

Diseño estructural y parametrización de cubiertas modulares de madera de grandes luces

Structural design and parameterization of modular long span wooden roofs

Carlos Llopis Camps^{*, a} y Santiago Ferri Mateu^b

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería (Valencia, España). Ingeniero Responsable de Disciplina.

E-mail: carlos.llopis@sener.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería (Valencia, España). Ingeniero de Proyecto.

E-mail: santiago.ferri@sener.es

RESUMEN

SENER Ingeniería está desarrollando el diseño estructural y parametrización de cubiertas modulares de madera de grandes luces. El desarrollo consiste en el análisis de las tipologías estructurales que permitan diseñar cubiertas de grandes luces mediante estructura de madera. Para cada una de las tipologías se definen los parámetros, y su ámbito de validez, que permiten diseñar múltiples soluciones para una misma tipología obteniendo de esta forma estructuras modulares. El diseño se completa con la implementación de una aplicación de *software* que permite la interoperabilidad entre el *software* de diseño geométrico y el de análisis estructural, industrializando de esta forma todo el proceso.

ABSTRACT

SENER Ingeniería is developing the structural design and parameterization of modular long span wooden roofs. The development consists in the analysis of the structural typologies that allow the design of long span roofs with a wooden structure. For each of the typologies, the parameters and their validity range are defined, which allow design multiple solutions for the same typology obtaining modular structures. The design is completed with the implementation of a software application that allows interoperability between geometric design software and structural analysis software, thus industrializing the entire process.

PALABRAS CLAVE: madera, parametrización, cubiertas, grandes luces, estructuras modulares.

KEYWORDS: wood, parameterization, roofs, long span, modular structures.

1. Introducción. Motivaciones

1.1 Estructuras modulares

SENER Ingeniería está en proceso de desarrollo de soluciones modulares que puedan ser incorporadas como parte de los proyectos de ingeniería civil en los que la empresa está involucrada desde la fase de diseño. El objetivo de las soluciones modulares es proporcionar

productos de ingeniería civil más económicos, eficientes y sostenibles pero que, a su vez, permita la personalización de la solución proporcionando una imagen atractiva y responda a las necesidades concretas del proyecto/cliente.

En el marco de este desarrollo, que involucra el trabajo de múltiples disciplinas, el reto de la disciplina de estructuras es proporcionar una solución para cubiertas de grandes luces con los siguientes objetivos:

- Modulable. Posibilidad de configurar múltiples soluciones como combinación de un número determinado de módulos.
- Singular. Cada solución debe poder ser personalizada y diferenciada de otras soluciones, pero todas pertenecientes a un mismo conjunto.
- Estandarizada. Los elementos que componen los módulos de las soluciones deben ser estándar o delimitados en cuanto a tipologías y geometrías.
- Facilidad de montaje. El método de unión de módulos debe ser sencillo y práctico minimizando la necesidad de maquinaria, procedimientos auxiliares o personal altamente cualificado.
- Transportable. Los módulos, por su forma y dimensiones, puedan ser fabricados en cualquier lugar y fácilmente transportados en contenedores.

1.2 Madera como material estructural

Ante el inminente calentamiento global, el sector de la construcción debe hacer frente a sus altas emisiones de CO₂ en los procesos constructivos y promover el desarrollo sostenible.

En este sentido, a partir del año 2020, todos los edificios de viviendas construidos en Europa deberán tener un consumo energético casi nulo, según se establece en la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios (EPBD) [1]. Con esto se pretende reducir las emisiones de CO₂ y la huella de carbono.

La madera tiene un gran potencial como material estructural porque es resistente, ligero y renovable. Además, es un material sostenible respetuoso con el medio ambiente ya que para su fabricación se requiere la plantación de árboles y puede ser utilizado en edificios modulares.

Por tanto, con el objetivo de desarrollar soluciones tecnológicas novedosas, se apuesta por la madera como material estructural en beneficio de la sostenibilidad energética y defensa del medio ambiente, en relación a la utilización de otros materiales estructurales convencionales como el acero y el hormigón.

1.3 Industrialización del proceso

Analizando los objetivos del desarrollo modular, surge la necesidad de industrializar al máximo los procesos del desarrollo.

