



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Integración arquitectónica de algunas energías renovables. Impacto estructural

Autor: Margarita Arroba Fernández

Institución: IE Universidad
E-mail: margarita.arroba@ie.edu

Otros autores: Mencías Carrizosa, D



RESUMEN:

Dada la actual escasez energética y los problemas medioambientales que el uso de combustibles fósiles está causando, desde hace años se está intentando fomentar el uso de energías alternativas, renovables y poco contaminantes. De todas estas energías, el actual Código Técnico de la Edificación ha incorporado la obligatoriedad de incorporar en los edificios paneles solares de tipo térmico para la producción de agua caliente sanitaria y, en los edificios de alto consumo eléctrico, paneles solares de tipo fotovoltaico. La otra energía se tipo renovable que es posible que acabe siendo incorporada de forma masiva a los edificios –aunque no se prevé que sea en los próximos años– es la que nos proporcionarán las denominadas 'pilas de hidrógeno' o 'pilas de combustible'. Los paneles solares (tanto térmicos como fotovoltaicos), debidos tanto a su forma de instalación como a sus propias características presentan una serie de impactos estructurales sobre los apoyos, ocasionados no sólo por su peso propio sino por la resistencia que oponen a la fuerza del viento. Las correspondientes solicitudes ocasionan una reducción de los coeficientes de seguridad considerados en el cálculo inicial sobre estructuras existentes, así como deterioros de los materiales de construcción e inicio de los procesos patológicos derivados, tanto a nivel local (unión subestructura soporte–elementos de cubrición), como a nivel global de la estructura. Por otra parte, en el caso de las pilas de hidrógeno, aunque lo ideal para el uso general de esta tecnología sería el suministro canalizado de hidrógeno a los inmuebles en que se instalaran pilas de combustible, al menos inicialmente, esta solución no será viable, dada la importante infraestructura urbana que esta canalización supondría en una ciudad. Por ello, lo más probable será que inicialmente, las pilas de combustible que se implanten en los edificios dependan de la acumulación de hidrógeno 'in situ', que podrá realizarse en forma líquida en depósitos de sobrepresión o criogénicos. Ambos supondrán impactos estructurales en los edificios, por su peso y porque pueden ocasionar explosiones que lleguen a colapsar la estructura de los mismos, pero en el segundo de los tipos de depósito, aún más importante podrá ser la forma en que una fuga de hidrógeno a muy baja temperatura afectará a las estructuras existentes a las que alcance. La comunicación propuesta aborda el impacto de estos elementos colocados sobre estructuras existentes.

INTRODUCCIÓN

Los expertos internacionales en aspectos energéticos llevan ya un tiempo considerable, advirtiendo que, salvo que se produzcan nuevos hallazgos, las reservas mundiales de combustibles sólidos se agotarán dentro del presente siglo.

Las diversas naciones del mundo, conscientes de la gravedad de la situación y sintiéndose garantes de la conservación del planeta para las generaciones venideras, están realizando un esfuerzo para reducir estas agresiones; esfuerzo que se traduce en acuerdos como el recientemente ratificado Protocolo de Kioto y los sucesivos compromisos que dichas naciones han ido firmando. En el marco de la Unión Europea se han realizado diversos esfuerzos para concretar en medidas reales estos compromisos internacionales.

Una de las formas que se están adoptando para esta lucha contra los efectos de la contaminación es el fomento de las energías renovables, que se ha plasmado en la Directiva Comunitaria 2001/77/EC.

Las formas de producción de energía denominadas “verdes”, es decir, no agresivas con el medio ambiente y provenientes de fuentes renovables, comprenden una gran variedad de tipos:

- Producción de electricidad:
 - Mediante centrales minihidráulicas.
 - Mediante la utilización de Biomasa (residuos sólidos urbanos).
 - Mediante la utilización de la energía geotérmica.
 - Mediante la utilización de la fuerza de las mareas.
 - Mediante la utilización de la fuerza del viento.
 - Mediante la utilización de la energía solar.
 - Mediante la utilización de procesos químicos.
- Producción de calor:
 - Mediante la utilización de la energía geotérmica.
 - Mediante la utilización de la energía solar.

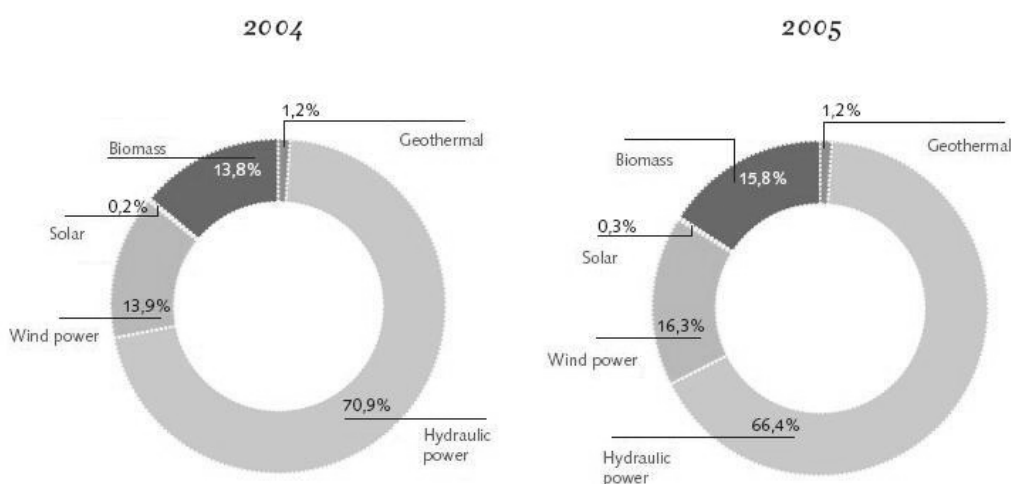


Figura 1.- Reparto de las energías renovables en la producción de electricidad en la Unión Europea (2005-2006) (Fuente: Comisión Europea)



De todas ellas, las únicas que se pueden incorporar de manera masiva y generalizada en los edificios en el marco geográfico español (con la excepción de pequeños enclaves de energía geotérmica como Lanzarote) son la energía solar –en sus dos vertientes: térmica y fotovoltaica–, la energía eólica con equipos de pequeño tamaño (lo que se denomina minieólica) y la procedente de procesos químicos (pilas de combustible, también denominadas pilas de Hidrógeno).

