la alternativa HPM.



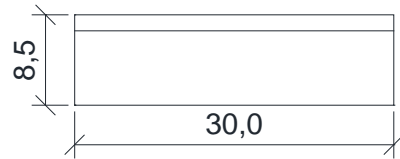
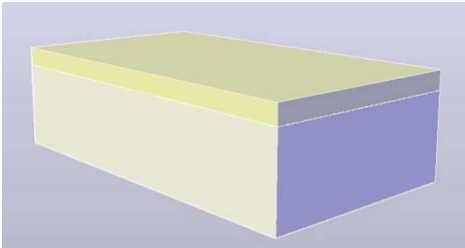
$(V = 4284 \text{ m}^3; CR = 1,143)$

Fig. 6.6. Envoltente de la alternativa CAC.



(V = 4128 m³; CR = 1,119)

Fig. 6.7. Envoltente de la alternativa CMA.



(V = 4335 m³; CR = 1,140)

Fig. 6.8. Envoltente de la alternativa MLC.

Al final de este proceso, en la Tabla 6.10 se ha obtenido una valoración de las distintas alternativas según los sub-criterios tangibles. Pero las unidades en las que se mide el rendimiento son diferentes para los diferentes sub-criterios, por lo que cualquier análisis proporcionaría resultados incorrectos. Por lo tanto, para establecer un ranking es necesario convertir los valores de la Tabla 6.10 en una secuencia comparable y normalizada (Kuo et al., 2008). En un problema multicriterio, si existen m alternativas y n criterios, el criterio j puede expresarse como $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{mj})$, donde y_{ij} es el valor representativo para el criterio j de la alternativa i . El término Y_j puede convertirse en la secuencia comparable $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{mj})$ de la siguiente forma:

$$x_{ij} = \frac{\text{Max}(y_{ij}, i=1,2,\dots,m) - y_{ij}}{\text{Max}(y_{ij}, i=1,2,\dots,m) - \text{Min}(y_{ij}, i=1,2,\dots,m)} \quad (6.1)$$

Para $i = 1, 2, \dots, m$ y $j = 1, 2, \dots, n$

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

Se usan estas fórmulas debido a que para cada criterio es más favorable un valor menor. A continuación, todos los valores de las prioridades serán normalizados quedando su valor comprendido entre 0 y 1 (Tabla 6.12).

6.2.2.- Sub-criterios no tangibles

Para evaluar las alternativas de acuerdo con los sub-criterios CMC, SFF, UML y EST, la herramienta desarrollada en este trabajo utiliza los datos obtenidos de un tercer cuestionario que se ha enviado al panel de expertos, utilizando la técnica Delphi.

Tabla 6.12. Vectores de prioridad de alternativas. Sub-criterios tangibles

	CFB	CTM	EMI	EIN	EFN
HPC	0,2463	0,0211	0,0000	0,1449	0,4099
HPM	0,2518	0,0000	0,2035	0,3947	0,1065
CAC	0,2927	0,4170	0,2059	0,1989	0,0587
CMA	0,2092	0,4378	0,2449	0,2615	0,4248
MLC	0,0000	0,1240	0,3457	0,0000	0,0000

Los expertos realizan una comparación por pares para evaluar las alternativas de acuerdo con cada sub-criterio no tangible. Para facilitar la comprensión de los gráficos y tablas, a cada alternativa se le ha asignado un color que se representa en la Tabla 6.13. Los tipos estructurales del mismo material se representan con colores de la misma gama, así, se ha elegido el color gris para las estructuras de hormigón y el azul para las de acero. Cada celda se ha dividido en cuatro de forma similar a lo explicado en la evaluación de criterios. El color de la celda indica la alternativa que se considera más importante y la proporción de celda coloreada la intensidad de esa importancia. Si la intensidad de una alternativa cuando se compara con otro se valora con un 3, se colorea un cuarto de celda, con 5 se colorea la mitad, con 7 tres cuartos y con 9 se colorea totalmente, siempre con el color de la

alternativa que domina Si se considera que las dos alternativas tienen la misma importancia, la celda se deja en blanco. La Tabla 6.14 muestra los resultados de las encuestas de valoración de alternativas según sub-criterios no tangibles.

Tabla 6.13.- Alternativas.

Hormigón prefabricado y correas	HPC
Hormigón prefabricado y cubierta ligera tipo membrana	HPM
Viga en celosía de acero y correas	CAC
Cubierta curva metálica autoportante y vigas metálicas	CMA
Madera laminada y correas	MLC

Con estos valores proporcionados por los expertos se obtiene, utilizando el método AHP, para cada experto i y cada sub-criterio no tangible j , una matriz de comparación por pares de las alternativas A_{ij} . Como en los pasos anteriores, el vector propio ω_{ij} de cada matriz es el vector de prioridad, que representa las prioridades de las alternativas para el experto i cuando se considera el sub-criterio j

Para encontrar estos vectores propios, se resuelve cada sistema lineal $A\omega = \lambda\omega$.

$$\det [A - \lambda \cdot I] = 0$$

Para cada matriz A_{ij} se determina la relación de consistencia CR dividiendo el valor del índice de consistencia CI por la consistencia media, RCI, obtenida por Saaty dependiendo del orden de la matriz n (Tabla 4.3). En este caso $n = 5$, por lo que $RCI = 1,11$.

El índice de consistencia CI se calcula a partir del autovalor (λ_{\max}) como sigue

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6.2)$$

La matriz de comparación es aceptable si CR es menor de 0,10 (para $n = 5$). Cuando es mayor, el juicio es inconsistente, por lo que se vuelve a enviar la encuesta al experto correspondiente hasta que la consistencia

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

es aceptable. Los valores de $\lambda_{\text{máx}}$, CI, y CR obtenidos para las matrices de comparación por pares correspondientes a las alternativas se recogen en las Tablas 6.15, 6.16 y 6.17 respectivamente. En la Tabla 6.18 se incluyen los resultados de los vectores propios ω_{ij} para cada experto i y cada sub-criterio no tangible j , que se representan en las figs. 6.9 a 6.12.

Tabla 6.14.- Evaluación de alternativas. Subcriterios no tangibles

CMC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPC vs HPM				■	■	■	■	■	■	■
HPC vs CAC	■	■	■	■	■		■	■		■
HPC vs CMA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
HPC vs MLC	■				■	■	■		■	
HPM vs CAC	■	■	■	■		■	■	■	■	■
HPM vs CMA	■	■	■	■		■		■		■
HPM vs MLC	■				■	■		■	■	
CAC vs CMA	■	■	■	■		■	■	■	■	■
CAC vs MLC	■	■				■	■	■	■	■
CMA vs MLC	■	■	■	■		■	■	■	■	■

Tabla 6.14.- (Continuación)

SFF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPC vs HPM										
HPC vs CAC										
HPC vs CMA										
HPC vs MLC										
HPM										
CAC										
HPM										
CMA										
HPM										
MLC										
CAC										
CMA										
CAC										
MLC										
CMA										
MLC										
UML	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPC vs HPM										
HPC vs CAC										
HPC vs CMA										
HPC vs MLC										
HPM										
CAC										
HPM										
CMA										
HPM										
MLC										
CAC										
CMA										
CAC										
MLC										
CMA										
MLC										

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

Tabla 6.14.- (Continuación)

EST	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPC vs HPM	■	■	■	■		■	■	■	■	■
HPC vs CAC	■	■	■	■	■	■		■	■	
HPC vs CMA	■	■	■	■	■	■	■	■		■
HPC vs MLC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
HPM vs CAC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
HPM vs CMA	■	■	■	■	■		■	■	■	■
HPM vs MLC	■	■	■		■	■	■	■	■	
CAC vs CMA	■	■	■	■		■	■	■	■	■
CAC vs MLC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CMA vs MLC	■	■	■	■	■		■	■	■	■

Tabla 6.15.- Autovalor $\lambda_{\text{máx}}$ para alternativas. Sub-criterios no tangibles.

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CMC	5,1308	5,1906	5,0556	5,3457	5,1349	5,4235	5,2992	5,4197	5,0556	5,2159
SFF	5,0556	5,0940	5,2856	5,3357	5,3303	5,1491	5,3021	5,2176	5,3788	5,3862
UML	5,1164	5,2375	5,4132	5,2906	5,3425	5,0556	5,1380	5,1174	5,2934	5,2087
EST	5,2375	5,2375	5,3750	5,2806	5,2670	5,2991	5,4041	5,3783	5,5102	5,0983

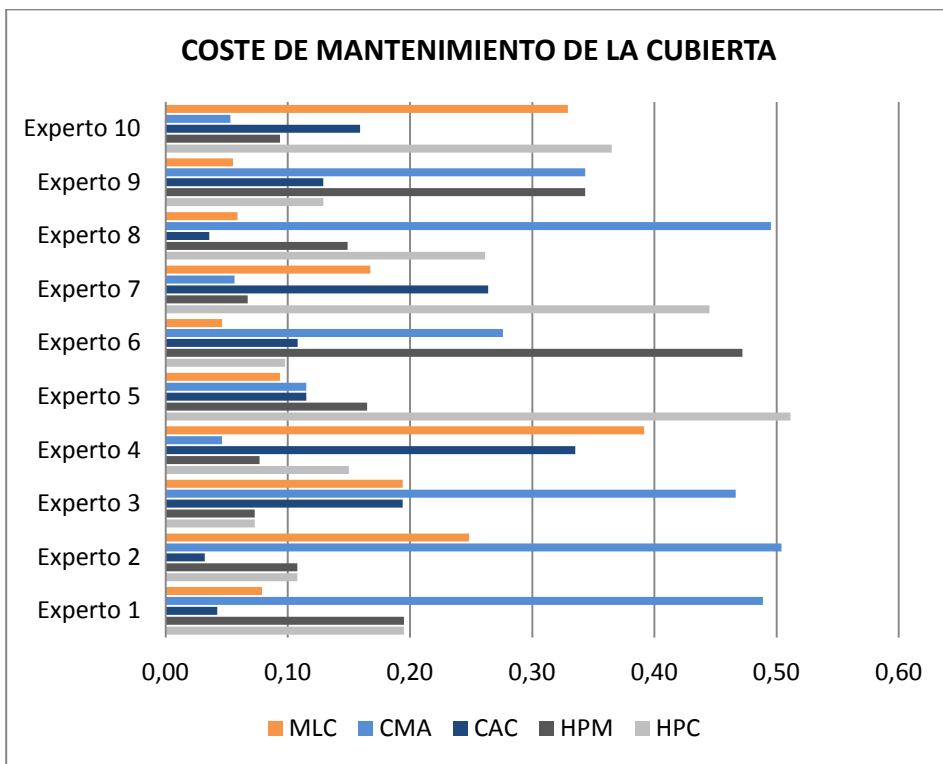


Fig. 6.9. Vectores de prioridad por expertos. Coste de mantenimiento de la cubierta.

Tabla 6.16.- Índice de consistencia CI para alternativas. Sub-criterios no tangibles

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CMC	0,0327	0,0476	0,0139	0,0864	0,0337	0,1059	0,0748	0,1049	0,0139	0,0540
SFF	0,0139	0,0235	0,0714	0,0839	0,0826	0,0373	0,0755	0,0544	0,0947	0,0965
UML	0,0291	0,0594	0,1033	0,0726	0,0856	0,0139	0,0345	0,0294	0,0733	0,0522
EST	0,0594	0,0594	0,0938	0,0701	0,0667	0,0748	0,1010	0,0946	0,1276	0,0246

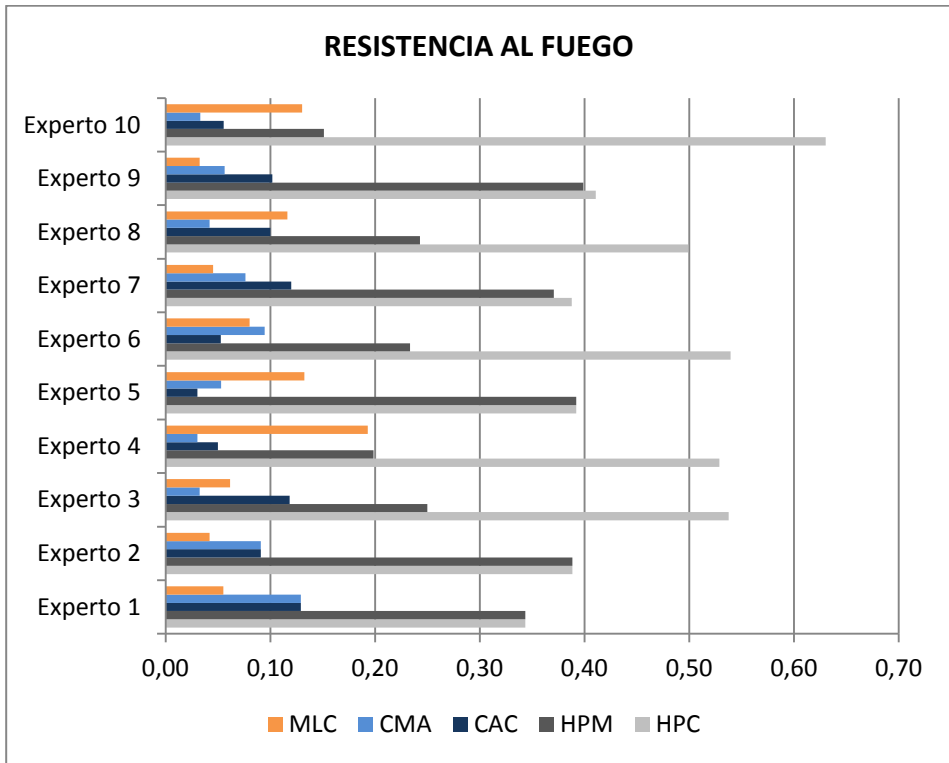


Fig. 6.10. Vectores de prioridad por expertos. Resistencia al fuego.