Por un lado, queda implícito en los objetivos la necesidad de que las soluciones sean estructuras con un procedimiento constructivo industrializable. Deben ser soluciones compuestas por elementos estandarizados, con uniones tipo estándar y fácilmente ejecutables, que se puedan formar módulos cuya repetición y combinación permita obtener cubiertas de grandes luces y cuya fabricación y transporte puedan realizarse desde cualquier lugar del mundo.

No obstante, no solo se trata de la industrialización del proceso constructivo, sino que también se pretende industrializar el proceso de diseño, análisis y cálculo de las soluciones. Para ello, se requiere acotar las soluciones tipológicas para las cubiertas de grandes luces, establecer parámetros de personalización y determinar su rango de validez para cumplir con los requerimientos de seguridad, funcionalidad y durabilidad de las estructuras.

Para lograrlo, se idea un flujo de trabajo que facilite el proceso de diseño, desde la definición geométrica hasta la generación de un modelo analítico estructural mediante una aplicación de *software* que permita lograr la interoperabilidad y automatizar los procesos en la fase de diseño (Figura 1).

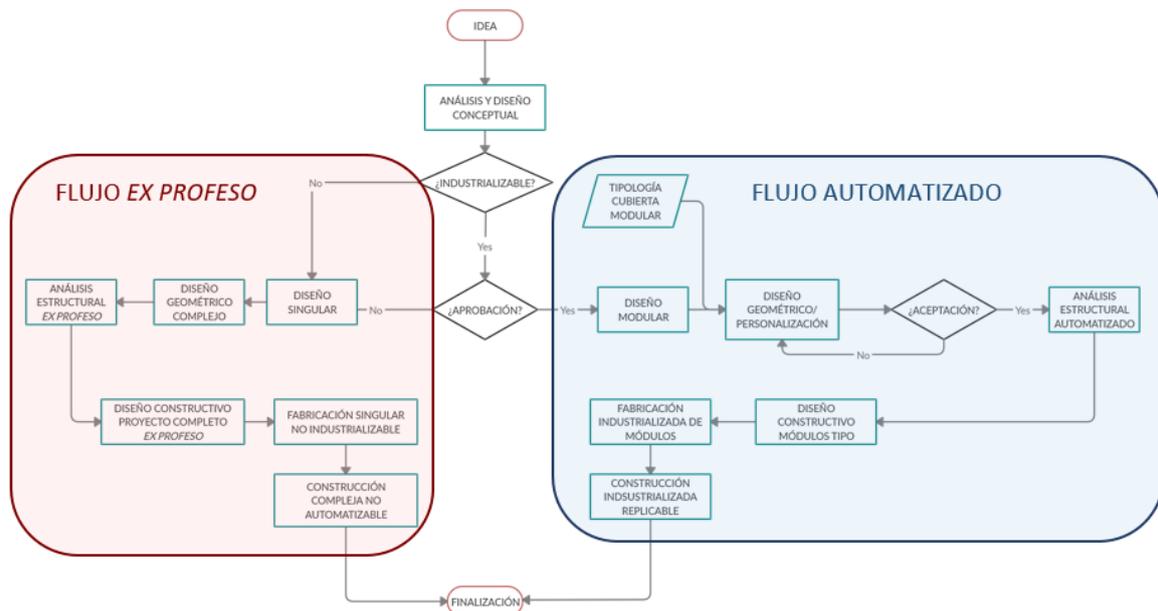


Figura 1. Diagrama de flujo de diseño automatizado vs flujo *ex profeso*. Fuente: SENER Ingeniería

2. Análisis y definición de tipologías estructurales

2.1 Condiciones de contorno del diseño

El desarrollo de las soluciones estructurales para las cubiertas de gran luz tiene las condiciones de diseño que se explican a continuación.

Por requerimientos funcionales y de coordinación con otras disciplinas, la estructura de la cubierta solo puede disponer de apoyos en el plano central de la dirección principal de la cubierta (Figura 2). De esta forma se proporcionan grandes vestíbulos diáfanos sin apenas apoyos en la superficie, como ocurre en las actuales terminales de transporte [2].