Una de las grandes ventajas de la producción de energía mediante el uso de estos tres tipos de renovables es la generación distribuida. El incorporar métodos de producción en el lugar en que se ocasiona el consumo supone la reducción de las pérdidas y los gastos de transporte. De esta manera se ahorran costes y consumos energéticos.

Las normativas nacionales de edificación deben ir actualizándose y facilitando la incorporación de estas nuevas energías para poder lograr dichos fines. Es por ello, que de todas estas fuentes, el actual Código Técnico de la Edificación ha incorporado la obligatoriedad de incorporar en los edificios paneles solares de tipo térmico para la producción de agua caliente sanitaria y, en los edificios de alto consumo eléctrico, paneles solares de tipo fotovoltaico.

La otra energía de tipo renovable que es posible que acabe siendo incorporada de forma masiva a los edificios –aunque no se prevé que sea de forma inminente en los próximos años– es la que nos proporcionarán las denominadas “pilas de hidrógeno” o “pilas de combustible”. En el ámbito donde este tipo de experiencias han logrado mayores éxitos es en el transporte.

La investigación se encuentra bastante avanzada por lo que es de suponer que todos los avances cosechados en este campo sean incorporados a uno de los sectores de mayor consumo energético, como es la edificación. Es lógico, dada la deficitaria producción energética de nuestro país, que desde el Estado se haga todo lo posible para fomentar estos tipos de energía; y también es lógico que se intente que esta producción se efectúen en lo posible de forma distribuida para evitar las consiguientes pérdidas en distribución, sin embargo, la incorporación de estos tipos de energía a los edificios no es inocua, sino que presenta un importante impacto, fundamentalmente a nivel estructural.

Por una parte, los paneles solares (tanto térmicos como fotovoltaicos), debidos tanto a su forma de instalación como a sus propias características presentan una serie de impactos estructurales sobre los apoyos, ocasionados no sólo por su peso propio sino por la resistencia que oponen a la fuerza del viento.

Las correspondientes solicitaciones ocasionan una reducción de los coeficientes de seguridad considerados en el cálculo inicial sobre estructuras existentes, así como deterioros de los materiales de construcción e inicio de los procesos patológicos derivados, tanto a nivel local (unión subestructura soporte–elementos de cubrición), como a nivel global de la estructura.

Para su instalación se obliga a los arquitectos a abordar el análisis de las sobrecargas ocasionadas por el viento, así como la determinación de si la inclinación de los soportes estándar ofrecidos por los fabricantes es la más adecuada para este tipo de situaciones. La influencia de estas cargas, tanto de tipo permanente debido a los propios paneles y los depósitos de acumulación, como las originadas por los contrapesos instalados para el viento, se deberían analizar para los Estados Límites de Servicio de Deformación y para los ELU de Flexión.

Por otra parte, en el caso de las pilas de hidrógeno, aunque lo ideal para el uso general de esta tecnología sería el suministro canalizado de hidrógeno a los inmuebles en que se instalaran pilas de combustible, al menos inicialmente, esta solución no será viable, dada la importante infraestructura urbana que esta canalización supondría en una ciudad (aunque se está estudiando seriamente la posibilidad de acometer esta sustitución por



secciones aprovechando que las redes de gas se pueden sectorizar en todas las ciudades donde existe).

Por ello, lo más probable será que inicialmente, las pilas de combustible que se implanten en los edificios dependan de la acumulación de hidrógeno “in situ”, aunque es dudoso que hasta que los elementos de seguridad estén más desarrollados se prevea su instalación en edificios que no sean muy singulares, tanto más que la instalación de una célula de hidrógeno deberá casi con seguridad compatibilizarse con una instalación de trigeneración; sin embargo, sí es posible que se acometan instalaciones de tipo urbano para alimentación a barrios completos o a partes de éstos. Dadas las características de muchos de nuestros cascos urbanos, estas instalaciones se ubicarán en muchos casos en las proximidades de edificios existentes a los que pueden llegar a condicionar.

El almacenaje de hidrógeno en forma gaseosa supone la utilización de enormes volúmenes, por lo que es poco probable que se opte por este tipo de depósitos, sobre todo en edificios preexistentes, por lo que será más probable que los depósitos utilizados para serán de dos tipos –sobrepresión o criogénicos–, y ambos supondrán impactos estructurales en los edificios, por su peso y porque pueden ocasionar explosiones que lleguen a colapsar la estructura de los mismo, pero en el segundo de los tipos de depósito, aún más importante podrá ser la forma en que una fuga de hidrógeno a muy baja temperatura afectará a las estructuras existentes a las que alcance.

ANÁLISIS DEL IMPACTO ESTRUCTURAL.

a) PANELES SOLARES

Denominamos paneles o módulos solares a los dispositivos que, a partir de la radiación solar proporcionan energía térmica o energía eléctrica en condiciones de ser aprovechada por el ser humano.

Como se ha indicado en la introducción, el actual Código Técnico de la Edificación ha hecho extensivo a todo el territorio nacional la obligatoriedad de incorporar en los edificios estos paneles solares, tanto para la producción de agua caliente sanitaria como, en edificios de alto consumo, para la producción eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Esta situación sucede tanto en edificación de nueva construcción como en rehabilitación de cualquier uso cuando exista una demanda de agua caliente sanitaria y/o climatización de piscina cubierta.

Estos elementos, debidos tanto a su forma de instalación como a sus propias características presentan una serie de impactos estructurales sobre los apoyos, ocasionados no sólo por su peso propio sino por la resistencia que oponen a la fuerza del viento, así como los elementos colocados para evitar la acción de éste en dichos paneles. Las correspondientes sollicitaciones ocasionan una reducción de los coeficientes de seguridad considerados en el cálculo inicial sobre estructuras existentes, así como deterioros de los materiales de construcción e inicio de los procesos patológicos derivados.

a.1.- Paneles solares. Tipos y colocación.

Al hablar de impacto estructural de los paneles solares, en principio no tendremos porqué efectuar distinción entre paneles solares térmicos planos y paneles solares fotovoltaicos,



ya que, aunque existe diferencia de peso entre los dos, ésta no afecta, como veremos, al impacto que van a suponer sobre estructuras existentes. Sin embargo, a efectos estructurales sí deberemos efectuar una distinción entre los paneles solares planos – sean térmicos o fotovoltaicos– y los de vacío.