Tabla 6.17.- Relación de consistencia CR para alternativas. Sub-criterios no tangibles.

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CMC	0,0295	0,0429	0,0125	0,0779	0,0304	0,0954	0,0674	0,0945	0,0125	0,0486
SFF	0,0125	0,0212	0,0643	0,0756	0,0744	0,0336	0,0680	0,0490	0,0853	0,0870
UML	0,0262	0,0535	0,0931	0,0654	0,0771	0,0125	0,0311	0,0265	0,0661	0,0470
EST	0,0535	0,0535	0,0845	0,0632	0,0601	0,0674	0,0910	0,0852	0,1149	0,0221

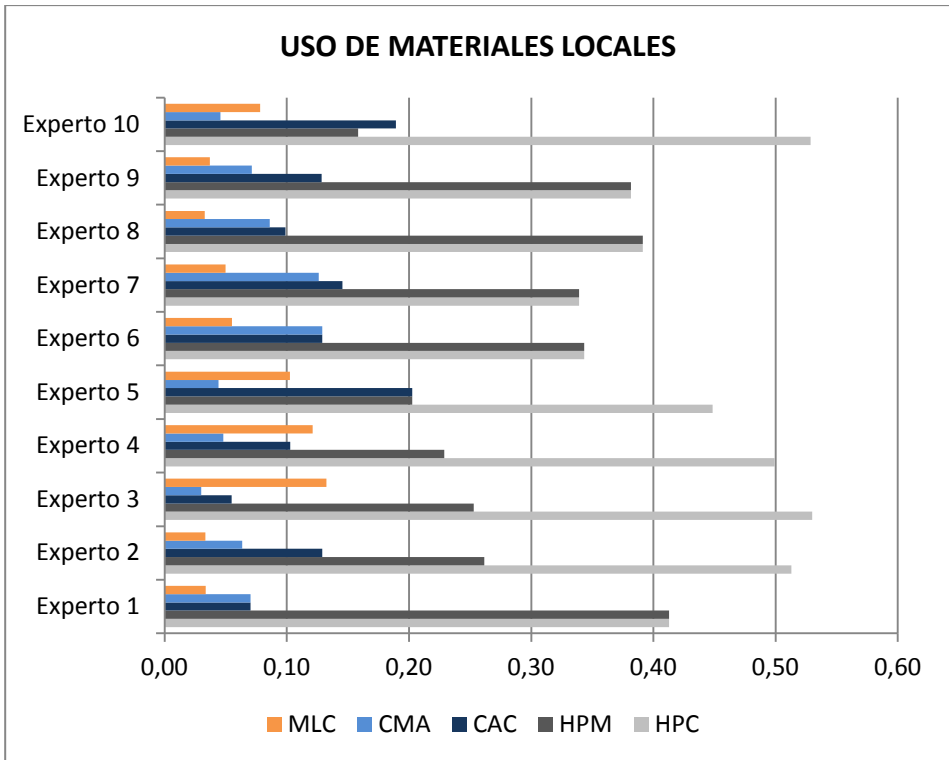


Fig. 6.11. Vectores de prioridad por expertos. Uso de materiales locales.

La información obtenida para cada experto se agrega y se obtiene un vector de prioridad ω_j para cada sub-criterios no tangible. En la medida en que los expertos actúan individualmente (Forman & Peniwati, 1998), se ha utilizado el método AIP para la síntesis de cada una de las jerarquías individuales y de las prioridades resultantes. El último paso es la obtención de la matriz de prioridades. Se forma una matriz de vectores de prioridad de las alternativas para cada sub-criterio, uniendo los resultados obtenidos para los sub-criterios tangibles y los no tangibles, como se muestra en la Tabla 6.19 y se representa en la Fig. 6.13.

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

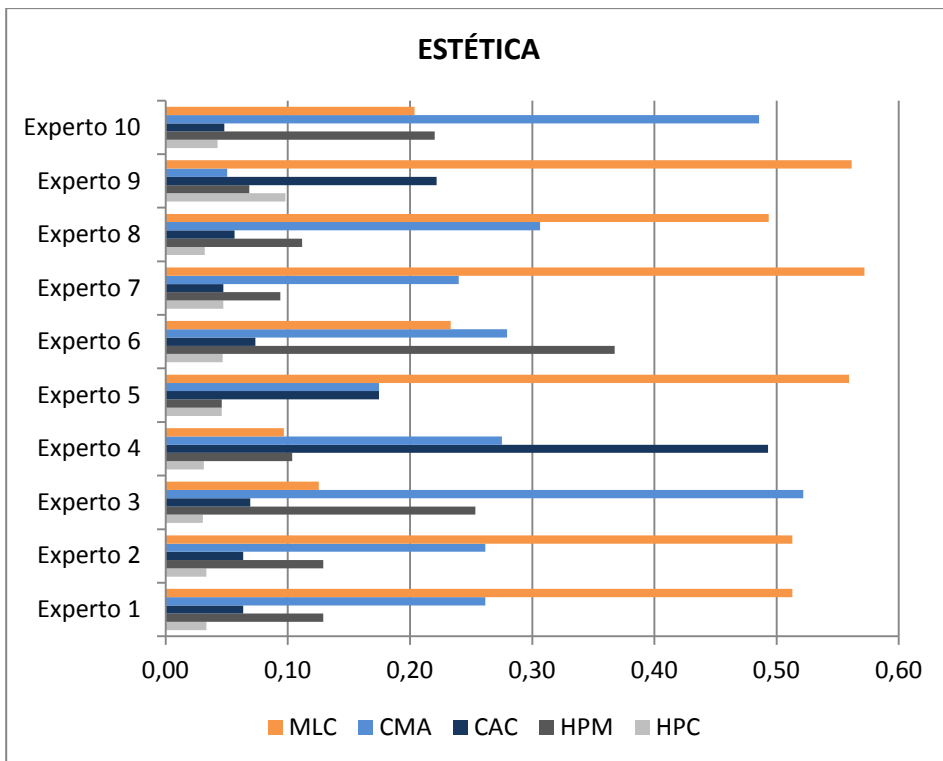


Fig. 6.12. Vectores de prioridades por expertos. Estética.

Tabla 6.18.- Vectores de prioridad de alternativas para sub-criterios no tangibles.

CMC	HPC	HPM	CAC	CMA	MLC
ω_{11}	0,1951	0,1951	0,0422	0,4887	0,0790
ω_{21}	0,1079	0,1079	0,0321	0,5040	0,2482
ω_{31}	0,0728	0,0728	0,1939	0,4665	0,1939
ω_{41}	0,1500	0,0769	0,3353	0,0463	0,3915
ω_{51}	0,5113	0,1649	0,1151	0,1151	0,0937
ω_{61}	0,0978	0,4720	0,1080	0,2761	0,0461
ω_{71}	0,4449	0,0673	0,2639	0,0564	0,1675
ω_{81}	0,2613	0,1489	0,0356	0,4954	0,0588
ω_{91}	0,1290	0,3435	0,1290	0,3435	0,0551
ω_{101}	0,3651	0,0936	0,1592	0,0529	0,3292

Tabla 6.18.- (Continuación)

SFF	HPC	HPM	CAC	CMA	MLC
Ω12	0,3435	0,3435	0,1290	0,1290	0,0551
Ω22	0,3883	0,3883	0,0908	0,0908	0,0419
Ω32	0,5375	0,2498	0,1185	0,0326	0,0616
Ω42	0,5286	0,1983	0,0499	0,0303	0,1928
Ω52	0,3921	0,3921	0,0303	0,0530	0,1324
Ω62	0,5392	0,2332	0,0526	0,0947	0,0802
Ω72	0,3878	0,3707	0,1200	0,0762	0,0453
Ω82	0,4988	0,2430	0,1002	0,0418	0,1162
Ω92	0,4107	0,3986	0,1020	0,0563	0,0324
Ω102	0,6303	0,1510	0,0553	0,0330	0,1304
UML	HPC	HPM	CAC	CMA	MLC
Ω13	0,4129	0,4129	0,0703	0,0703	0,0337
Ω23	0,5128	0,2615	0,1290	0,0634	0,0333
Ω33	0,5299	0,2531	0,0549	0,0299	0,1323
Ω43	0,4992	0,2289	0,1028	0,0480	0,1210
Ω53	0,4485	0,2025	0,2025	0,0440	0,1024
Ω63	0,3435	0,3435	0,1290	0,1290	0,0551
Ω73	0,3392	0,3392	0,1455	0,1260	0,0500
Ω83	0,3912	0,3912	0,0988	0,0859	0,0329
Ω93	0,3817	0,3817	0,1284	0,0713	0,0369
Ω103	0,5287	0,1583	0,1893	0,0457	0,0780
EST	HPC	HPM	CAC	CMA	MLC
Ω14	0,0333	0,1290	0,0634	0,2615	0,5128
Ω24	0,0333	0,1290	0,0634	0,2615	0,5128
Ω34	0,0304	0,2534	0,0691	0,5218	0,1253
Ω44	0,0313	0,1037	0,4929	0,2753	0,0967
Ω54	0,0458	0,0458	0,1745	0,1745	0,5593
Ω64	0,0466	0,3674	0,0735	0,2794	0,2332
Ω74	0,0473	0,0938	0,0473	0,2399	0,5718
Ω84	0,0319	0,1117	0,0565	0,3065	0,4935
Ω94	0,0980	0,0684	0,2218	0,0504	0,5614
Ω104	0,0425	0,2203	0,0480	0,4856	0,2036

6.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

Tabla 6.19.- Matriz de vectores de prioridad de las alternativas.

	CFB	CTM	CMC	SFF	UML	EST	EMI	EIN	EFN
HPC	0,2463	0,0211	0,1938	0,4657	0,4388	0,0441	0,0000	0,1449	0,4099
HPM	0,2518	0,0000	0,1769	0,2969	0,2973	0,1522	0,2035	0,3947	0,1065
CAC	0,2927	0,4170	0,1198	0,0849	0,1251	0,1310	0,2059	0,1989	0,0587
CMA	0,2092	0,4378	0,3028	0,0638	0,0714	0,2856	0,2449	0,2615	0,4248
MLC	0,0000	0,1240	0,2067	0,0888	0,0676	0,3870	0,3457	0,0000	0,0000

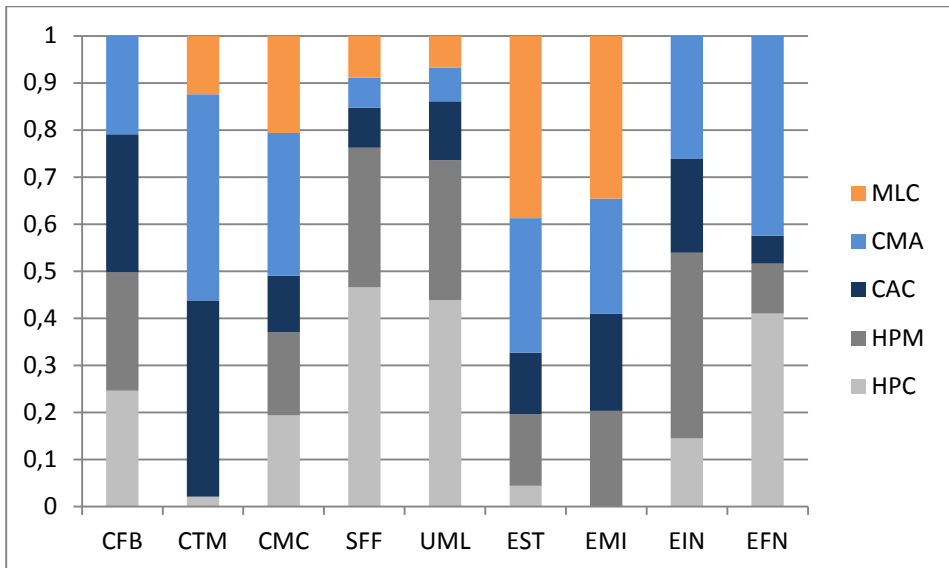


Fig. 6.13. Matriz de vectores de prioridad de las alternativas.