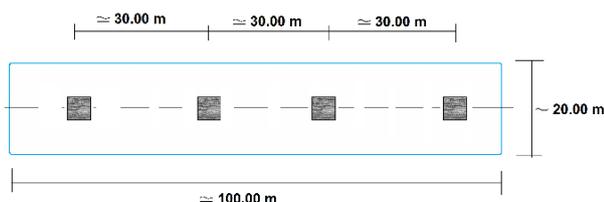


Figura 2. Planta esquemática de la superficie a cubrir por la cubierta. Fuente: SENER Ingeniería

De igual modo, sobre este plano central se ubicarán los puntos de apoyo o soporte de la cubierta espaciados, aproximadamente, cada 30 metros. No obstante, los puntos de apoyo pueden no ser equidistantes entre sí y presentar ligeras diferencias entre apoyos con distancias no menores a unos 20 metros. Además, todos los puntos de apoyo estarán dispuestos en el interior de la superficie a cubrir y no se podrá disponer de sustentación en los extremos o en el perímetro.

Por lo que respecta a los laterales, podría ser necesario la instalación de una estructura en los lados principales de la cubierta a modo de cerramiento vertical. Este cerramiento podría

formar parte de la propia cubierta o instalarse como una estructura adicional unida a la cubierta.

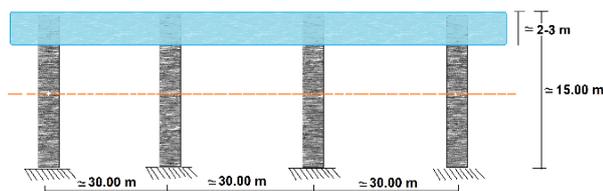


Figura 3. Alzado esquemático de la cubierta.

Fuente: SENER Ingeniería

Por lo que respecta a las restricciones geométricas, se permite la variabilidad de parámetros tales como anchura, altura de la cubierta en el plano central o altura de la cubierta en los extremos laterales dando como resultados superficies de cubierta planas, curvas, superficies regladas, asimétricas o simétricas.

2.2 Sistemas estructurales desarrollados

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno especificadas en el apartado anterior y los objetivos del desarrollo, se plantean tres tipologías de cubiertas de grandes luces susceptibles de ser desarrolladas como soluciones modulares.

En primer lugar, el sistema de núcleo central. Esta solución consiste en un núcleo o viga central de gran rigidez, el cual distribuye la carga sobre los puntos de apoyo. La transmisión de cargas hasta el elemento principal central se realiza por la flexión de vigas transversales que transmiten la carga al núcleo central. Dicho núcleo central debe ser un elemento con gran rigidez torsional o, alternativamente, puede

disponerse dos elementos longitudinales paralelos conectados por un cordón traccionado y otro de compresión.

En segunda instancia, se desarrolla la solución monocapa o sistema lámina (*gridshell*). Esta tipología consiste en una superficie de doble curvatura constituida por una rejilla bidireccional con elementos rectos que se adaptan a la curvatura. Estas estructuras en forma de membrana reticulada resisten por su forma debido a la combinación del efecto arco y efecto cable, según la curvatura, trabajando los elementos a esfuerzos axiales de compresión o tracción. Para el correcto diseño de las mallas reticuladas, deben estar rígidamente apoyadas en todo el perímetro, por lo que se dispone un borde tubular de gran rigidez que se sustenta sobre los puntos de apoyo de la cubierta.

Finalmente, la tercera tipología de cubierta se corresponde con el sistema formado por paraboloides hiperbólicos reticulados, en forma de “paraguas”, siguiendo como referencia los “paraguas” de Félix Candela, la estructura modular de la estación de alta velocidad de Valencia [2] o sala hipóstila de la estación de Atocha en Madrid [3]. Estas mallas son elementos rectos que transmiten los esfuerzos hacia los bordes de los módulos, que son de mayor rigidez, y estos canalizan los esfuerzos hacia las columnas de soporte de la cubierta. En este caso la estructura trabaja, fundamentalmente, a esfuerzos axiales de tracción y compresión distribuyendo las cargas desde los elementos rectos de la superficie reglada hacia los bordes. En cuanto al modo de comportamiento estructural, los bordes del perímetro exterior trabajan a tracción mientras que, los bordes interiores hacia las columnas, trabajan a compresión.

2.3 Análisis de los módulos estructurales

Una vez definidas los tres sistemas tipo para las cubiertas de gran luz, se detallan los módulos para cada tipología.