Un panel solar térmico de tipo plano puede pesar alrededor de los $0,25 \text{ kN/m}^2$ cuando está lleno de líquido (dependerá del fabricante y de la cantidad de anticongelante que se haya introducido), mientras que encontramos que los paneles fotovoltaicos no pesan ni siquiera $0,15 \text{ kN/m}^2$. Los pesos son bastante bajos debido a que la mayor parte de los fabricantes ejecutan las carcasas en aluminio para minorarlos en lo posible.

Por ello encontraremos que si se instalan adosados a un cerramiento, de forma que no queden afectados por la fuerza del viento, los paneles fotovoltaicos suponen una sobrecarga muy escasa que, casi en la totalidad de los casos, no afectará de forma negativa a las estructuras existentes. Por otro lado, los paneles térmicos aunque casi duplicarán el peso de los primeros, tampoco constituyen una sobrecarga preocupante.

Por el contrario, cuando se instalan separados de los cerramientos, buscando la mejor inclinación en orden a su rendimiento, la desventaja que supone el mayor peso de los paneles térmicos planos frente a los fotovoltaicos desaparece puesto que ambos deben ser dotados de suficiente contrapeso para contrarrestar la fuerza del viento y la diferencia de peso entre ambos paneles sólo supone que para un panel fotovoltaico habrá que incrementar dicho contrapeso con respecto al que se prevé para un panel térmico ubicado en la misma localidad e instalado en las mismas condiciones. Finalmente, la instalación de cualquiera de ellos supondrá la implementación de los mismos esfuerzos sobre la estructura.

Los paneles solares de vacío, sin embargo, aunque pesan normalmente entre $0,25$ y $0,30 \text{ kN/m}^2$, es decir, un valor muy similar al de los paneles térmicos planos, por su peculiar configuración permiten que el viento circule entre los tubos ocasionando una minoración sustancial de la resistencia que oponen a éste. Podemos por tanto inferir que los cálculos realizados para el panel térmico cuyo comportamiento a viento es el más desfavorable –el panel plano– cubrirán sobradamente las necesidades del panel de vacío.

Lo que sí influirá de forma notable es, por una parte, la inclinación adoptada por el panel, por otra parte, el tipo de soporte utilizado y, finalmente, la estructura de cubierta o fachada existente.

En cuanto a la primera de las circunstancias, la normativa vigente indica que se deben instalar los paneles con una inclinación comprendida entre $\text{latitud}+10^\circ$ y $\text{latitud}-10^\circ$. Esto, evidentemente, supone que cuanto más vertical se instale el panel, la superficie horizontal proyectada sea menor y, por tanto, la repercusión del peso propio se incremente, aunque, como ya se ha indicado, este peso propio sea una parte muy poco importante de los esfuerzos a que va a someterse la estructura debido a las cargas de viento.

En cuanto a la segunda de las circunstancias, podemos encontrar los siguientes tipos de soporte:

- Soportes estáticos (sin movimiento).
- Sistemas con seguimiento solar en un eje –horizontal (controlando el acimut del panel) o vertical (controlando la inclinación del mismo)–.
- Sistemas con seguimiento solar en dos ejes –horizontal y vertical (controlando tanto el acimut como la inclinación del panel de forma que la radiación solar incida siempre perpendicularmente a su superficie)–.



Los sistemas con seguimiento incrementan la eficacia del sistema de captación (se estima que entre un 30 y un 40%), pero son costosos y muy poco habituales, requiriendo siempre pruebas de carga en la estructura debido a los grandes esfuerzos que el movimiento supone, mientras que el primero de los sistemas es el más habitual y el que va a estudiarse en esta comunicación.

Los paneles pueden instalarse sobre una cubierta plana sobre una estructura auxiliar que les proporcione la inclinación necesaria –como hemos dicho comprendida entre latitud+10° y latitud–10°– o, de forma mucho menos frecuente sobre poste o mástil (generalmente este tipo de instalación se realiza sólo en elementos puntuales como farolas solares, etc.).

También podemos proyectar su instalación sobre los cerramientos verticales, presentando esta ubicación la ventaja de que los paneles actúan así como marquesinas que apantallan la radiación solar sobre las ventanas; sin embargo, esto sólo será factible si la fachada recibe suficiente soleamiento –lo que ocurre muy infrecuentemente– y si presenta suficiente resistencia mecánica para el anclaje de los paneles; es evidente que en este caso se deberá anclar la estructura de los paneles a elementos estructurales y no a los de cierre.

Casi todos los fabricantes proporcionan subestructuras estándar para la instalación de los paneles que suelen presentar un ángulo de inclinación de 45° –lo que lo incluye dentro de la inclinación requerida por el Código Técnico de la Edificación en prácticamente todo el territorio nacional (sólo quedarían fuera las islas Canarias)–, aunque también pueden encontrarse algunos fabricantes que ofrecen soportes con menor inclinación como, por ejemplo, 30° que pueden instalarse sin incumplir la norma en la mitad sur de la península, las ciudades autónomas africanas y ambos archipiélagos y ofrecen además la ventaja de que la instalación resultante sea menos visible desde el exterior del edificio en el caso de la ubicación de los paneles sobre la cubierta.

Sin embargo, si la carga de nieve prevista es muy elevada será recomendable ponderar esta limitación en cuanto a inclinación y prever los paneles con una inclinación mínima de 46° para facilitar la eliminación de nieve acumulada¹. Asimismo será recomendable cerrar la parte posterior del conjunto panel+soporte con cualquier elemento que evite que se acumule nieve en este lugar, siempre que se encuentre a sotavento. Como se describe más adelante, este fenómeno presenta especiales consecuencias, a la hora de determinar sobrecargas.