Capítulo 7.
OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CONSENSO

Una vez obtenida la matriz de prioridades aplicando el AHP, se procede a evaluar las alternativas aplicando el método VIKOR, para obtener la solución de consenso, que es la más cercana a la ideal.

Para cada alternativa j , la prioridad obtenida según el criterio i -ésimo se denomina mediante f_{ij} . Dentro del método VIKOR L_{1j} (S_j) y $L_{\infty j}$ (R_j) se utilizan para obtener dos listas. La solución que obtiene un mínimo valor de S_j es la que presenta el máximo consenso, y la solución que obtiene un valor mínimo de R_j es la que presenta un menor rechazo por parte del oponente. El método utiliza un parámetro ν para controlar el equilibrio entre las dos métricas, según sea la estrategia que quiera seguirse, con lo que se obtiene una tercera lista Q_j que es la que proporciona la solución de consenso.

Para alcanzar la solución de consenso con el método VIKOR se han seguido los siguientes pasos:

- Se obtiene el mejor valor de f_i^* y el peor de f_i^- para cada criterio i usando las ecuaciones $f_i^* = \max_j\{f_{ij}\}$; $f_i^- = \min_j\{f_{ij}\}$. Los resultados se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1.- Valores de f_i^* y f_i^- para cada criterio i .

	CFB	CTM	CMC	SFF	UML	EST	EMI	EIN	EFN
f_i^*	0,2927	0,4378	0,3028	0,4657	0,4388	0,3870	0,3457	0,3947	0,4248
f_i^-	0,0000	0,0000	0,1198	0,0638	0,0676	0,0441	0,0000	0,0000	0,0000

- Se calculan los valores S_j , R_j y Q_j usando las ecuaciones 4.2 a 4.4 y considerando $\nu = 0,5$. Los resultados se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2.- Valores de S_j , R_j y Q_j para cada alternativa j .

	HPC	HPM	CAC	CMA	MLC
S_j	0,5093	0,5545	0,5241	0,1877	0,6958
R_j	0,1483	0,1559	0,1896	0,0561	0,1969
Q_j	0,6439	0,7150	0,8051	0,0000	1,0000

- Se clasifican las alternativas colocando los valores Q , S , R en orden ascendente. Las tres listas resultantes se muestran en la Tabla 7.3.

7.- OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CONSENSO

Tabla 7.3.- Ranking de alternativas.

Posición	1	2	3	4	5
S_j	CMA	HPC	CAC	HPM	MLC
R_j	CMA	HPC	HPM	CAC	MLC
Q_j	CMA	HPC	HPM	CAC	MLC

La alternativa CMA, que es la mejor clasificada según el valor de Q (valor mínimo de Q), se propone como solución de consenso si se cumplen las siguientes condiciones:

Condición 1: *Ventaja aceptable*: La diferencia entre el primer y segundo clasificado en la lista de Q es mayor que DQ siendo $DQ = 1/(J-1)=0,25$. Aquí $Q(\text{HPC}) - Q(\text{CMA}) = 0,64 > DQ = 0,25$.

Condición 2: *Estabilidad aceptable en la toma de decisiones*: la primera alternativa en la clasificación según Q es la mejor clasificada según S y R .

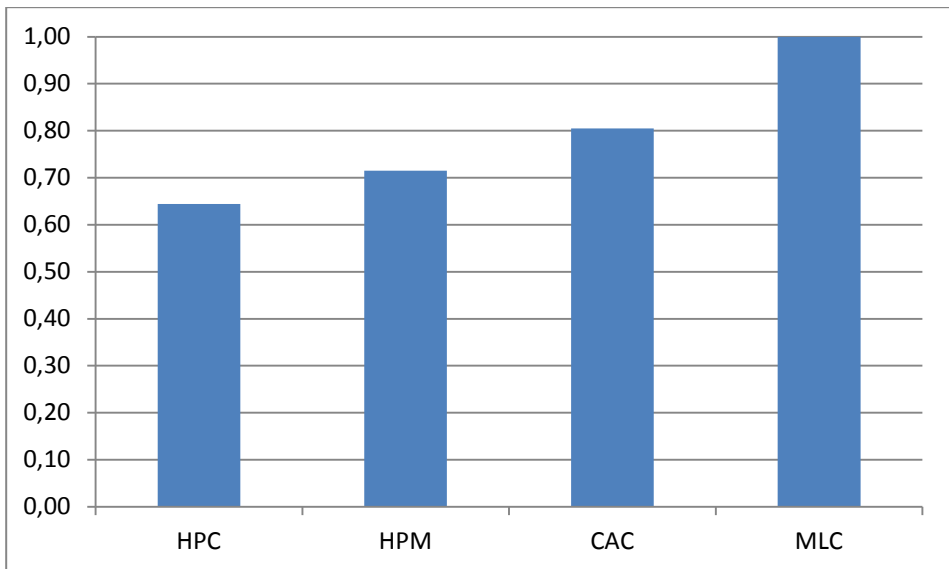


Fig. 7.1. Distancia de cada alternativa a la solución de consenso. (HPC: Hormigón prefabricado y correas, HPM: Hormigón prefabricado y cubierta tipo membrana. CAC: Celosía de acero y correas, MLC: Madera laminada y correas).

Como se cumplen las dos condiciones, se concluye que la solución de consenso es la alternativa CMA: Cubierta metálica autoportante. En la Fig. 7.1 se representa la distancia del resto de alternativas a la solución de consenso, dada por el valor de Q_j . En la Fig. 7.2 se representan las soluciones ideal y de consenso y las prioridades de las alternativas según los distintos criterios.

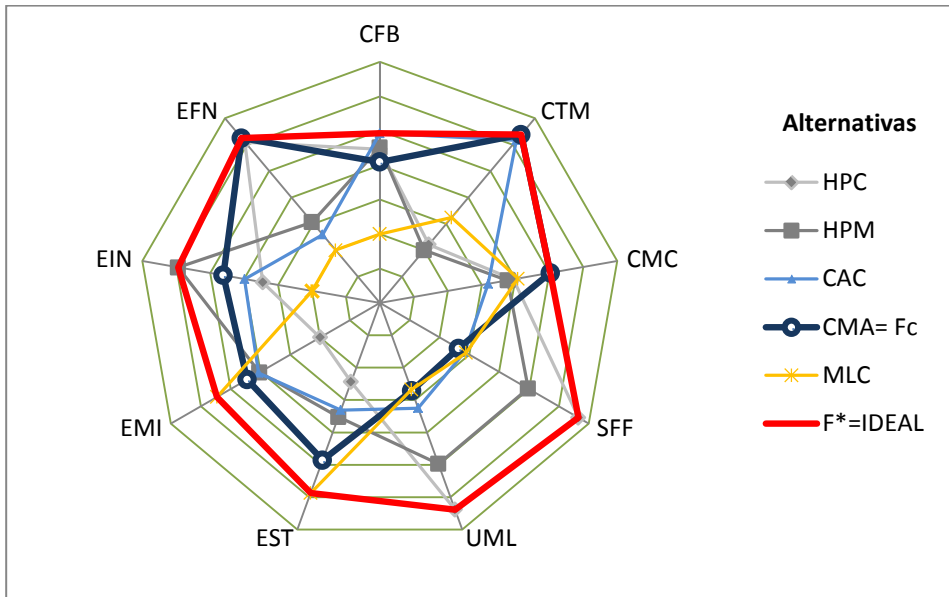


Fig. 7.2. Comparación de las alternativas con la solución ideal F^* y de consenso F_c . (CFB: Coste de fabricación, CTM: Coste de transporte y montaje, CMC: Coste de mantenimiento de la cubierta, SFF: Seguridad frente al fuego, UML: Uso de materiales locales, EST: Estética, EMI: Impacto de las emisiones, EIN: Energía interna, EFN: Energía de funcionamiento, HPC: Hormigón prefabricado y correas, HPM: Hormigón prefabricado y cubierta tipo membrana, CAC: Celosía de acero y correas, CMA: Cubierta metálica autoportante, MLC: Madera laminada y correas)

Capítulo 8.
APLICACIÓN INFORMÁTICA

Por último, se diseña una herramienta informática que permite aprovechar los vectores de prioridad de los criterios y los de las alternativas respecto de criterios intangibles, obtenidos en esta tesis, para determinar la solución que mejor cumple los criterios de sostenibilidad, entre las cinco alternativas estudiadas en esta tesis, para cualquier estructura mediante el uso de hojas de cálculo.

Para obtener los vectores de prioridad de las alternativas respecto de los criterios tangibles es necesario realizar una petición de ofertas a las empresas que comercializan las distintas tipologías estructurales. En estas ofertas figurarán los costes de fabricación, transporte y montaje tanto de la estructura como del panel sándwich de cobertura, el peso de la estructura, el del acero que conforma el panel sándwich y las características geométricas de la estructura. Los datos de costes y pesos se introducen directamente en las casillas habilitadas para ello (Fig. 8.1) y, a partir de las características geométricas, como canto de las vigas y correas o flecha y radio de la cubierta en las soluciones con cubierta autoportante, se calcula el volumen interior del edificio y la superficie de la envolvente y se introducen también en las casillas correspondientes. Con estos datos, la aplicación informática calcula los vectores de prioridad de las alternativas respecto de los criterios tangibles y crea la matriz de prioridades de las alternativas. A continuación, utilizando el método VIKOR, calcula la solución de consenso, que es la más cercana a la ideal y comprueba que cumple las dos condiciones necesarias para aceptar la solución: una ventaja aceptable del primer al segundo clasificado y una estabilidad aceptable.

La aplicación también proporciona el gráfico en el que se representan las soluciones ideal y de consenso y la comparación de todas las alternativas con estas soluciones (Fig. 8.2).

ENTRADA DE DATOS (1 de 2)		
VIGAS DE HORMIGÓN PREFABRICADO Y CORREAS (HPC)		
A1	Coste de fabricación de la estructura (€/m ²)	20,80
A2	Coste transporte y montaje de la estructura (€/m ²)	20,01
A3	Peso de la estructura (kg/m ²)	142,43
A4	Coste de fabricación de la cubierta (€/m ²)	44,66
A5	Coste transporte y montaje de la cubierta (€/m ²)	20,00
A6	Peso del acero de la cubierta (kg/m ²)	15,92
A7	Volumen interior del edificio (m ³)	3978,00
A8	Superficie de la envolvente (m ²)	1753,20
VIGAS DE HORMIGÓN PREFABRICADO Y CUBIERTA MEMBRANA (HPM)		
B1	Coste de fabricación de la estructura (€/m ²)	22,94
B2	Coste transporte y montaje de la estructura (€/m ²)	22,06
B3	Peso de la estructura (kg/m ²)	102,67
B4	Coste de fabricación de la cubierta (€/m ²)	41,53
B5	Coste transporte y montaje de la cubierta (€/m ²)	18,60
B6	Peso del acero de la cubierta (kg/m ²)	13,31
B7	Volumen interior del edificio (m ³)	4231,13
B8	Superficie de la envolvente (m ²)	1803,55
VIGAS EN CELOSÍA Y CORREAS DE ACERO (CAC)		
C1	Coste de fabricación de la estructura (€/m ²)	12,34
C2	Coste transporte y montaje de la estructura (€/m ²)	7,74
C3	Peso de la estructura (kg/m ²)	9,35
C4	Coste de fabricación de la cubierta (€/m ²)	44,66
C5	Coste transporte y montaje de la cubierta (€/m ²)	20,00
C6	Peso del acero de la cubierta (kg/m ²)	15,92
C7	Volumen interior del edificio (m ³)	4284,00
C8	Superficie de la envolvente (m ²)	1809,60

Fig. 8.1. Entrada de datos

ENTRADA DE DATOS (2 de 2)		
CUBIERTA CURVA METÁLICA AUTOPORTANTE (CMA)		
D1	Coste de fabricación de la estructura (€/m ²)	5,24
D2	Coste transporte y montaje de la estructura (€/m ²)	3,28
D3	Peso de la estructura (kg/m ²)	3,96
D4	Coste de fabricación de la cubierta (€/m ²)	67,00
D5	Coste transporte y montaje de la cubierta (€/m ²)	23,81
D6	Peso del acero de la cubierta (kg/m ²)	19,91
D7	Volumen interior del edificio (m ³)	4127,70
D8	Superficie de la envolvente (m ²)	1727,48
VIGAS Y CORREAS DE MADERA LAMINADA (MLC)		
E1	Coste de fabricación de la estructura (€/m ²)	71,61
E2	Coste transporte y montaje de la estructura (€/m ²)	23,87
E3	Peso de la estructura (kg/m ²)	12,27
E4	Coste de fabricación de la cubierta (€/m ²)	38,84
E5	Coste transporte y montaje de la cubierta (€/m ²)	12,95
E6	Peso del acero de la cubierta (kg/m ²)	15,92
E7	Volumen interior del edificio (m ³)	4335,00
E8	Superficie de la envolvente (m ²)	1819,00