El módulo para la tipología de núcleo central consiste en un tramo recto del núcleo central, formado por una viga central cerrada o por dos vigas centrales con cordones de tracción y compresión, dos vigas transversales y un tramo recto de dos elementos de borde o vigas de cierre de la cubierta (Figura 4). El ensamble de los elementos entre sí se realiza mediante uniones atornilladas prediseñadas de acero.

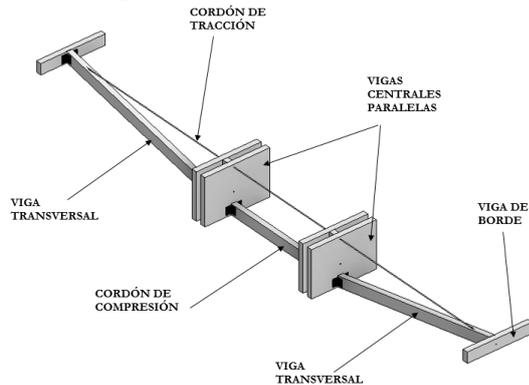


Figura 4. Módulo tipo del sistema estructural de núcleo central. Fuente: SENER Ingeniería.

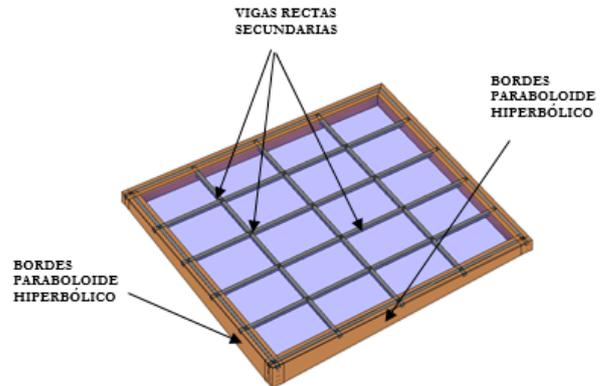


Figura 6. Módulo tipo del sistema de paraboloides hiperbólicos. Fuente: SENER Ingeniería.

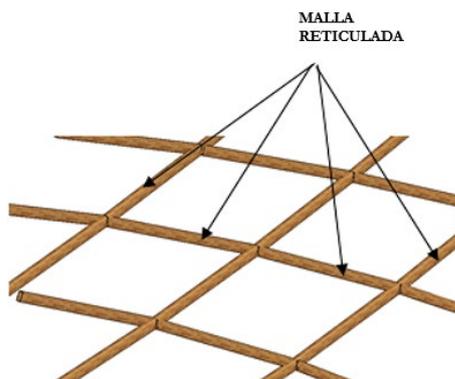


Figura 5. Módulo tipo del sistema lámina. Fuente: SENER Ingeniería.

3.1 Diseño geométrico parametrizado

La parametrización de cubiertas de grandes luces se desarrolla fundamentalmente en la fase de diseño geométrico. El objetivo es automatizar la creación de una superficies paramétricas que definan la geometría en base a la cual se realiza el diseño estructural.

Para llevar a cabo esta fase, se ha empleado un *software* integrado en un entorno BIM que permite modelar tanto la fase de diseño y personalización geométrica como el modelo de la propia estructura. En este desarrollo se ha empleado el *software* Autodesk Revit.

Para cada una de las tres tipologías desarrolladas, se han generado sendas familias de superficies paramétricas basadas en puntos adaptativos. La unión de los puntos adaptativos genera las directrices y contornos adaptativos de la superficie personalizable. La posición de los puntos está referenciada a los parámetros geométricos de las cubiertas.

No obstante, cada una de las tipologías presenta un número diferente de puntos adaptativos y, en consecuencia, diferentes parámetros geométricos (Figuras 7, 8 y 9). De este modo, a mayor número de puntos adaptativos se requiere un mayor número de parámetros para definir la geometría de las cubiertas, pero, a su vez, permite mayor versatilidad y personalización.

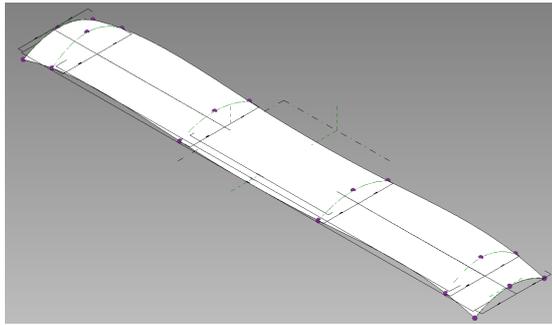


Figura 7. Superficie paramétrica de la tipología de núcleo central. Fuente: SENER Ingeniería.