En cualquiera de los casos, la conexión entre panel y subestructura deberá ser elástica para evitar que las fluctuaciones de tamaño que el panel puede llegar a sufrir por las variaciones térmicas se transmitan a la estructura del edificio. Estas fluctuaciones pueden llegar a ser elevadas, sobre todo en los paneles térmicos y, dentro de estos sobre todo en los que sean capaces de alcanzar mayores temperaturas (dentro de los paneles solares clasificados como de baja temperatura –que son los que se suelen utilizar en los edificios, tanto para la producción de agua caliente sanitaria como para la producción de calefacción– los que pueden adquirir mayor temperatura son los de vacío que, en régimen estacionario, es decir, cuando no exista circulación en su interior, podrán llegar a alcanzar los 300°C). Es evidente que la propia estructura del panel debe poder soportar

¹ Lógicamente, la limitación normativa de inclinación en la mitad norte de la península – que es donde se localizan las áreas con mayor carga previsible de nieve– superará este valor de 46°, por lo que únicamente en áreas de alta montaña en latitudes más meridionales será donde tengamos que determinar si debemos superar el límite de inclinación legal de latitud+10°.

estas solicitaciones, así como la sobrecarga de nieve², sin alterar su capacidad resistente³, pero es imprescindible que se evite la transmisión de estas deformaciones a la estructura del edificio porque obligaría a que la misma soportara unas solicitaciones para las que no está calculada.

Deberá, por tanto, evitarse anclar los contrapesos a la estructura de forma rígida. Su conexión deberá permitir el libre movimiento horizontal de las subestructuras soporte de los paneles.

Si la instalación del panel se realiza en una superficie inclinada cuya pendiente esté comprendida entre 15 y 32°, se producirá un fenómeno de deslizamiento, por lo que se deberán instalar unos anclajes similares a los de los kits anti-vuelco usados en cubiertas planas en ubicaciones con vientos fuertes y/o condiciones climáticas especiales.

En este tipo de cubiertas se utiliza para soportar los paneles ganchos anclados a los cabios (rastreles donde se sujetan las tejas). Lógicamente, los ganchos deberán fijarse en los valles de las tejas; para compensar diferencias de altura se pueden utilizar plaquitas para recalzar o utilizar ganchos especiales de altura variable (en la figura 2 pueden verse varios de estos ganchos de anclaje). Para los paneles más frecuentes en el mercado (de medidas aproximadas 1x2 m) se necesitan un mínimo de dos ganchos por panel, fijando cada gacho como mínimo con dos tirafondos de 8/80.



² La mayor parte de los paneles están preparados para soportar cargas de nieve de hasta 1,25 kN/m².

³ De hecho, la norma UNE 94.101 indica en su punto 4.2: “Su estructura (se refiere a la del panel) debe asegurar que en la cubierta se eviten tensiones admisibles, incluso bajo las condiciones de temperatura máxima alcanzable por el colector.... La carcasa deberá resistir las solicitaciones derivadas del calentamiento propio del colector y de la acción de los ambientes meteorológicos y ambientales.”

Figura 2.- Diversos tipos de ganchos para el anclaje de paneles en cubiertas inclinadas y detalle de montaje.

En la parte superior del panel se fijará éste con dos ganchos más débiles que los de abajo puesto que no son de carga y sólo tienen como misión evitar el vuelco.

Un caso particular a estudiar será el de los equipos monoblock que comprenden en un solo cuerpo el panel o paneles solares (existen equipos monoblock con dos paneles) y el depósito primario de acumulación de agua caliente sanitaria. En estos casos, la función de contrapeso viene ya realizada, al menos parcialmente, por el depósito acumulador. Sin embargo, hay que considerar que este depósito puede encontrarse vacío, por lo que habrá que calcular el peso del contrapeso para viento considerando únicamente el equipo sin agua y, consiguientemente habrá que sumar al peso de este contrapeso el del agua contenida en el depósito y evaluar con el total si la resistencia de la estructura existente es suficiente. En la figura 3 se incorporan especificaciones técnicas de equipos monoblock Escosol de la firma Stiebel Eltron, comercializados en España por Salvador Escoda. En estas especificaciones vemos que el peso de agua oscila, según los modelos, entre 1.00 y 3.00 kN para superficies de panel de aproximadamente 2 y 4 m² respectivamente; esto supone una sobrecarga adicional de entre 0.50 y 0.75 kN/m².

La primera parte de la comunicación propuesta aborda el impacto de estos elementos colocados sobre estructuras existentes, tanto a nivel local (unión subestructura soporte-elementos de cubrición), como a nivel global de la estructura. Se aborda el análisis de las sobrecargas ocasionadas por el viento, así como la determinación de si la inclinación de los soportes estándar ofrecidos por los fabricantes es la más adecuada para este tipo de situaciones. La influencia de estas cargas, tanto de tipo permanente debido a los propios paneles y los depósitos de acumulación, como las originadas por los contrapesos instalados para el viento, se analizarán para los Estados Límites de Servicio de Deformación y para los ELU de Flexión.



Figura 3.- Especificaciones técnicas de equipos monoblock Escosol de la firma Stiebel Eltron, comercializados en España por Salvador Escoda.

a.2.- Evaluación de incrementos de carga.

Como se ha visto anteriormente, existe gran diferencia entre los diferentes tipos de captadores, y sus implicaciones tanto en su colocación como en su funcionamiento. Las consecuencias de su instalación en el comportamiento estructural, si no han sido previstas inicialmente en las primeras fases del diseño, aumentarán innegablemente las cargas inicialmente previstas.

Por lo tanto podemos concluir que la instalación de paneles solares, tanto a posteriori, en caso de la integración en estructuras existentes como en caso de obra nueva cuando no se han previsto en el proyecto de estructuras, va a suponer la reducción de los coeficientes de seguridad introducidos en la evaluación de cargas.

El análisis de la presente comunicación, se realiza a partir de los valores de pesos propios de elementos constructivos sugeridos por la norma en el anejo C del CTE DB SE-AE. Para los pesos propios de los diferentes tipos de paneles solares se opta por analizar exclusivamente los solares térmicos, ya que los fotovoltaicos, por todo lo mencionado anteriormente, quedarían del lado de la seguridad. Dentro de éstos, se tienen en cuenta dos casos: por un lado, cuando se sitúan los paneles solares aislados y el depósito de acumulación no se encuentra en la cubierta y por otro, implantando los sistemas monoblock de paneles con depósito.