Fig. 8.1. (Continuación)

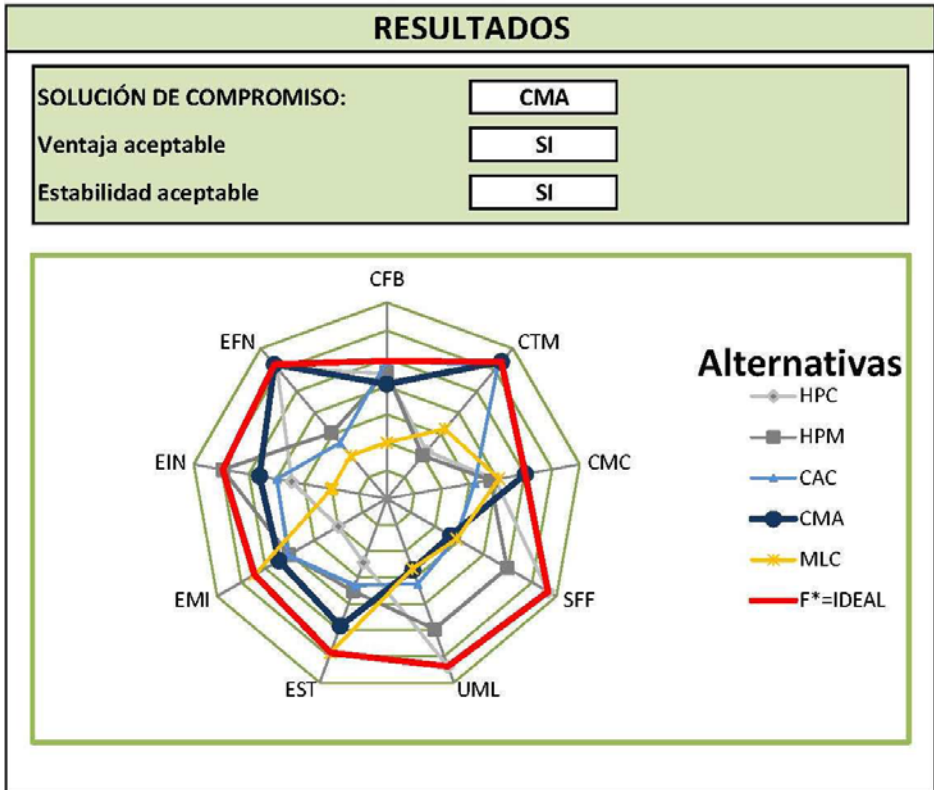


Fig. 8.2. Resultados

Capítulo 9.
CONCLUSIONES

La elección de la cubierta es una de las decisiones más importantes con consecuencias a largo plazo en los edificios de luces medias como pabellones polideportivos. La selección debe hacerse en términos de sostenibilidad, pensando en el “triple principio” que se refiere a la consideración de los aspectos económicos, sociales y medioambientales. La industrialización, el avance tecnológico y la innovación, han permitido el desarrollo de nuevas soluciones industriales que obtienen una mayor productividad y generan menor cantidad de residuos. Por lo tanto, la selección de la tipología estructural de la cubierta es un problema complejo debido a los muchos factores inconmensurables que intervienen en el proceso.

En esta tesis se ha aplicado un sistema multicriterio híbrido basado en los métodos Delphi, AHP y VIKOR para evaluar cinco soluciones y determinar la más adecuada aplicando criterios de sostenibilidad y considerando tanto la etapa de construcción como la de funcionamiento. Ha resultado que el sistema de cubierta metálica curva autoportante es la solución de consenso. Es la alternativa mejor calificada y presenta una ventaja aceptable con respecto a la clasificada en segundo lugar y una estabilidad aceptable, ya que también es la que obtiene el máximo consenso y el menor rechazo individual. El sistema autoportante coincide con la alternativa ideal cuando se consideran el coste de transporte y montaje, el coste de mantenimiento de la cubierta y la energía de funcionamiento. El criterio de coste de fabricación tiene el mayor peso pero con el método VIKOR su importancia se ve reducida porque cuatro alternativas tienen valores cercanos a la ideal. Debido a esto, los factores indicados anteriormente son los más relevantes. Por lo tanto, las principales ventajas del sistema de cubierta curva autoportante son debidas a su ligereza, que reduce el coste de transporte y montaje y a su compacidad, que influye en la energía de funcionamiento. Esta solución es la versión industrial y ligera del arco. El arco es, o pretende ser, el antifunicular de las cargas, una pieza que resiste principalmente a compresión reduciendo las flexiones, que son más costosas de resistir. La siguiente cubierta más cercana a la solución ideal es la de vigas y correas de hormigón prefabricado con cubierta sándwich plana. Su valor se debe principalmente a su clara ventaja con respecto a las otras alternativas cuando se consideran la resistencia al fuego y el uso de materiales locales. Su mayor desventaja es el transporte y coste de montaje debido a su elevado peso.

9.- CONCLUSIONES

El sistema experto propuesto se ha mostrado como una técnica fiable en la toma de decisiones para la aplicación de criterios de sostenibilidad en la selección de una cubierta en edificios de luces medias. Los resultados obtenidos indican que un buen estudio en la etapa de diseño puede proporcionar una solución más económica, con una mayor aceptación social y más respetuosa con el medio ambiente que la utilizada tradicionalmente. El modelo híbrido propuesto ofrece una guía que permitirá a los ingenieros seleccionar la mejor cubierta para edificios de luces medias. Se ha diseñado una aplicación informática en la que, modificando los datos de coste de fabricación y montaje, el peso del material y los datos geométricos de las cinco soluciones estudiadas, es inmediato determinar la solución más adecuada para cada caso.

Capítulo 10.
REFERENCIAS

1. D. Adler. Metric handbook planning and design data, Second ed., Architectural Press, Oxford, 1999.
2. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040: 2006), AENOR, Madrid, 2006.
3. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Análisis y evaluación del riesgo ambiental, UNE 150008:2008, AENOR, Madrid, 2008.
4. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Sistemas de gestión ambiental. Directrices para la incorporación del ecodiseño. (ISO 14006:2011), AENOR, Madrid, 2011.
5. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, UNE-ISO 26000:2012 Guía de responsabilidad social, AENOR, Madrid, 2012.
6. A. Aguado, A. del Caño, M.P. de la Cruz, D. Gómez, A. Josa, Sustainability Assessment of Concrete Structures within the Spanish Structural Concrete Code. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138 (2) (2012) 268–276.
7. C. Ahn, P.V. Rekapalli, J.C. Martínez, F. Peña-Mora, Sustainability analysis of earthmoving operations, *Proceedings-Winter Simulation Conference* (2009) 2605–2611.
8. P.O. Akadiri, P.O. Olomolaiye, E.A. Chinyio, Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects, *Automation in Construction* 30 (2013) 113-125.
9. K.M.A-S. Al-Harbi, Application of the AHP in project management, *International Journal of Project Management* 19 (2001) 19-27.
10. A. Alcorn, P. Wood, New Zealand Building Materials Embodied Energy Coefficients Database, vol. III, Centre for Building Performance Research Report, Wellington, New Zealand, 1998.
11. H. Alwaer, D.J. Clements-Croome, Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings. *Building and Environment* 45 (2010) 799–807.

12. S. Azhar, W. A. Carlton, D. Olsen, I. Ahmad, Building information modeling for sustainable design and LEED rating analysis, *Automation in Construction* 20 (2011) 217–224.
13. J. Baylis, S. Smith, *La globalización de la política mundial* (3ª ed) Oxford University Press, Oxford, (2005) 454-455.
14. M. Behm, Linking construction fatalities to the design for construction safety concept, *Safety Science* 43 (2005) 589–611.
15. N. Bhushan, K. Rai, *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*, Springer, New York, 2004.
16. M. Bitarafan, S. Hashemkhani Zolfani, S.L. Arefi, E.K. Zavadskas, Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 12 (3) (2012) 360–367.
17. R. Broun, H. Babaizadeh, A. Zakersalehi, G.F. Menzies, Integrated Life Cycle Energy and Greenhouse Gas Analysis of Exterior Wall Systems for Residential Buildings. *Sustainability* 6 (2014) 8592-8603.
18. G.H. Brundtland, *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford, 1987.
19. K.R. Bunz, G.P. Henze, D.K. Tiller, Survey of Sustainable Building Design Practices in North America, Europe, and Asia, *Journal of Architectural Engineering* 12 (2006) 33-62.
20. J. Cantó-Perelló, J. Curiel-Esparza, Assessing governance issues of urban utility tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology* 33 (2013) 82–87.
21. J. Cantó-Perelló, J. Curiel-Esparza, V. Calvo, Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space, *Expert System with Applications* 40 (2013) 4707–4714.
22. G. Carpentieri, F. Tornabene, L. Ascione, F. Fraternali, An accurate one-dimensional theory for the dynamics of laminated composite curved beams, *Journal of Sound and Vibration* 336 (2015) 96–105.
23. A.A. Carretero Peña, Use of Norma UNE 150008:2008 for the realization of Environmental Risk Analysis in the context of the

- 26/2007 law on Environmental Responsibility, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 48 (4) (2009) 7-8.
24. X.G. Casals, Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences, Energy and Buildings 38 (2006) 381–392.
25. P. Casariego, M. Casafont, J. Muñoz, A. Floreta, M. Ferrer, F. Marimon, Failure mechanisms of curved trapezoidal steel sheeting, EUROSTEEL 2011, August 31 - September 2, 2011, Budapest, Hungary.
26. Z.A. Collier, D. Wang, J.T. Vogel, E.K. Tatham, I. Linkov, Sustainable Roofing Technology under Multiple Constraints: A Decision Analytic Approach, Environment, Systems, Decisions 33 (2013) 261-271.
27. COM, Comisión de las Comunidades Europeas, Comunicación de la Comisión al Consejo Europeo. Colaboración para la integración-Una estrategia para la integración del medio ambiente en las políticas de la Unión Europea. Cardiff (1998) 333-final.
28. COM, Comisión Europea, Medio ambiente 2010: el Futuro está en nuestras manos, Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente, OPOCE, Luxemburgo, 2001.
29. COM, Comisión Europea, Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo sobre requisitos relativos a límites de emisiones y homologación de tipo para motores de combustión interna que se instalen en máquinas móviles no de carretera, 268 (2014) 581-final.
30. COM, Comisión Europea, Dirección General CCI, Centro Común de Investigación, Instituto de Prospectiva Tecnológica Unidad de Competitividad y Sostenibilidad, Oficina Europea de IPPC, Prevención y control integrados de la contaminación Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles de Eficiencia energética, Sevilla, 2008.
31. P. Crowther, Design for disassembly to recover embodied energy, in: The 16th Annual Conference on Passive and Low Energy Architecture, Melbourne/Brisbane/Cairns, Australia, 1999.

32. CSD, Consejo Superior de Deportes, Crónica del Plan escolar, Madrid, 2007.
33. J. Curiel-Esparza, J. Cantó-Perelló, Selecting utilities placement techniques in urban underground engineering, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13 (2013) 276–85.
34. N. Dalkey, B. Brown, S. Cochran, “The Delphi Method III: Use of self-ratings to improve group estimates”, The Rand Corporation (Santa Mónica, California) RM-6115-PR, 1969
35. N. Dalkey, O. Helmer, An experimental application of the Delphi method to the use of experts, *Management Science* 9 (3) (1963) 458-467.
36. N.C. Dalkey, D.L. Rourke, Experimental assessment of Delphi procedures with group value judgments. In N. C. Dalkey, D. L. Rourke, R. Lewis, & D. Snyder (Eds.). *Studies in the quality of life: Delphi and decision-making*, Lexington, MA: Lexington Books. (1972) pp. 55-83.
37. A. del Caño, D. Gómez, M.P. de la Cruz, Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: A probabilistic method, *Construction and Building Materials* 37 (2012) 865–873.
38. A.L. Delbecq, A.H. Van de Ven, D.H. Gustafson, *Group techniques for program planning: a guide to nominal group and Delphi processes*, Scott, Foresman, Michigan, 1975.
39. G. Ding, The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities, Ph.D. Thesis, University of technology, Sydney, Australia, 2004.
40. M.K. Dixit, J.L. Fernández-Solís, S. Lavy, C.H. Culp, Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1238–1247.
41. L. Duckstein, S. Opricovic, Multiobjective optimization in river basin development, *Water Resources Research* 16 (1) (1980) 14–20.
42. J. Esteban, A. Ros, M. Sanz, R.V. Lozano, La integración de la prevención en la fase de diseño. El papel del Proyectista en

- España y en los países de la Europa de los 15, Informes de la Construcción 65 (532) (2013) 545-555.
43. X.W. Fan, A simplified computation model for arch-shaped corrugated shell roof, 3rd International Conference on Thin Walled Structures, 2001.
 44. R. Fay, G. Treloar, Life cycle energy analysis-a measure of the environmental impact of buildings, Environment Design Guide GEN22 (1998) 1-7.
 45. R. Fay, G. Treloar, U. Iyer-Raniga, Life cycle energy analysis of buildings: a case study, Building Research and Information 28 (1) (2000) 31-41.
 46. J. Fernández-Ceniceros, R. Fernández-Martínez, E. Fraile-García, F.J. Martínez-de-Pison, Decision support model for one-way floor slab design: A sustainable approach, Automation in Construction 35 (2013) 460-470.
 47. B. Fernández-Feijoo, S. Romero, S. Ruiz, Commitment to Corporate social responsibility measured through global reporting initiative reporting: factors affecting the behavior of companies, Journal of Cleaner Production 81 (2014) 244-254.
 48. L. Florez, D. Castro-Lacouture, Optimization model for sustainable materials selection using objective and subjective factors, Materials and Design 46 (2013) 310-321.
 49. E. Forman, K. Peniwati, Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process, European Journal of Operational Research 108 (1998) 165-169.
 50. M.M. Fouladgar, A. Yazdani-Chamzini, E.K. Zavadskas, S.H. Yakhchali, M.H. Ghasempourabadi, Project Portfolio Selection Using Fuzzy AHP and VIKOR Techniques, Transformations in Business & Economics 11 (1) (2013) 213-231.
 51. E. Franzoni, Materials selection for green buildings: which tools for engineers and architects? Procedia Engineering 21 (2011) 883-890.
 52. M. Gangolells, M. Casals, N. Forcada, X. Roca, A. Fuertes, Mitigating construction safety risks using prevention through design, Journal of Safety Research 41 (2010) 107-122.