Para la primera tipología, con 3 puntos adaptativos por alineación, se parametrizan los parámetros de anchura en cada punto de apoyo, así como en los extremos (Figura 7). En cuanto a las cotas, se establecen como parámetros la cota relativa de los puntos laterales con respecto al plano central.

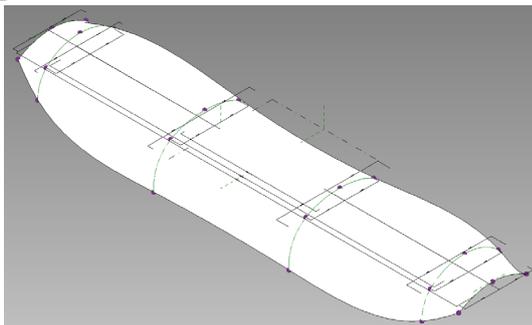


Figura 8. Superficie paramétrica del sistema lámina. Fuente: SENER Ingeniería.

Finalmente, la familia de superficie paramétrica desarrollada para la tipología de paraboloides hiperbólicos presenta mayores diferencias con respecto a los otros dos casos. En este caso, para poder definir cada uno de las superficies regladas que conforman la cubierta es necesario definir las cotas relativas entre los puntos situados en las esquinas de los módulos y los situados en la alineación central. De este modo, son necesarios puntos adaptativos por cada uno de los vértices de los módulos (Figura 9).

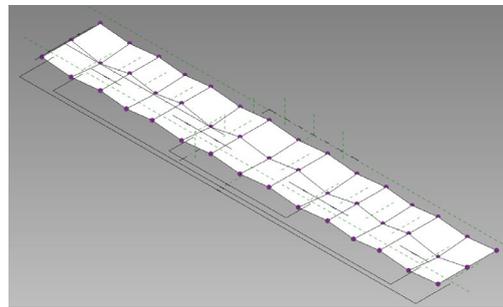


Figura 9. Superficie paramétrica correspondiente al sistema de paraboloides. Fuente: SENER Ingeniería

Definidas las superficies paramétricas, el modelado de los elementos estructurales de las cubiertas es sencillo a partir de la repetición y combinación de los módulos descritos anteriormente. A continuación, se pueden observar los modelos obtenidos de algunas soluciones para las tres tipologías (Figura 10).