La carga de los paneles solares se estiman en 0.25 kN/m^2 y la repercusión de la estructura de soporte en carga superficial puede oscilar entre 0.12 y 0.06 kN/m^2 . Por tanto se puede evaluar el peso total repartido en carga superficial en una carga media de 0.34 kN/m^2 . Los equipos monoblock que se han estudiado son los modelos mencionados Escosol de la firma Stiebel Eltron. Para trasladar a casos de carga superficial el peso de dichos elementos, se ha tomado el peso del equipo completo lleno más el de la estructura dividiéndolo entre el área del colector, que prácticamente viene a coincidir con el área ocupada en planta de la estructura de apoyo. El resultado se presenta en la Tabla 1:

MODELO ECOSOL	PESO DEL EQUIPO COMPLETO (kg)	PESO DE LA ESTRUCTURA (kg)	TOTAL CARGA EQUIPO (kN)	ÁREA DEL COLECTOR (m^2)	CARGA SUPERFICIAL
120	229,7	26,0	2,56	2,10	1,22
160	291,6	27,0	3,19	2,60	1,23
200	339,6	27,0	3,67	2,60	1,41
200	373,4	28,0	4,01	4,20	0,96
260	466,4	30,0	4,96	4,20	1,18
300	517,4	30,0	5,47	4,20	1,30
300	539,2	30,0	5,69	5,20	1,09

Tabla 1.- Evaluación de la repercusión de carga de equipos monoblock Escosol de la firma Stiebel Eltron, por superficie de ocupación.

El caso de los contrapesos de hormigón situados en la base se evalúa a partir de las cargas que presenta la acción de viento en los paneles. Para ello se realizan las simplificaciones recogidas en CTE DB SE-AE en su artículo 3.3.2. Los valores tomados son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 q_b &= 0,5 \text{ kN/m}^2 && \text{(Simplificación para cualquier punto del territorio español)} \\
 c_e &= 2,0 && \text{(Apto para edificios urbanos hasta 8 plantas de altura} \\
 &&& \text{independientemente de la altura)} \\
 c_p &= 2.2 / -3.0 && ^4
 \end{aligned}$$

Por ello se puede evaluar en la acción del viento, para la mayor parte de las edificaciones en toda España de manera generalizada en $q_e = 2.2 \text{ kN/m}^2$ como acción de presión y $q_e = 3.0 \text{ kN/m}^2$ succión.

Transformando la carga superficial que correspondería a la proyección vertical del panel y aplicando la correspondiente carga lineal en un punto situado a $b/4$, como se muestra en la figura 4, la carga sería por tanto $1.56L$ y $2.12L \text{ kN/m}$ y siendo L la longitud del panel. Por equilibrio, se obtienen las reacciones en la base, para un panel situado a 45° y 1 m de ancho que tanto en la dirección $+x$ de viento como la $-x$ suponen una carga de $1.17L$ y $1.59L \text{ kN/m}$ en cada uno de los apoyos.

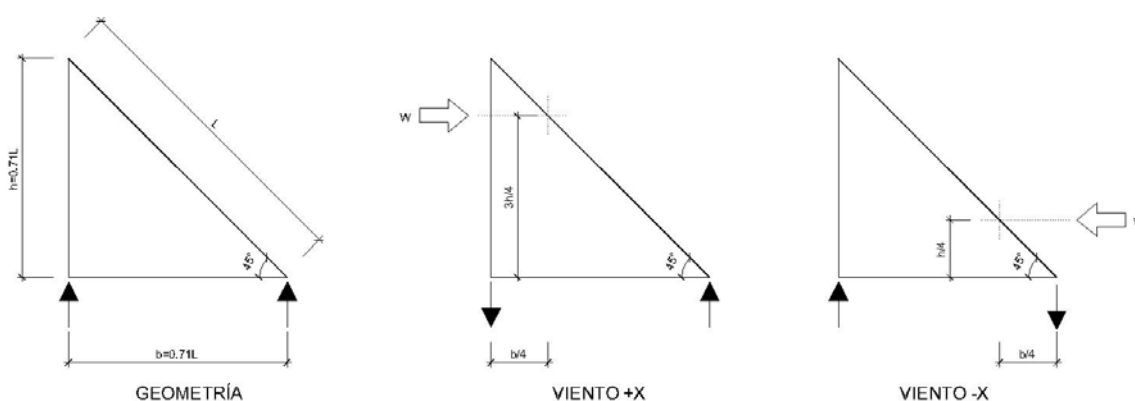


Figura 4.- Esquema de evaluación de las reacciones para la acción de viento.

Los contrapesos deberán estar dimensionados para evitar las tracciones más desfavorables que, en este caso, son las mencionadas anteriormente. Si tomamos el caso más desfavorable que suponen las reacciones de succión, el valor máximo de las reacciones es de $1.59L \text{ kN/m}$. Las situaciones que se pueden señalar, con respecto a la acción del viento, son las siguientes:

1.- Actúa el viento en dirección X

⁴ Los valores de los coeficientes eólicos se toman a partir de los valores propuestos por el Anejo D de la citada norma. El caso que más se aproxima a la acción del viento sobre los paneles solares en cubierta correspondería con la Tabla D.8 *Marquesinas a un agua*. La inclinación óptima de los paneles debería ser mayor a 30° , sin embargo, la tabulación de valores se encuentra hasta 30° y para áreas de más de 10 m^2 . Por ello, los dos coeficientes eólicos de presión obtenidos son los más desfavorables de los disponibles, para grado de obstrucción comprendido $0 \leq \varphi \leq 1$ y para grado de obstrucción $\varphi = 0$, que suelen ser las situaciones más comunes en las que se encuentran los paneles situados en cubierta.

- 2.- Actúa el viento en dirección -X
- 3.- No actúa el viento

En los casos 1 y 2, el apoyo situado a barlovento será el traccionado y por tanto, la resultante de acciones será nula en ese punto debido a que el contrapeso actuará en sentido negativo, según se muestra en la Figura 5. En cambio, el apoyo a sotavento recibirá la compresión y la acción del viento por la carga depositada será el doble del peso del contrapeso. Por último, en el caso que no actúe el viento las reacciones serán exclusivamente las correspondientes a los pesos propios de los contrapesos.

En todos los casos, la repercusión de este valor en planta, para una panel de longitud L, será la suma de las reacciones máximas (los valores mencionados anteriormente en cada apoyo) divididas entre la proyección horizontal del panel ($\cos 45^\circ L$), que será entonces de 4.50 kN/m^2 .