53. M.S. García Cascales, Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos (2009)
54. M. Ghomeshi, M.M. Jusan, Investigating Different Aesthetic Preferences Between Architects and Non-architects in Residential Facade Designs, *Indoor and built environment* 22 (6) (2013) 952-964.
55. G. Giannarakis, N. Litinas, N. Sariannidis, Evaluation of corporate social responsibility performance standards, *African Journal of Business Management* 5 (17) (2011) 7367-7374.
56. M. Gjørberg, Measuring the immeasurable? Constructing an index of CSR practices and CSR performance in 20 countries, *Scandinavian Journal of Management* 25 (2009), 10-22.
57. J. Goggins, T. Keane, A. Kelly, The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland, *Energy Build*, 42 (2010) 735–744.
58. J.J. Graafland, S.C.W. Eijffinger, H. Smid, Benchmarking of Corporate Social Responsibility: Methodological Problems and Robustness, *Journal of Business Ethics* 53 (2004) 137-152.
59. H.A. Gracht, Consensus measurement in Delphi studies, review and implications for future quality assurance, *Technological Forecasting and Social Change* 79 (8) (2012) 1525–1536.
60. J.B. Guinée, M. Gorée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. Wegener Sleeswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin, M.A.J. Huijbregts, Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
61. O. Helmer, N. Rescher, On the epistemology of the inexact sciences, *Management Science* 6 (1) (1959), 25-52.
62. P. Hernandez, P. Kenny, Development of a methodology for life cycle building energy ratings, *Energy Policy* 39 (2011) 3779–3788.

63. S. Hoti, M. McAleer, L.L. Pauwels, Multivariate volatility in environmental finance, *Mathematics and Computers in Simulation* 78 (2008) 189–199.
64. C.C. Hsu, B.A. Sandord, The Delphi technique: making sense of consensus, *Practical Assessment, Research and Evaluation* 12 (10) (2007) 1–7.
65. ICLEI, International Council for Local Environmental Initiatives. Towards sustainable cities & towns: report of the first European conference on sustainable cities & towns. Freiburg, Germany 1994.
66. Jefatura del Estado, Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, *Boletín Oficial del Estado* 55 (2011) 25033-25235.
67. Jefatura del Estado, Ley 5/2013, de 11 de junio por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, *Boletín Oficial del Estado* 140 (2013) 44257-44288.
68. P. Jones, S.S. Hou, X. Li, Towards zero carbon design in offices: Integrating smart facades, ventilation, and surface heating and cooling, *Renewable Energy* 73 (2015) 69-76.
69. S. Junnila, A. Horvath, Life-cycle environmental effects of an office building, *Journal of Infrastructure Systems* 9 (4) (2003) 157–166.
70. O.T Karaguzel, R. Zhang, K.P. Lam, Coupling of whole-building energy simulation and multi-dimensional numerical optimization for minimizing the life cycle costs of office buildings, *Building Simulation* 7 (2) (2014) 111-121.
71. F. Khosrowshahi, A. Alanib, Visualisation of impact of time on the internal lighting of a building, *Automation in Construction* 20 (2011) 145–154.
72. F. Khosrowshahi, P. Ghodous, M. Sarshar, Visualization of the Modeled Degradation of Building Flooring Systems in Building Maintenance, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 29 (2014) 18–30.

73. S. Kim, D.M. Frangopol, M. Soliman, Generalized Probabilistic Framework for Optimum Inspection and Maintenance Planning, *Journal of Structural Engineering* 139 (2013) 435-447.
74. S. Kim, G.H. Kim, Y.D. Lee, Sustainability Life Cycle Cost Analysis of Roof Waterproofing Methods Considering LCCO₂, *Sustainability* 6, (2014) 158-174.
75. P. Kobel, R. Steiger, A. Frangi, Experimental Analysis on the Structural Behaviour of Connections with LVL Made of Beech Wood, (2014). *Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology*, Volume 9, Springer Netherlands, 2014, 211-220.
76. R. Korman, Wanted: new ideas. Panel ponders ways to end accidents and health hazards. *Engineering News Record* 31 (2001) 26-29.
77. I. Kubiszewski, C. Cleveland, United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, Brazil 2012. Retrieved from <http://www.eoearth.org/view/article/156773>.
78. Y. Kuo, T. Yang, G.W. Huang, The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems, *Computers & Industrial Engineering* 55 (2008) 80-93.
79. T. Kurka, Application of the analytic hierarchy process to evaluate the regional sustainability of bioenergy developments, *Energy* 62 (2013) 393-402.
80. M.K. Kuzman, P. Groselj, N. Ayrilmis, M. Zbasnik-Senegacnik, Comparison of passive house construction types using analytic hierarchy process, *Energy and Buildings* 64 (2013) 258-263.
81. A. La Puebla-Ferri, A.J. Jimenez-Mocholi, J.R. Cervera Lopez, On Code formulation, testing and computer simulation of cold-formed thin-sheet steel arches, *Symposium of the international Association for Shell and Spatial Structures*, 2009.
82. J. Landeta, Current validity of the Delphi method in social sciences, *Technological Forecasting & Social Change* 73 (2006) 467-482.
83. J. Landeta, J. Barrutia, People consultation to construct the future: A Delphi application, *International Journal of Forecasting* 27 (2011) 134-151.

84. S. Lavallée, S. Plouffe, The Ecolabel and Sustainable Development, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (6) (2004) 349-354.
85. G.K.L. Lee, E.H.W. Chan, The Analytic Hierarchy Process (AHP) Approach for Assessment of Urban Renewal Proposals, *Social Indicators Research* 89 (2008) 155-168.
86. W.S. Lee, Merger and acquisition evaluation and decision making model, *The Service Industries Journal* 33, 15-16 (2013) 1473-1494.
87. H. Li, T. Huang, C.W. Kong, H.L. Guo, A. Baldwin, N. Chan, J. Wong, Integrating design and construction through virtual prototyping, *Automation in Construction* 17 (2008) 915-922.
88. B-O. Linnér, H. Selin, The Thirty Year Quest for Sustainability: The Legacy of the 1972 UN Conference on the Human Environment, Ponencia presentada en la Convención Anual de la Asociación de Estudios Internacionales, de Portland, Oregon, EE.UU., 25 de febrero - 01 de marzo 2003, como parte del panel "Instituciones y producción de conocimiento para la gobernanza ambiental" p. 3.
89. H. Linstone, M. Turoff, *The Delphi method: Techniques and applications*. Mass: Addison-Wesley Pub, London, 1975.
90. S.M. Lo, C.M. Zhao, M. Liu, A. Copping, A simulation model for studying the implementation of performance-based fire safety design in buildings, *Automation in Construction* 17 (7) (2008), 852-863.
91. A. Lowinska-Kluge, T. Blaszczynski, The influence of internal corrosion on the durability of concrete, *Archives of civil and mechanical engineering* 12 (2012) 219-227.
92. S. Maas, G. Reniers, Development of a CSR model for practice: connecting five inherent areas of sustainable business, *Journal of Cleaner Production* 64 (2014) 104-114.
93. I. Makarenko, Challenges of Environmental Impact Assessment (EIA) Procedure for Transboundary Projects in the Black Sea Basin, *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 12 (2012) 445-452.

94. T. Malmqvist, M. Glaumann, S. Scarpellini, I. Zabalza, A. Aranda, E. Llera, S. Díaz, Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guideline, *Energy* 36 (2011) 1900-1907.
95. J. Markelj, M.K. Kuzman, P. Groselj, M. Zbasnik-Senegacnik, A Simplified Method for Evaluating Building Sustainability in the Early Design Phase for Architects, *Sustainability* 6 (12) (2014) 8775-8795.
96. K. Mela, T. Tiainen, M. Heinisuo, Comparative study of multiple criteria decision making methods for building design, *Advanced Engineering Informatics* 26 (2012) 716-26.
97. M.P. Mercader, A. Ramírez de Arellano, M. Olivares, Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución, *Informes de la Construcción* 64 (527) (2012) 401-414.
98. Ministerio de Educación, Real Decreto 132/2010, de 12 de febrero, por el que se establecen los requisitos mínimos de los centros que impartan las enseñanzas del segundo ciclo de la educación infantil, la educación primaria y la educación secundaria, *Boletín Oficial del Estado* 62 (2010) 24831-24840.
99. Ministerio de Fomento, Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, *Boletín Oficial del Estado* 219 (2013) 67137-67209.
100. Ministerio de Fomento, Subdirección General de Arquitectura y Edificación, Nota informativa sobre la aplicación de herramientas informáticas para la verificación de las exigencias establecidas por la Orden FOM/1635 (2014).
101. Ministerio de Industria Energía y Turismo, Secretaría de Estado de Energía, Nota informativa de 13/03/2014 de la Secretaría de Estado de Energía (2014).
102. Ministerio de Presidencia, Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción, *Boletín Oficial del Estado* 256 (1997) 30875-30886.

103. Ministerio de Presidencia, Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Boletín Oficial del Estado 207 (2007) 35931-35984.
104. Ministerio de Presidencia, Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), Boletín Oficial del Estado 203 (2008) 35176-35178 y suplemento.
105. Ministerio de Presidencia, Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE), Boletín Oficial del Estado 149 (2011) 67148-67846.
106. Ministerio de Presidencia, Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, Boletín Oficial del Estado 89 (2013) 27548-27563.
107. Ministerio de Vivienda, Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, Boletín Oficial del Estado 74 (2006) 11816-11831 y suplemento.
108. R. Mirzaei, A Review of Successful Housing System in Iran and the Introduction of Cob as a New Alternative in Iran's Industry, *Journal of American Science* 8 (10) (2012) 180-184.
109. A. Najam, C.J. Cleveland, World Environment Summits: The Role of Energy, *Encyclopedia of Energy* 6 (2004) 539-548
110. S. Naji, O. C. Çelik, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, S. Shamshirband, Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings, *Energy and Buildings* 84 (2014) 727-739.
111. I. Naslund, H. Johnsson, Horizontal Displacements in Medium-Rise Timber Buildings: Basic FE Modeling in Serviceability Limit State, *Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology*, Volume 9, Springer Netherlands, 2014, 3-12.
112. K. Nassar, W. Thabet, Y. Beliveau, A procedure for multi-criteria selection of building assemblies, *Automation in Construction* 12 (2003) 543-560.

113. J. Nässén, J. Holmberg, A. Wadeskog, M. Nyman, Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: an input output analysis, *Energy* 32 (9) (2007) 1593–1602.
114. F. Neugebauer, EMAS and ISO 14001 in the German industry - complements or substitutes?, *Journal of Cleaner Production* 37 (2012) 249-256.
115. P. Nielsen Energi-och miljøanalyser af bygninger. SBI-meddelelse 108, Statens Byggeforskningsinstitut, Denmark, 1995 [in Danish].
116. S. Opricovic, G.H. Tzeng, Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, *European Journal of Operational Research* 156 (2004) 445-455.
117. R. Ourghi, A. Al Anzi, M. Krarti, A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings, *Energy Conversion and Management*, 48 (1) (2007) 300–305.
118. A. Páez, El hormigón pretensado en ingeniería y en arquitectura, Bellisco, Madrid, 1989.
119. J. Parasonis, A. Kezikas, D. Kalibatiene, The relationship between the shape of a building and its energy performance, *Architectural Engineering and Design Management* 8 (4) (2012) 246-56.
120. E. Peris Mora, Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials *Building and Environment* 42 (2007) 1329–1334.
121. D.C.A. Pigosso, H. Rozenfeld, T.C. McAlloone, Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies, *Journal of Cleaner Production* 59 (2013) 160–173.
122. O. Pons, A. Aguado, Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain, *Building and Environment* 53 (2012) 49-58.
123. S. Pullen, Data quality of embodied energy methods, in: *Proceedings of Embodied Energy: The Current State of Play*, Geelong, Australia, 28–29 November, 1996.