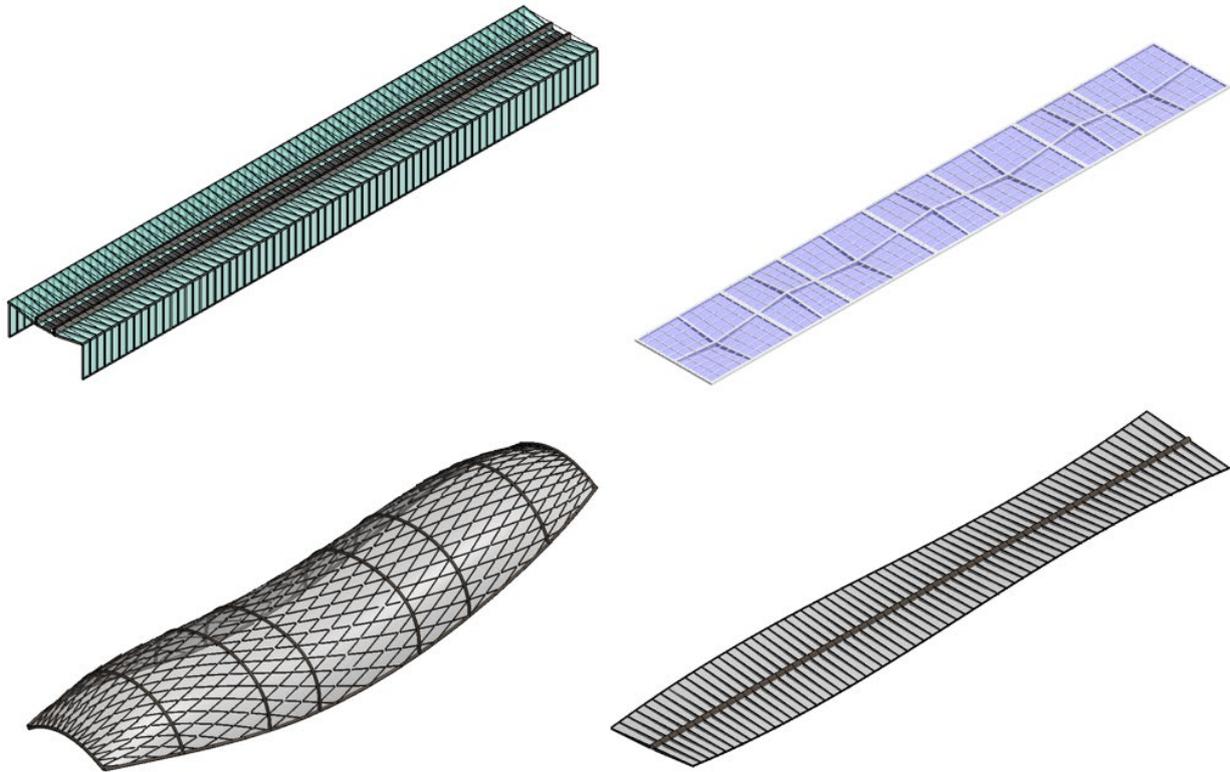


Figura 10. Ejemplos de modelos de cubiertas de grandes luces paramétricas. Fuente: SENER Ingeniería.

3.2 Interoperabilidad y diseño estructural

Para el diseño estructural, se utiliza el *software* de análisis basado en elementos finitos (FEM) SAP2000. Por tanto, se ha desarrollado internamente una aplicación que exporta los datos del modelo de Autodesk Revit y genera un modelo de cálculo en SAP2000. Esta aplicación de *software* se ha programado usando el *plug-in* gratuito de Dynamo para Revit.

El proceso de interoperabilidad entre el programa de diseño geométrico y el programa de análisis estructural se basa en el modelo analítico generado por Autodesk Revit (Figura 11).

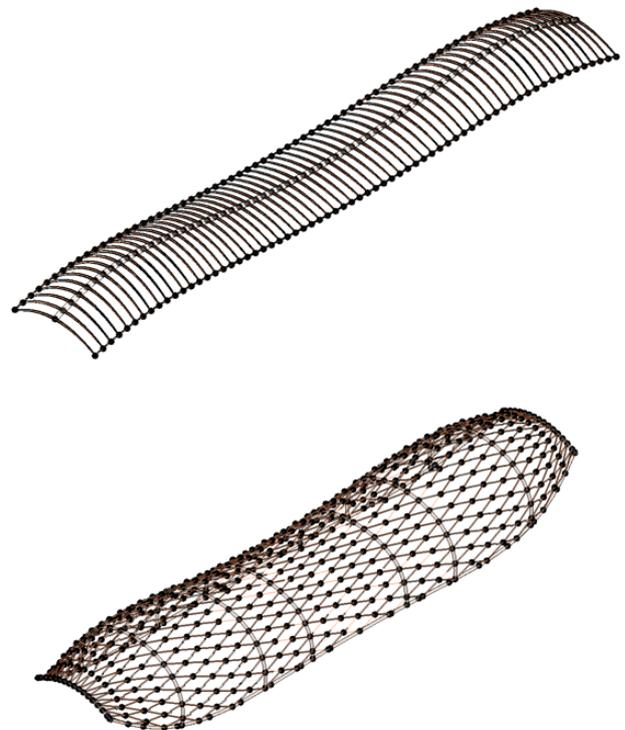


Figura 11. Modelos analíticos de Autodesk Revit. Fuente: SENER Ingeniería.

Los datos del modelo analítico que se extraen de Revit son: rejillas y sistema de coordenadas, nodos, vigas/columnas analíticas, condiciones de contorno, propiedades de materiales, secciones paramétricas y sus propiedades, cargas aplicadas, casos de carga y combinaciones. Este conjunto de información es suficientemente amplio como para poder generar un modelo de cálculo estructural en un *software* específico.

Esta información se organiza en parámetros de cada una de las familias paramétricas desarrolladas *ex profeso* para preparar el modelo y que la herramienta de interoperabilidad sea efectiva.