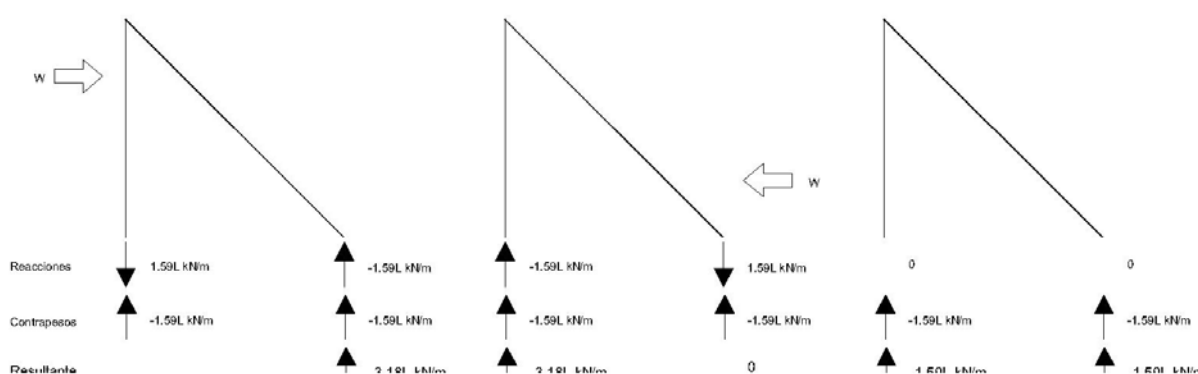


Figura 5.- Reacciones en los apoyos según la actuación del viento.

A continuación se evalúan esas implicaciones para diferentes tipos de situaciones, tanto de tipos de paneles como de disposiciones constructivas de cubiertas.

a.2.1.- Cubiertas Planas

En cubiertas planas, los tipos evaluados que se muestran a continuación son los habituales en edificación que corresponden con cubiertas planas con impermeabilización vista protegida (Tipo 1), las cubiertas planas con acabado de grava (Tipo 2) y las cubiertas planas directas con acabado solado cerámico sobre plastón espesor inferior a 8 cm (Tipo 3).

El tipo de base estructural de la cubierta (forjado) puede ser de muy diverso origen, pero generalmente, el peso de éste será bastante preciso ya que en caso de forjados realizados con elementos prefabricados, los más habituales en edificación por otra parte, éstos los evalúan directamente los fabricantes por lo que suelen ser bastante precisos. En el caso de forjados de cubiertas planas, éstas no suelen ser de tipo ligero, por lo que el elemento estructural horizontal, tendrá generalmente de un peso importante, entre $3,0$ y $5,0 \text{ kN/m}^2$. Sin embargo, para poder evaluar la implicación de los paneles solares a la hora de reducir los coeficientes de seguridad, no se tienen en cuenta precisamente por la exactitud de los datos proporcionados por los fabricantes. Otro caso sería la construcción de un sistema de forjado diferente al previsto, que generalmente ocurre en forjados con

capa de compresión cuando ésta aumenta en varios centímetros respecto al proyecto, aumentando así la carga permanente. Se puede también simplificar que esas variaciones son asumidas por el propio coeficiente de seguridad parcial de la carga de peso propio. A efectos del presente artículo, por estas razones no ha sido tenido en cuenta.

Generalmente las cubiertas planas donde se instalan los paneles solares suelen ser accesibles exclusivamente para su mantenimiento y conservación, por lo tanto, accesibles sólo privadamente. Las sobrecargas de uso derivadas de ellos, según el Artículo 3.1.1. del CTE DB SE-AE, será de 1.00 kN/m², correspondiendo a la Categoría de Uso F.

El caso de las sobrecargas de Nieve se podría evaluar mediante la simplificación contenida en el Artículo 3.5.1 del citado documento, que indica que se puede considerar en cubiertas planas de edificios de pisos situados en localidades de altitud inferior a 1.000 m una sobrecarga de 1,0 kN/m². Sin embargo, como es muy difícil evaluar cuan próximo está a las cargas de trabajo las sobrecargas, tanto de uso como de nieve, parece razonable no incluir las sobrecargas en la zona de influencia bajo los paneles solares. En el sentido estricto, la nieve deslizaría parcialmente, en función del ángulo de inclinación – ya que los ángulos serán inferiores a 60° - y una parte quedaría acumulada en la zona cercana a la base de los soportes – en esa zona ya estaría prevista la carga de nieve - y otra permanecería depositada sobre los paneles. A efectos de disminución de los coeficientes de seguridad se ha presupuesto que desaparecerían las sobrecargas tanto de uso como de nieve, en la zona de colocación de los paneles solares. En cambio se aumentan las cargas permanente tal y como se ha comentado anteriormente.

La evaluación de cargas inicial, atendiendo a los criterios anteriormente descritos, se presenta en la Tabla 2.

Los paneles solares necesitan su propia subestructura para su inclinación correcta, como se ha descrito anteriormente, por lo que, en muchas ocasiones, será necesaria la colocación de un contrapeso. En la figura 6 se puede observar el contrapeso de hormigón situado en la base de los paneles. Como se ha comentado anteriormente, se puede evaluar esta carga en aproximadamente 4.50 kN/m².

Obteniendo los coeficientes de seguridad de la Tabla 4.1 del Documento de Seguridad Estructural CTE DB-SE, para situaciones persistentes o transitorias, los coeficientes de seguridad para acciones permanentes de pesos propios en verificaciones de resistencia será $\gamma_G = 1,35$ y para acciones de tipo variable $\gamma_G = 1,50$. Para las verificaciones en los Estados Límite Últimos, se ha tenido en cuenta tanto la sobrecarga de uso como acción variable principal. El resultado es el que se incluye en la Tabla 3.

ORIGEN DE LA CARGA	Cubierta Tipo 1	Cubierta Tipo 1	Cubierta Tipo 2
Peso propio de la estructura	No evaluado	No evaluado	No evaluado
Formación de cubiertas y cubrición	1.50	2.50	1.50
Solado	--	--	1.00
CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN PERMANENTE (G_k)	1.50	2.50	2.50
Sobrecarga de Uso	1.00	1.00	1.00
Sobrecarga de Nieve	1.00	1.00	1.00

CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN VARIABLE (Q_k)	2.00	2.00	2.00
TOTAL VALOR DE CARGA CARACTERÍSTICA (q_k)	3.50	4.50	4.50

Tabla 2.- Evaluación de las cargas características en los tipos de cubierta plana estudiados.