124. S. Pullen, D. Holloway, B. Randolph, P. Troy, Energy profiles of selected residential developments in Sydney with special reference to embodied energy, in: Proceedings of the Australian and New Zealand Architectural Science Association, 40th Annual Conference, “challenge for architectural science in changing climate”, Adelaide, Australia, 2006.
125. J. Queipo, J.M. Navarro, M. Izquierdo, A. del Águila, D. Guinea, M. Villamor, S. Vega, J. Neila, Proyecto de investigación INVISIO: industrialización de viviendas sostenibles, *Informes de la Construcción* 61 (513) (2009) 73-86.
126. K. Rakhshan, W.A. Friess, S. Tajerzadeh, Evaluating the sustainability impact of improved building insulation: A case study in the Dubai residential built environment, *Building and Environment* 67 (2013) 105-110.
127. T. Ramesh, R. Prakash, K.K. Shukla, Life cycle energy analysis of buildings: An overview, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1592-1600.
128. B. Reza, R. Sadiq, K. Hewage, Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2053-2066.
129. R. Ries, M.M. Bilec, N.M. Gokhan, K. LaScola Needy, The Economic Benefits of Green Buildings: A Comprehensive Case Study, *Engineering Economist* 51 (3) (2006) 259-295.
130. D. Roca, S. Lagüela, L. Diaz-Vilariño, J. Armesto, P. Arias, Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building facades, *Automation in Construction* 36 (2013) 128-135.
131. F. Roubelat, The Delphi method as a ritual: inquiring the Delphi Oracle, *Technological Forecasting & Social Change* 78 (9) (2011) 1491-1499.
132. G. Rowe, G. Wright, The Delphi technique: Past, present, and future prospects-Introduction to the special issue, *Technological Forecasting & Social Change* 78 (2011) 1487-1490.
133. T.L. Saaty, A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology* 15 (3) (1977) 234-281.

134. T.L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
135. T.L. Saaty, Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal of Services Sciences* 1 (1) (2008) 83-98.
136. T.L. Saaty, *Decision Making for Leaders. The Analytic Hierarchy Process for decisions in a complex world*, third edition, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 2012.
137. T.L. Saaty, M. Ozdemir, Why the Magic Number Seven Plus or Minus Two, *Mathematical and Computer Modeling* 38 (2003) 233-244.
138. K. Sahlin-Andersson, Corporate social responsibility: a trend and a movement, but of what and for what?, *Corporate Governance: The international journal of business in society* 6 (5) (2006) 595-608.
139. S.M.K. Samarakoon, O.T. Gudmestad, The IPPC directive and technique qualification at offshore oil and gas installations, *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 13-20.
140. J. San Cristobal, Contractor Selection Using Multicriteria Decision-Making Methods, *Journal of Construction Engineering and Management* 138 (6) (2012) 751-758.
141. J.T. San José Lombera, J. Cuadrado Rojo, Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 438-447.
142. J.T. San José Lombera, I. Garrucho Aprea, A system approach to the environmental analysis of industrial buildings, *Building and Environment* 45 (2010) 673-683.
143. J.T. San José, I. Garrucho, J. Cuadrado, The first sustainable industrial building projects, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer* 159 (3) (2006) 147-153.
144. J.T. San José Lombera, I. Garrucho, R. Losada, J. Cuadrado, A proposal for environmental indicators towards industrial building sustainable assessment, *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 14 (2) (2007) 160-173.

-
145. L.E. Sánchez, P. Croal, Environmental impact assessment, from Rio-92 to Rio+20 and beyond, *Ambiente & Sociedade* 15 (3), (2012) 41-54.
 146. E. Sánchez, J. Letona, R. González, M. García, J. Darpón, J.I. Garay, A descriptive study of the implementation of the EFQM excellence model and underlying tools in the Basque Health Service, *International Journal for Quality in Health Care*, 18 I (2006) 58-65.
 147. A. Sarja, *A Integrated life cycle design of structures*, Spon Press, London, 2002.
 148. I. Sartori, A.G. Hestnes, Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: a review article, *Energy and Building* 39 (3) (2007) 249–257.
 149. M. K. Sayadi, M. Heydari, K. Shahanaghi, Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers, *Applied Mathematical Modelling* 33 (2009) 2257-2262.
 150. A. Schlueter, F. Thesseling, Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages, *Automation in Construction* 18 (2009) 153–163.
 151. J. Sebastià, *La belleza industrial. Historia de la fábrica y su estética*. Fundación Bancaja. Valencia, 2007
 152. L. Shao, G.Q. Chen, Z.M. Chen, S. Guo, M. Y. Han, B. Zhang, et al., Systems accounting for energy consumption and carbon emission by building, *Commun Nonlinear Sciences Numerical Simulation* 19 (2014) 1859–1873.
 153. A. L. Sharrard, H. S. Matthews, M. Roth, Environmental implications of construction site energy use and electricity generation, *Journal of Construction Engineering and Management* 133 (2007) 846–854.
 154. P. Shrivastava, H. Stuart, Creating sustainable corporations, *Business Strategy and the Environment* 4 (1995) 154–165.
 155. A. Sibley, World Summit on Sustainable Development (WSSD), Johannesburg, South Africa (2007) Retrieved from <http://www.eoearth.org/view/article/157161>.

156. M.J. Skibniewski, E.K. Zavadskas, Technology development in construction: a continuum from distant past into future, *Journal of civil engineering and management* 19 (1) (2013) 136-147.
157. R. Spence, H. Mulligan, Sustainable development and the construction industry, *Habitat International* 19 (3) (1995) 279–292.
158. B. Srdjevic, Z. Srdjevic, B. Blagojevic, K. Suvocarev, A two-phase algorithm for consensus building in AHP-group decision making, *Applied Mathematical Modelling* 37 (2013) 6670–6682.
159. E.K. Tatham, D.A. Eisenberg, I. Linkov, Sustainable Urban Systems: A Review of How Sustainability Indicators Inform Decisions. In: Linkov, I. *Sustainable Cities and Military Installations*. Springer, Amsterdam, 2014.
160. F. Testa, F. Rizzi, T. Daddi, N. M. Gusmerotti, M. Frey, F. Iraldo, EMAS and ISO 14001: the differences in effectively improving environmental performance, *Journal of Cleaner Production* 68 (2014) 165-173.
161. G. Tondi, L. Haurie, S. Wieland, A. Petutschnigg, A. Lacasta, J. Monton, Comparison of disodium octaborate tetrahydrate-based and tannin-boron-based formulations as fire retardant for wood structures, *Fire and materials* 38 (2014) 381-390.
162. E. Torroja, Razón y ser de los tipos estructurales. Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento, Madrid, 1984
163. G.J. Treloar, A comprehensive embodied energy analysis framework, Ph.D. Thesis, Deakin University, Victoria, Australia, 1998.
164. Z. Turskis, E.K. Zavadskas, F. Peldschus, Multi-criteria Optimization System for Decision Making in Construction Design and Management, *Engineering economics* 1 (61) (2009) 7-17.
165. UE, Unión Europea, Directiva 92/57/CEE del Consejo de 24 de junio de 1992 relativa a las disposiciones mínimas de seguridad y de salud que deben aplicarse en las obras de construcción temporales o móviles, *Diario Oficial L245* (1992) 6-22.
166. UE, Unión Europea, Directiva 93/76/CEE del Consejo de 13 de septiembre de 1993 relativa a la limitación de las emisiones de

- dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética (SAVE), Diario Oficial de las Comunidades Europeas L237 (1993) 28-30.
167. UE, Unión Europea, Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de enero de 2008 relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación, Diario Oficial de la Unión Europea L24 (2008) 8-29.
168. UE, Unión Europea, Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas, Diario Oficial de la Unión Europea L 312 (2008) 3-30.
169. UE, Unión Europea, Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de Mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición), Diario Oficial de la Unión Europea L 153 (2010) 13-35.
170. UE, Unión Europea, Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación) (versión refundida), L334 (2010) 17-119.
171. UE, Unión Europea, Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de diciembre de 2011 relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (texto codificado), Diario Oficial de la Unión Europea L26 (2011) 1-21.
172. UN, United Nations, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998.
173. E. Valladares Pagliotti , El potencial de la madera como elemento estructural, ARQ 84 (2013) 64-67.
174. G. Wadel, J. Avellaneda, A. Cuchí, La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales, Informes de la Construcción 62 (517) (2010) 37-51.
175. J.K. Wai Wong, H. Li, G. Chan, H. Wang, T. Huang, E. Luo, V. Li, Virtual Prototyping for Construction Site CO₂ Emissions and Hazard Detection, International Journal of Advanced Robotic Systems 11 (130) (2014) 1-9.

176. R. Walentynski, R. Cybulski, Stability analyses and experimental investigation of doubly corrugated steel arch panels, *Architecture Civil engineering Environment* 4 (2012) 79-92.
177. S.E. Windolph, Assessing Corporate Sustainability Through Ratings: Challenges and Their Causes, *Journal of Environmental Sustainability* 1 (2011) 61-80.
178. J.P. Won, S.H. Kim, S.J. Lee, S.J. Choi, Shrinkage and durability characteristics of eco-friendly fireproof high-strength concrete, *Construction and Building Materials* 40 (2013) 753-762.
179. J.K.W. Wong, H. Li, H. Wang, T. Huang, E. Luo, V. Li, Toward low-carbon construction processes: the visualisation of predicted emission via virtual prototyping technology, *Automation in Construction* 33 (2013) 72-78.
180. Worldwatch Institute, *Vital Signs 2005*, 183. Worldwatch Institute Washington, 2005.
181. WRI, *World Resources 1992-93: A Report by the World Resources Institute*, Oxford University Press, Oxford, 1992.
182. L.L. Wu, X.N. Gao, Y.J. Shi, Y.Q. Wang, Theoretical and Experimental Study on Interactive Local Buckling of Arch-shaped Corrugated Steel Roof, *Steel Structures* 6 (2006) 45-54.
183. L. Xu, Y. Gong, P. Guo, Compressive tests of cold-formed steel curved panels, *Journal of Constructional Steel Research* 57 (2001) 1249-1265.
184. P.L. Yu, A class of solutions for group decision problems, *Management Science* 19 (8) (1973) 936-946.
185. S.J. Yu, P.F. Zhang, X.F. Yang, H. Zhao, X.L. Chen, Refractory performance study on foamed concrete and concrete, *Applied mechanics and materials* 357-360 (2013) 1034-1038.
186. Y. Yu, S.J. Woo, A Study on the Model of a Building-Envelope Structural Modification System to Increase Energy Efficiency at the Schematic Design Stage, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 196 (2013) 189-196.
187. I. Zabalza Bribian, A. Valero Capilla, A. Aranda Uson, Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-

- efficiency improvement potential, *Building and Environment* 46 (2011) 1133-1140.
188. G. Zapata-Poveda, C. Tweed, Official and informal tools to embed performance in the design of low carbon buildings. An ethnographic study in England and Wales, *Automation in Construction* 37 (2014), 38-47
189. E.K. Zavadskas, Z. Turskis, R. Volvaciovas, Multi-criteria Assessment Model of Technologies, *Studies in Informatics and Control* 22 (4) (2013) 249-258.
190. M. Zeleny "Compromise Programming", J.L. Cochrane, M. Zeleny (Eds.), *Multiple Criteria Decision Making*, University of South Carolina, Columbia, 1973.

ANEXOS

ANEXO 1
PUBLICACIÓN

Anexo 1.- Publicación

Durante la realización de esta tesis doctoral, se ha redactado un artículo que fue aceptado el 21 de mayo y publicado el 28 de mayo de 2015 con número DOI 10.3390/su/7066854 en una revista de distribución internacional, Sustainability, con ISSN 2071-1050. Según los datos obtenidos de la editorial el 11 de junio de 2015, las características de la revista son:

Full Journal Title:	Sustainability		
ISO Abbrev. Title:	Sustainability		
JCR Abbrev. Title:	Sustainability-Basel		
ISSN:	2071-1050	Issues / Year:	4
Language:	ENGLISH	Journal Country:	SWITZERLAND
Publisher:	MDPI AG		
Journal Rank in Categories:	For 2013, the journal Sustainability has an Impact Factor of 1.077		

El título de la publicación es “Implementing Sustainability Criteria for Selecting a Roof Assembly Typology in Medium Span Buildings”. Como referencia, se adjuntan la primera página, que contiene el resumen, y la última.