La programación en Dynamo consta, esencialmente, de 5 fases. Obsérvese un fragmento de dicha programación visual en la Figura 12.

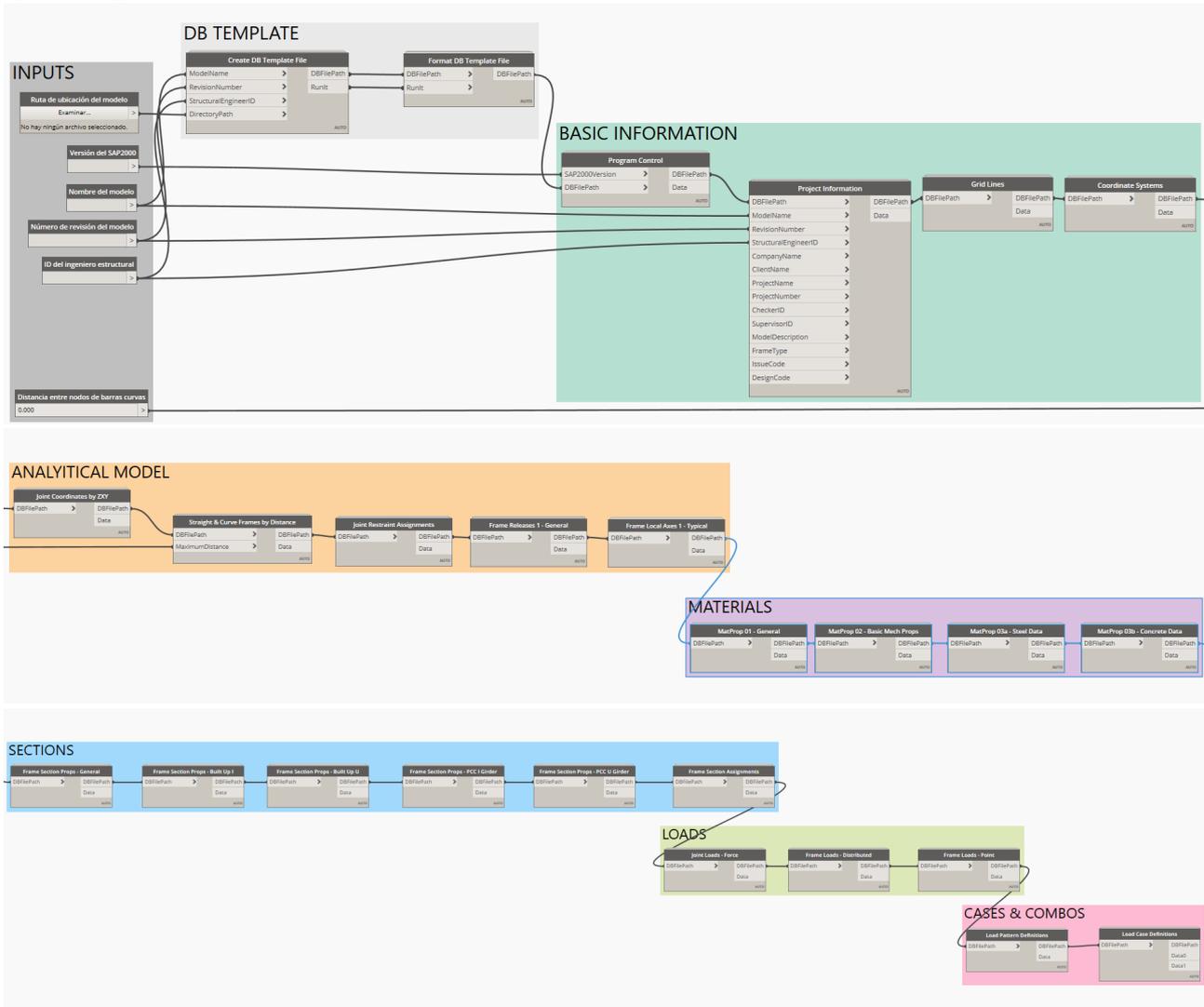


Figura 12. Fragmento de la programación visual mediante Dynamo. Fuente: SENER Ingeniería.