Figura 6.- Ejemplo de instalación de paneles solares con contrapesos

Por otra parte, en la Tabla 4, se describen la evaluación de la reducción del coeficiente de seguridad para los 3 tipos de cubierta evaluados, los dos sistemas de paneles solares térmicos y monoblock:

ORIGEN DE LA CARGA	Cubierta Tipo 1	Cubierta Tipo 2	Cubierta Tipo 3
CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN PERMANENTE (G_d)	2.03	3.38	3.38
CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN VARIABLE (Q_d)	2.25	2.25	2.25
CARGA TOTAL DE CÁLCULO (q_d)	4.57	5.63	5.63

Tabla 3.- Evaluación de las cargas de cálculo en los tipos de cubierta plana estudiados, tomando la sobrecarga de uso como principal



ELU Combinación 1		Carga de proyecto		Cargas actuantes				Reducción de seguridad			
Tipo de Cubierta	Tipo de Panel	Carga característica Cubierta (kN/m ²)	Carga de cálculo Cubierta (kN/m ²)	Carga de cálculo Permanente (kN/m ²)	Carga equipo solar térmico (kN/m ²)	Carga contrapeso (kN/m ²)	Carga Total (kN/m ²)	Incremento de carga (%)	Coefficiente de seguridad inicial	Coefficiente de seguridad final	Reducción coef. seguridad
TIPO 1	Solar Térmicos	3,50	4,57	1,50	0,34	4,50	6,34	38,73%	1,31	0,72	45%
TIPO 2	Solar Térmicos	4,50	5,63	2,50	0,34	4,50	7,34	30,37%	1,25	0,77	39%
TIPO 1	Ecosol 120	3,50	4,57	1,50	1,22	4,50	7,22	57,99%	1,31	0,63	52%
	Ecosol 200	3,50	4,57	1,50	0,96	4,50	6,96	52,30%	1,31	0,66	50%
	Ecosol 300	3,50	4,57	1,50	1,09	4,50	7,09	55,14%	1,31	0,64	51%
TIPO2-3	Ecosol 120	4,50	5,63	2,50	1,22	4,50	8,22	46,00%	1,25	0,68	45%
	Ecosol 200	4,50	5,63	2,50	0,96	4,50	7,96	41,39%	1,25	0,71	43%
	Ecosol 300	4,50	5,63	2,50	1,09	4,50	8,09	43,69%	1,25	0,70	44%

Tabla 4.- Evaluación de la reducción de los coeficientes de seguridad en función para varios tipos de cubiertas planas y paneles solares planos.

a.2.2.- Cubiertas Inclinas

Para el caso de cubiertas inclinadas, los casos evaluados son asimismo los habituales en edificación: Cubiertas ligeras realizadas con chapas, tableros o paneles ligeros (Tipo 4), cubiertas de teja cerámica o de pizarra sobre enrastrelado (Tipo 5) y Cubiertas de teja cerámica o de pizarra sobre tableros cerámicos y tabiques palomeros (Tipo 6). Como en el caso anterior, tampoco se han tenido en cuenta las originadas en los forjados o el peso propio de correas u otros elementos estructurales de cubierta, por las razones comentadas anteriormente.

Como en el caso anterior, las cubiertas inclinadas son accesibles exclusivamente para conservación, con mayor motivo que en las planas. Se han supuesto las dos situaciones contempladas en la normativa, que engloban a todas las demás: cubiertas con inclinación inferior a 20° y cubiertas con inclinación superior a 40°. Para la primera, las sobrecargas de uso, según el Artículo 3.1.1. del CTE DB SE-AE, será de 1.00 kN/m², correspondiendo a la Categoría de Uso G1 y una carga nula para el segundo caso, que corresponde con la Categoría de Uso G2.

Los valores de sobrecarga de nieve dependerán de la inclinación de la cubierta. Así mismo se pueden determinar dos situaciones, cubiertas hasta 20 ° de inclinación que tendrá un factor de forma $\mu = 1$ y cubiertas de más de 40° de inclinación, que su factor de forma será al menos $\mu = 0.33$. Siguiendo la simplificación realizada para las cubiertas planas, la carga básica en terreno horizontal puede tomarse como $s_k = 1.00$ kN/m². Por tanto, las cargas de nieve para las dos situaciones de inclinación serán $q_n = 1.00$ kN/m² y $q_n = 0.33$ kN/m². Para cubierta inclinada, cuando los paneles solares han sido colocados directamente sobre ella, las cargas de nieve serán las mismas que para el resto de la cubierta. Sin embargo, cuando se colocan buscando una inclinación donde se recoja mayor irradiación solar (que en la práctica suele ser los 45° mencionados), podemos suponer que la nieve no se depositará de manera importante y deslizará por el panel, por lo que se puede suponer que esa carga no actúa en la mayor parte de los casos, aunque sí quede prevista originalmente en la evaluación de cargas.

Las situaciones de cargas por tanto determinadas en proyecto serán la representadas en la Tabla 5:

ORIGEN DE LA CARGA	Cubierta Tipo 3	Cubierta Tipo 4	Cubierta Tipo 5
Peso propio de la estructura	No evaluado	No evaluado	No evaluado

Formación de cubiertas y cubrición	1.00	2.00	3.00
CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN PERMANENTE (G_k)	1.00	2.00	3.00
Sobrecarga de Uso	1.00 / 0.00	1.00 / 0.00	1.00 / 0.00
Sobrecarga de Nieve	1.00 / 0.33	1.00 / 0.33	1.00 / 0.33
CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN VARIABLE (Q_k)	2.00 / 0.33	2.00 / 0.33	2.00 / 0.33
TOTAL VALOR DECARGA CARACTERÍSTICA (q_k)	3.00 / 1.33	4.00 / 2.33	5.00 / 3.33

Tabla 5.- Evaluación de las cargas características en los tipos de cubierta plana estudiados.

Para cubiertas inclinadas cuando los paneles se encuentran superpuestos, el efecto del viento será el mismo que para la cubierta en su totalidad. En cambio, en el momento que éstos se coloquen buscando la inclinación de 45° y no coincida con la de la cubierta (lo que ocurre en la mayor parte de la edificación salvo la de alta montaña), se producirán las mismas cargas que en el caso de cubiertas planas, evaluado en aproximadamente 4.50 kN/m^2 .