Sustainability **2015**, *7*, 6854–6871; doi:10.3390/su7066854

OPEN ACCESS

sustainability

ISSN 2071-1050

www.mdpi.com/journal/sustainability

Article

Implementing Sustainability Criteria for Selecting a Roof Assembly Typology in Medium Span Buildings

Julian Canto-Perello ¹, Maria P. Martínez-García ², Jorge Curiel-Esparza ^{3,*} and Manuel Martín-Utrillas ³

¹ Department of Construction Engineering and Civil Engineering Projects, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain; E-Mail: jcantope@est.upv.es

² Department of Applied Physics, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain; E-Mail: mamarga5@doctor.upv.es

³ Physical Technologies Center, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain; E-Mail: mgmartin@fis.upv.es

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: jcuriel@fis.upv.es; Tel.: +34-96-3877520; Fax: +34-96-3877529.

Academic Editor: Derek Clements-Croome

Received: 27 March 2015 / Accepted: 21 May 2015 / Published: 28 May 2015

Abstract: Technological advances have allowed the development of new roof assembly typologies with higher efficiency and less waste. However, in the construction sector the focus is generally on reducing cost and not in sustainable development factors. Short-sighted building planning based only on economic criteria should be avoided improving decision support systems. In addition, the selection of an appropriate roof assembly in a building's design stage is a complex problem due to the existence of different tangible and intangible factors and the multiple alternatives available. The roof typologies under study involve prefabricated concrete, steel and laminated wood structures. This research work applies a multi-criteria hybrid model combining the Analytical Hierarchy Process with the Delphi method and the VIKOR technique for implementing sustainability criteria in the selection of a roof assembly in medium span buildings. The proposed decision support system enables the use of the triple bottom line that considers economic, social and environmental criteria. Under the criteria analyzed, the compromise solution found is the self-supporting curved system.

Keywords: roof assembly; triple bottom line; multicriteria decision making

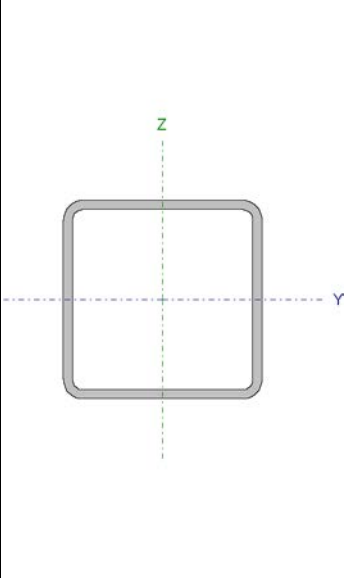
43. Broun, R.; Babaizadeh, H.; Zakersalehi, A.; Menzies, G.F. Integrated Life Cycle Energy and Greenhouse Gas Analysis of Exterior Wall Systems for Residential Buildings. *Sustainability* **2014**, *6*, 8592–8603.
44. Parasonis, J.; Keizikas, A.; Kalibatiene, D. The relationship between the shape of a building and its energy performance. *Archit. Eng. Des. Manag.* **2012**, *8*, 246–256.
45. Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* **2008**, *1*, 83–98.
46. Saaty, T.L.; Ozdemir, M. Why the Magic Number Seven Plus or Minus Two. *Math. Comput. Model.* **2003**, *38*, 233–244.
47. Saaty, T.L. Decision Making for Leaders. In *The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*, 3rd ed.; University of Pittsburgh: Pittsburgh, PA, USA, 2012.
48. Tatham, E.K.; Eisenberg, D.A.; Linkov, I. Sustainable Urban Systems: A Review of How Sustainability Indicators Inform Decisions. In *Sustainable Cities and Military Installations*; Linkov, I., Ed.; Springer: Amsterdam, The Netherlands, 2014.
49. Kuo, Y.; Yang, T.; Huang, G.W. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Comput. Ind. Eng.* **2008**, *55*, 80–93.
50. Opricovic, S.; Tzeng, G.H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur. J. Oper. Res.* **2004**, *156*, 445–455.
51. Curiel-Esparza, J.; Cuenca-Ruiz, M.A.; Martin-Utrillas, M.; Canto-Perello, J. Selecting a Sustainable Disinfection Technique for Wastewater Reuse Projects. *Water* **2014**, *6*, 2732–2747.
52. Sayadi, M.K.; Heydari, M.; Shahanaghi, K. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers. *Appl. Math. Model.* **2009**, *33*, 2257–2262.
53. Opricovic, S.; Tzeng, G.H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *Eur. J. Oper. Res.* **2007**, *178*, 514–529.

© 2015 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ANEXO 2
DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES

Anexo 2.- Dimensionamiento de elementos estructurales

Cordón inferior

Perfil: CDC 80x4 Material: Acero (S275)							
Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas				
Inicial	Final		Área (cm ²)	I _v ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)	
N49	N51	2,833	11,74	110,63	110,63	180,25	
Notas: (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo		Pandeo lateral				
			Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.	
	β	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	L _K	2,833	2,833	2,833	2,833	2,833	
	C _m	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
	C ₁	-		1,000			
Notación: β : Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

Barr a	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)								Estado
	$\bar{\lambda}$	λ_w	N _t	M _y	V _z	M _y V _z	NM _y M _z	NM _y M _z V _y V _z	
N49/ N51	$\bar{\lambda} < 3,0$ Cumple	$\lambda_w \leq \lambda_{w,max}$ Cumple	$\eta = 44,5$	x: 1,417 m $\eta = 2,8$	x: 0 m $\eta = 0,2$	$\eta < 0,1$	x: 1,417 m $\eta = 47,3$	$\eta < 0,1$	CUMPLE $\eta = 47,3$
Notación: $\bar{\lambda}$: Limitación de esbeltez λ_w : Abolladura del alma inducida por el ala comprimida N _t : Resistencia a tracción M _y : Resistencia a flexión eje Y M _z : Resistencia a flexión eje Z V _z : Resistencia a corte Z V _y : Resistencia a corte Y M _y V _z : Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados NM _y M _z : Resistencia a flexión y axil combinados NM _y M _z V _y V _z : Resistencia a flexión, axil y cortante combinados x: Distancia al origen de la barra η : Coeficiente de aprovechamiento (%)									

Limitación de esbeltez (CTE DB SE-A)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras traccionadas debe ser inferior al valor 3,0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \qquad \bar{\lambda} : 1,06 \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 11,74 cm²

f_y: Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

f_y : 275,00 MPa

N_{cr}: Axil crítico de pandeo elástico.

N_{cr} : 285,63 kN

El axil crítico de pandeo elástico **N_{cr}** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

N_{cr,y} : 285,63 kN

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

N_{cr,z} : 285,63 kN

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

N_{cr,T} : 7745 kN

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y: Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

I_y : 110,63 cm⁴

I_z: Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

I_z : 110,63 cm⁴

I_t: Momento de inercia a torsión uniforme.

I_t : 180,25 cm⁴

I_w: Constante de alabeo de la sección.

I_w : 0,00 cm⁶

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

G: Módulo de elasticidad transversal.

G : 81000 MPa

L_{ky}: Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

L_{ky} : 2,833 m

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z. $L_{kz} : 2,833 \text{ m}$
 L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión. $L_{kt} : 2,833 \text{ m}$
 i_o : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión. $i_o : 4,34 \text{ cm}$

$$i_o = (i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2)^{0.5}$$

Siendo:

i_y, i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z. $i_y : 3,07 \text{ cm}$
 $i_z : 3,07 \text{ cm}$
 y_o, z_o : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección. $y_o : 0,00 \text{ mm}$
 $z_o : 0,00 \text{ mm}$

Resistencia a tracción (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1 \quad \eta : 0,445 \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1,35·PP+1,5·Q.

$N_{t,Ed}$: Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo. $N_{t,Ed} : 136,73 \text{ kN}$

La resistencia de cálculo a tracción $N_{t,Rd}$ viene dada por:

$$N_{t,Rd} = A \cdot f_{yd} \quad N_{t,Rd} : 307,43 \text{ kN}$$

Donde:

A : Área bruta de la sección transversal de la barra. $A : 11,74 \text{ cm}^2$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero. $f_{yd} : 261,90 \text{ MPa}$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. $f_y : 275,00 \text{ MPa}$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material. $\gamma_{M0} : 1,05$

Resistencia a flexión eje Y (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta : 0,028$ ✓

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1,417 m del nudo N49, para la combinación de acciones 1,35·PP+1,5·Q.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$M_{Ed}^+ : 0,26 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.417 m del nudo N49, para la combinación de acciones 0,8·PP+1,5·V(0°)H2.

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$M_{Ed}^- : 0,02 \text{ kN}\cdot\text{m}$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$M_{c,Rd} : 9,08 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

Clase : 1

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$W_{pl,y} : 34,69 \text{ cm}^3$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd} : 261,90 \text{ MPa}$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico.

$f_y : 275,00 \text{ MPa}$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0} : 1,05$

Resistencia a corte Z (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta : 0,002$ ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N49, para la combinación de acciones 1,35·PP+1,5·V(0°)H1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed} : 0,19 \text{ kN}$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$V_{c,Rd} : 87,10 \text{ kN}$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$A_v : 5,76 \text{ cm}^2$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d : Altura del alma,

$d : 72,00 \text{ mm}$

t_w : Espesor del alma,

$t_w : 4,00 \text{ mm}$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd} : 261,90 \text{ MPa}$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{MO}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico.

$f_y : 275,00 \text{ MPa}$

γ_{MO} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{MO} : 1,05$

Abolladura por cortante del alma:

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < 70 \cdot \varepsilon \qquad 18,00 < 64,71 \quad \checkmark$$

Donde:

λ_w : Esbeltez del alma. $\lambda_w : 18,00$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$\lambda_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima. $\lambda_{m\acute{a}x} : 64,71$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 70 \cdot \varepsilon$$

ε : Factor de reducción. $\varepsilon : 0,92$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia. $f_{ref} : 235,00 \text{ MPa}$

f_y : Límite elástico. $f_y : 275,00 \text{ MPa}$

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados

No es necesario reducir la resistencia de cculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2} \qquad 0,19 \text{ kN} \leq 43,55 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V(0°)H1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cculo pésimo. $V_{Ed} : 0,19 \text{ kN}$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cculo. $V_{c,Rd} : 87,10 \text{ kN}$

Resistencia a flexión y axil combinados (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1 \quad \eta : 0,473 \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{M_{ef,Ed}}{M_{b,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1 \quad \eta < 0,001 \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 1,417 m del nudo N49, para la combinación de acciones 1,35·PP+1,5·Q.

Donde:

N_{t,Ed} : Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.	N_{t,Ed} : 136,73 kN
M_{y,Ed}, M_{z,Ed} : Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.	M_{y,Ed}⁺ : 0,26 kN·m M_{z,Ed}⁺ : 0,00 kN·m
Clase : Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.	Clase : 1
N_{pl,Rd} : Resistencia a tracción.	N_{pl,Rd} : 307,43 kN
M_{pl,Rd,y}, M_{pl,Rd,z} : Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.	M_{pl,Rd} : 9,08 kN·m M_{pl,Rd} : 9,08 kN·m

Resistencia a pandeo: (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.4.1)

M_{ef,Ed} : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.	M_{ef,Ed} : 0,00 kN·m
---	--------------------------------------

$$M_{ef,Ed} = W_{y,com} \cdot \sigma_{com,Ed}$$

Siendo:

σ_{com,Ed} : Tensión combinada en la fibra extrema comprimida.	σ_{com,E} : 0,00 MPa
---	-------------------------------------

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,com}} - 0,8 \cdot \frac{N_{t,Ed}}{A} < 0 \rightarrow \sigma_{com,Ed} = 0$$

W_{y,com} : Módulo resistente de la sección referido a la fibra extrema comprimida, alrededor del eje Y.	W_{v,co} : 34,69 cm ³
A : Área de la sección bruta.	A : 11,74 cm ²

$M_{b,Rd,y}$: Momento flector resistente de cálculo. $M_{b,Rd} : 8,97 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (CTE DB SE-A)

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones $1,35\cdot PP + 1,5\cdot V(0^\circ)H1$.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0,19 \text{ kN} \leq 43,55 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

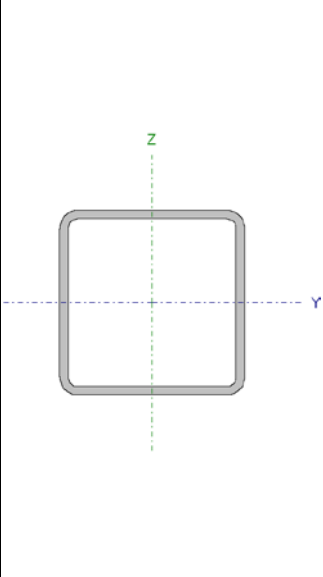
$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : 0,19 \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : 87,10 \text{ kN}$$