La programación en Dynamo se compone de:

- Definición/Actualización. Una vez filtrada, se definen y/o actualizan los valores de los parámetros filtrados que se pretenden exportar al modelo de cálculo.
- Organización. Una vez la información necesaria está correctamente definida, es necesario realizar un tratamiento de datos para organizarlos y adecuarlos al método de exportación.
- Exportación. La exportación se realiza mediante el volcado de la información a un archivo de datos tabulados tipo Microsoft Excel. Se genera un archivo de datos organizado por tablas de información que es compatible con el software de cálculo.

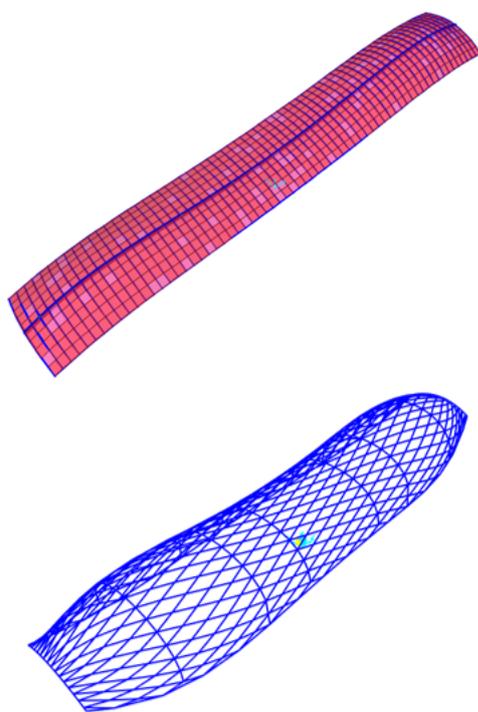


Figura 13. Modelos estructurales de SAP2000.

Fuente: SENER Ingeniería.

El resultado de la programación de la interoperabilidad es un archivo de Excel a modo de base de datos de información. La información está distribuida en distintas Hojas con nombres y formatos específicos de modo que el SAP2000 pueda leer e interpretar la información correctamente distribuida en tablas y generar un modelo estructural de forma automática a partir del modelo paramétrico de la estructura de cubierta.

Finalmente, el último estadio del desarrollo es el diseño estructural, el cual se realiza empleando los modelos generados por la importación de las bases de datos en Excel (Figura 13).

4. Reflexiones y conclusiones

El desarrollo de parametrización de cubiertas de grandes luces ha implicado, en primer lugar, un análisis del flujo de trabajo habitual para el diseño de estructuras. Con el análisis preliminar, se han detectado puntos débiles y aspectos mejorables, así como fortalezas y mejoras potenciales que supongan un aumento de la automatización y la eficiencia en el diseño.

Como consecuencia, se ha enfocado el desarrollo a la automatización e industrialización de la fase de diseño. En esta línea, se ha desarrollado una herramienta interna de interoperabilidad que permite acelerar los flujos de trabajo y reducir los tiempos de generación de modelos estructurales.

Además, esta metodología puede hacerse extensiva a otro tipo de estructuras habituales de ingeniería civil, no quedando limitada al diseño de cubiertas de grandes luces.

Otro aspecto destacable del desarrollo es el diseño de estructuras con un material, actualmente no convencional, como la madera apostando por la innovación y la sostenibilidad en la construcción de estructuras.

Finalmente, la posibilidad de integrar el diseño estructural en un proceso multidisciplinar enriquece enormemente la capacidad de integración del diseño final teniendo en cuenta los requerimientos de otras disciplinas relacionadas con la estructura en cuestión y mejorando la coordinación tanto en la fase de diseño como en la fase de ejecución.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiéramos dar nuestro agradecimiento al Comité de Evaluación de Desarrollos de SENER por la aprobación de esta propuesta y haber hecho posible desarrollar los objetivos propuestos.

Además, también queremos dar las gracias a nuestro compañero Juan Francisco Paz por liderar los trabajos de desarrollo interno.

Referencias

- [1] Unión Europea. Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, que modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética.
- [2] J. Bernabeu Larena, A. Martín Colecha, Estructura modular de la estación Valencia Alta Velocidad, Hormigón y Acero. Volumen 61, nº 258 (2010) 43–52.
- [3] R. Moneo, Estación de Atocha-Largo Recorrido, Madrid, Revista de Obras Públicas. Volumen 139, nº 3316 (1992) 90-91.