Cordón superior

Perfil: CDC 80x4						
Material: Acero (S275)						
		Nudos		Características mecánicas		
		Inicial	Final	Longitud (m)	Área (cm ²)	I _v ⁽¹⁾ (cm ⁴)
N48	N50	2,833	11,74	110,63	110,63	180,25
Notas: (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme						
		Pandeo		Pandeo lateral		
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.	
		β	1,00	1,00	1,00	1,00
		L _K	2,830	2,833	2,830	2,833
		C _m	1,000	1,000	1,000	1,000
C ₁	-		1,000			
Notación: β: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico						

Barra	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)								Estado
	$\bar{\lambda}$	λ_w	N _c	M _Y	V _Z	M _Y V _Z	NM _Y M _Z	NM _Y M _Z V _Y V _Z	
N48/ N50	$\bar{\lambda} < 2,0$ Cumple	$\lambda_w \leq \lambda_{w,máx}$ Cumple	η = 83,7	x: 0 m η = 26,8	x: 0 m η = 6,5	η < 0,1	x: 2,833 m η = 99,9	η < 0,1	CUMPLE η = 99,9
Notación: $\bar{\lambda}$: Limitación de esbeltez λ_w : Abolladura del alma inducida por el ala comprimida N _c : Resistencia a compresión M _Y : Resistencia a flexión eje Y M _Z : Resistencia a flexión eje Z V _Z : Resistencia a corte Z V _Y : Resistencia a corte Y M _Y V _Z : Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados NM _Y M _Z : Resistencia a flexión y axil combinados NM _Y M _Z V _Y V _Z : Resistencia a flexión, axil y cortante combinados x: Distancia al origen de la barra η: Coeficiente de aprovechamiento (%)									

Limitación de esbeltez (CTE DB SE-A)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2,0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \qquad \bar{\lambda} : \quad 1,06 \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección. **Clase :** 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A :** 11,74 cm²

f_y: Límite elástico. **f_y :** 275,00 MPa

N_{cr}: Axil crítico de pandeo elástico. **N_{cr} :** 285,63 kN

El axil crítico de pandeo elástico **N_{cr}** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y. **N_{cr,y} :** 285,63 kN

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z. **N_{cr,z} :** 286,30 kN

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión. **N_{cr,T} :** 77455,7 kN

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y: Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y. **I_y :** 110,63 cm⁴

I_z: Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z. **I_z :** 110,63 cm⁴

I_t: Momento de inercia a torsión uniforme. **I_t :** 180,25 cm⁴

I_w: Constante de alabeo de la sección. **I_w :** 0,00 cm⁶

E: Módulo de elasticidad. **E :** 210000 MPa

ANEXO 2.- DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

G : Módulo de elasticidad transversal.	G : 81000 MPa
L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.	L_{ky} : 2,833 m
L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.	L_{kz} : 2,830 m
L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.	L_{kt} : 2,833 m
i_o : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.	i_o : 4,34 cm
$i_o = (i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2)^{0.5}$	
Siendo:	
i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.	i_y : 3,07 cm
y_o , z_o : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.	i_z : 3,07 cm
	y_o : 0,00 mm
	z_o : 0,00 mm

Resistencia a compresión (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \quad \eta : 0,422 \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad \eta : 0,837 \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1,35·PP+1,5·Q.

N_{c,Ed}: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo. **N_{c,Ed}** : 129,67 kN

La resistencia de cálculo a compresión **N_{c,Rd}** viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd} \quad N_{c,Rd} : 307,43 \text{ kN}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la **Clase** : 1

capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : 11,74 \text{ cm}^2$$

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : 261,90 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico.

$$f_y : 275,00 \text{ MPa}$$

γ_{M0}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : 1,05$$

Resistencia a pandeo:

La resistencia de cálculo a pandeo **N_{b,Rd}** en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : 155,02 \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : 11,74 \text{ cm}^2$$

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : 261,90 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico.

$$f_y : 275,00 \text{ MPa}$$

γ_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : 1,05$$

χ: Coeficiente de reducción por pandeo.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - (\bar{\lambda})^2}} \leq 1$$

$$\chi_y : 0,50$$

$$\chi_z : 0,50$$

$$\chi_T : 1,00$$

Siendo:

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$\phi_y : 1,28$$

$$\phi_z : 1,27$$

$$\phi_T : 0,47$$

α: Coeficiente de imperfección elástica.

$$\alpha_y : 0,49$$

$$\alpha_z : 0,49$$

$$\alpha_T : 0,49$$

λ̄: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : 1,06$$

$$\bar{\lambda}_z : 1,06$$

$$\bar{\lambda}_T : 0,06$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : 285,63 \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : 285,63 \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : 286,30 \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : 77455 \text{ kN}$$

Resistencia a flexión eje Y (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : 0,268 \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N48, para la combinación de acciones 1,35·PP+1,5·V(0°)H1.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : 2,43 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N48, para la combinación de acciones 0,8·PP+0,9·V(180°)H1+1,5·N(EI).

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : 1,66 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : 9,08 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : 1$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico

$$W_{pl,y} : 34,69 \text{ cm}^3$$

correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero. $f_{yd} : 261,90$ MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{MO}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. $f_y : 275,00$ MPa

γ_{MO} : Coeficiente parcial de seguridad del material. $\gamma_{MO} : 1,05$

Resistencia a corte Z (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1 \quad \eta : 0,065 \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N48, para la combinación de acciones 0,8·PP+1,5·V(0°)H1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo. $V_{Ed} : 5,69$ kN

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad V_{c,Rd} : 87,10 \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante. $A_v : 5,76$ cm²

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d : Altura del alma. $d : 72,00$ mm

t_w : Espesor del alma. $t_w : 4,00$ mm

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero. $f_{yd} : 261,90$ MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{MO}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. $f_y : 275,00$ MPa

γ_{MO} : Coeficiente parcial de seguridad del material. $\gamma_{MO} : 1,05$

Abolladura por cortante del alma:

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < 70 \cdot \varepsilon \qquad 18,00 < 64,71 \quad \checkmark$$

Donde:

λ_w : Esbeltez del alma. λ_w : 18,00

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$\lambda_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima. $\lambda_{m\acute{a}x}$: 64,71

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 70 \cdot \varepsilon$$

ε : Factor de reducción. ε : 0,92

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia. f_{ref} : 235,00 MPa

f_y : Límite elástico. f_y : 275,00 MPa

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2} \qquad 5,69 \text{ kN} \leq 43,55 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones $0,8 \cdot PP + 1,5 \cdot V(0^\circ)H1$.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo. V_{Ed} : 5,69 kN

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo. $V_{c,Rd}$: 87,10 kN

Resistencia a flexión y axil combinados (CTE DB SE-A)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1 \quad \eta : 0,538 \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \eta : 0,999 \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \eta : 0,894 \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N50, para la combinación de acciones 1,35·PP+0,9·V(270°)H1+1,5·N(EI).

Donde:

N_{c,Ed}: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

N_{c,Ed} : 113,44 kN

M_{y,Ed}, M_{z,Ed}: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

M_{y,Ed} : 1,51 kN·m

M_{z,Ed} : 0,03 kN·m

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

Clase : 1

N_{pl,Rd}: Resistencia a compresión de la sección bruta.

N_{pl,Rd} : 307,43 kN

M_{pl,Rd,y}, M_{pl,Rd,z}: Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.

M_{pl,Rd,y} : 9,08 kN·m

M_{pl,Rd,z} : 9,08 kN·m

Resistencia a pandeo:

A: Área de la sección bruta.

A : 11,74 cm²

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

W_{pl,y} : 34,69 cm³

W_{pl,z} : 34,69 cm³

f_{vd}: Resistencia de cálculo del acero.

f_{vd} : 261,90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico.

f_y : 275,00 MPa

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.	$\gamma_{M1} : 1,05$
k_y, k_z : Coeficientes de interacción.	
$k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}}$	$k_y : 1,59$
$k_z = 1 + (\bar{\lambda}_z - 0.2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}}$	$k_z : 1,58$
$C_{m,y}, C_{m,z}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.	$C_{m,y} : 1,00$ $C_{m,z} : 1,00$
χ_y, χ_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.	$\chi_y : 0,50$ $\chi_z : 0,50$
$\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z$: Esbelteces reducidas con valores no mayores que 1,00, en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.	$\bar{\lambda}_y : 1,06$ $\bar{\lambda}_z : 1,06$
α_y, α_z : Factores dependientes de la clase de la sección.	$\alpha_y : 0,60$ $\alpha_z : 0,60$

Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (CTE DB SE)

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones $0,8 \cdot PP + 1,5 \cdot V(0^\circ)H1$.

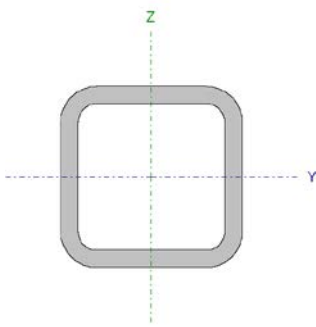
$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2} \quad 5,69 \text{ kN} \leq 43,55 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo. $V_{Ed,z} : 5,69 \text{ kN}$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo. $V_{c,Rd,z} : 87,10 \text{ kN}$

Diagonales

Perfil: CDC 40x4 Material: Acero (S275)						
	Nodos		Longitud (m)	Características mecánicas		
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)
	N44	N46	1,992	5,34	10,92	19,31
Notas: (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme						
		Pandeo				
		Plano XY	Plano XZ			
β		0,75	0,75			
L _K		1,494	1,494			
C _m		1,000	1,000			
C ₁		-				
Notación: β: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico						

Barra	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)				Estado
	$\bar{\lambda}$	λ_w	N _c	M _y	
N44/N46	$\bar{\lambda} < 2,0$ Cumple	x: 0,199 m $\lambda_w \leq \lambda_{w,m\acute{a}x}$	x: 0 m $\eta = 88,5$	x: 0,996 m $\eta = 1,0$	CUMPLE η = 90,0
Notación: $\bar{\lambda}$: Limitación de esbeltez λ_w : Abolladura del alma inducida por el ala comprimida N _c : Resistencia a compresión x: Distancia al origen de la barra η: Coeficiente de aprovechamiento (%)					

Limitación de esbeltez (CTE DB SE-A)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$\bar{\lambda}$: 1,20 ✓

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5,34 cm²

f_y: Límite elástico.

f_y : 275,00 MPa

N_{cr}: Axil crítico de pandeo elástico.

N_{cr} : 101,42 kN

El axil crítico de pandeo elástico **N_{cr}** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

N_{cr,y} : 101,42 kN

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

N_{cr,z} : 101,42 kN

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

N_{cr,T} : 382437 kN

$$N_{cr,T} = \frac{1}{I_p^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y: Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

I_y : 10,92 cm⁴

I_z: Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

I_z : 10,92 cm⁴

I_t: Momento de inercia a torsión uniforme.

I_t : 19,31 cm⁴

I_w: Constante de alabeo de la sección.

I_w : 0,00 cm⁶

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

G: Módulo de elasticidad transversal.

G : 81000 MPa

L_{ky}: Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

L_{ky} : 1,494 m

L_{kz}: Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

L_{kz} : 1,494 m

L_{kt}: Longitud efectiva de pandeo por torsión.

L_{kt} : 1,992 m

ANEXO 2.- DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

i_o : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

i_o : 2,02 cm

$$i_o = (i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

i_y : 1,43 cm

i_z : 1,43 cm

y_o , z_o : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

y_o : 0,00 mm

z_o : 0,00 mm

Resistencia a compresión (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

η : 0.382 ✓

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

η : 0.885 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N44, para la combinación de acciones 1,35·PP+1,5·Q.

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 53,46 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 139,81 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5,34 cm²

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261,90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. **f_y** : 275,00 MPa
γ_{M0}: Coeficiente parcial de seguridad del material. **γ_{M0}** : 1,05

Resistencia a pandeo: (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.2)

La resistencia de cálculo a pandeo **N_{b,Rd}** en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} \qquad N_{b,Rd} : 60,44 \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A** : 5,34 cm²

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero. **f_{yd}** : 261,90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. **f_y** : 275,00 MPa
γ_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material. **γ_{M1}** : 1,05

χ: Coeficiente de reducción por pandeo.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - (\bar{\lambda})^2}} \leq 1 \qquad \chi_y : 0,43$$

$$\chi_z : 0,43$$

$$\chi_T : 1,00$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right] \qquad \phi_y : 1,47$$

$$\phi_z : 1,47$$

$$\phi_T : 0,47$$

α: Coeficiente de imperfección elástica. **α_y** : 0,49
α_z : 0,49
α_T : 0,49

λ̄: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \qquad \bar{\lambda}_y : 1,20$$

$$\bar{\lambda}_z : 1,20$$

$$\bar{\lambda}_T : 0,06$$

N_{cr}: Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : 101,42 \text{ kN}$$

N_{cr,y}: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : 101,42 \text{ kN}$$

ANEXO 2.- DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo
por flexión respecto al eje Z.

$N_{cr,z}$: 101,42 kN

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo
por torsión.

$N_{cr,T}$: 38243 kN