Para evaluación de cargas de cálculo, en situaciones persistentes o transitorias, los coeficientes de seguridad para acciones permanentes de pesos propios en verificaciones de resistencia serán $\gamma_G = 1,35$ y para acciones de tipo variable $\gamma_G = 1,50$. Para las verificaciones en los Estados Límite Últimos, se ha tenido en cuenta tanto la sobrecarga de nieve como la de usos como acción variable principal. El resultado es el siguiente el recogido por la Tabla 6:

ELU Combinación 1: Sobrecarga principal Uso

ORIGEN DE LA CARGA	Cubierta Tipo 1	Cubierta Tipo 2	Cubierta Tipo 3
CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN PERMANENTE (G_d)	1.35	2.70	4.05
CARGA SUPERFICIAL DE ORIGEN VARIABLE (Q_d)	2.25 / 0.25	2.25 / 0.25	2.25 / 0.25
CARGA TOTAL DE CÁLCULO (q_d)	3.60 / 1.60	4.95 / 2.95	6.30 / 4.30

Tabla 6.- Evaluación de las cargas de cálculo en los tipos de cubierta inclinada estudiados, tomando la sobrecarga de uso como principal

Las cargas de cubierta, en el caso de las realizadas sobre tabiques palomeros, a efectos globales de la estructura, repercutirán directamente sobre el forjado horizontal de la planta inferior, por lo que las cargas afectarán a una superficie mayor y se puede suponer que se produce un efecto de “disipación”, es decir, los efectos de las cargas actuando en un área mayor son menores que en áreas más reducidas. Sin embargo, en los tipos de

cubierta 4 y 5 las reacciones de la cubierta, ya sean de pesos propios de la cubierta como de pesos de paneles solares, al anclarse los paneles directamente sobre los rastreles las cargas actuantes son a efectos locales más importantes, por lo que requerirá un estudio minucioso para prever sus efectos

Las situaciones más desfavorables, coincidirán con las cubiertas de menor inclinación donde la proporción de las cargas iniciales frente a las actuantes son mayores. En la Tabla 7 se describen la evaluación de la reducción del coeficiente de seguridad para los 3 tipos de cubierta evaluados, los dos sistemas de paneles solares térmicos y monoblock:

ELU Combinación 1			Carga de proyecto		Cargas actuantes			Reducción de seguridad				
Tipo de Cubierta	Inclinación Cubierta	Tipo de Panel	Carga característica Cubierta (kN/m ²)	Carga de cálculo Cubierta (kN/m ²)	Carga de cálculo permanente (kN/m ²)	Carga equipo solar térmico (kN/m ²)	Carga contrapeso (kN/m ²)	Carga Total (kN/m ²)	Incremento de carga (%)	Coeficiente de seguridad inicial	Coeficiente de seguridad final	Reducción coef. seguridad
TIPO 3	< 20 °	Solar Térmicos	3,00	3,60	1,00	0,34	4,50	5,84	62,22%	1,20	0,62	49%
	> 40 °	Solar Térmicos	1,33	1,60	1,00	0,34	4,50	5,84	265,00%	1,20	0,27	77%
TIPO 4	< 20 °	Solar Térmicos	4,00	4,95	2,00	0,34	4,50	6,84	38,18%	1,24	0,72	42%
	> 40 °	Solar Térmicos	2,33	2,95	2,00	0,34	4,50	6,84	131,86%	1,27	0,43	66%
TIPO 5	< 20 °	Solar Térmicos	5,00	6,30	3,00	0,34	4,50	7,84	24,44%	1,26	0,80	36%
	> 40 °	Solar Térmicos	3,33	4,30	3,00	0,34	4,50	7,84	82,33%	1,29	0,55	58%
TIPO 3	< 20 °	Ecosol 120	3,00	3,60	1,00	1,22	4,50	6,72	86,67%	1,20	0,54	55%
		Ecosol 200	3,00	3,60	1,00	0,96	4,50	6,46	79,44%	1,20	0,56	54%
		Ecosol 300	3,00	3,60	1,00	1,09	4,50	6,59	83,06%	1,20	0,55	54%
	> 40 °	Ecosol 120	1,33	1,60	1,00	1,22	4,50	6,72	320,00%	1,20	0,24	80%
		Ecosol 200	1,33	1,60	1,00	0,96	4,50	6,46	303,75%	1,20	0,25	79%
		Ecosol 300	1,33	1,60	1,00	1,09	4,50	6,59	311,88%	1,20	0,24	80%
TIPO 4	< 20 °	Ecosol 120	4,00	4,95	2,00	1,22	4,50	7,72	55,96%	1,24	0,64	48%
		Ecosol 200	4,00	4,95	2,00	0,96	4,50	7,46	50,71%	1,24	0,66	46%
		Ecosol 300	4,00	4,95	2,00	1,09	4,50	7,59	53,33%	1,24	0,65	47%
	> 40 °	Ecosol 120	2,33	2,95	2,00	1,22	4,50	7,72	161,69%	1,27	0,38	70%
		Ecosol 200	2,33	2,95	2,00	0,96	4,50	7,46	152,88%	1,27	0,40	69%
		Ecosol 300	2,33	2,95	2,00	1,09	4,50	7,59	157,29%	1,27	0,39	69%
TIPO 5	< 20 °	Ecosol 120	5,00	6,30	3,00	1,22	4,50	8,72	38,41%	1,26	0,72	43%
		Ecosol 200	5,00	6,30	3,00	0,96	4,50	8,46	34,29%	1,26	0,74	41%
		Ecosol 300	5,00	6,30	3,00	1,09	4,50	8,59	36,35%	1,26	0,73	42%
	> 40 °	Ecosol 120	3,33	4,30	3,00	1,22	4,50	8,72	102,79%	1,29	0,49	62%

Tabla 7.- Evaluación de la reducción de los coeficientes de seguridad en función para varios tipos de cubiertas planas y paneles solares planos.

a.2.3.- Cerramientos.

A efectos de peso propio de los cerramientos habituales en edificación y las cargas transmitidas tanto a pórticos de fachadas como a elementos perimetrales, en caso de de cerramientos compuesto por hoja de albañilería exterior y tabique interior, con grueso total < 0,25 m, el Código Técnico sugiere una carga lineal de 7 kN/m para cerramientos del orden de 3,00 m de altura (Tabla C.5, Anejo CTE DB-SE-AE). En este caso, partiendo de los pesos de los tipos de paneles, podemos obtener lo que supone dicho incremento de cargas (Tabla 8).

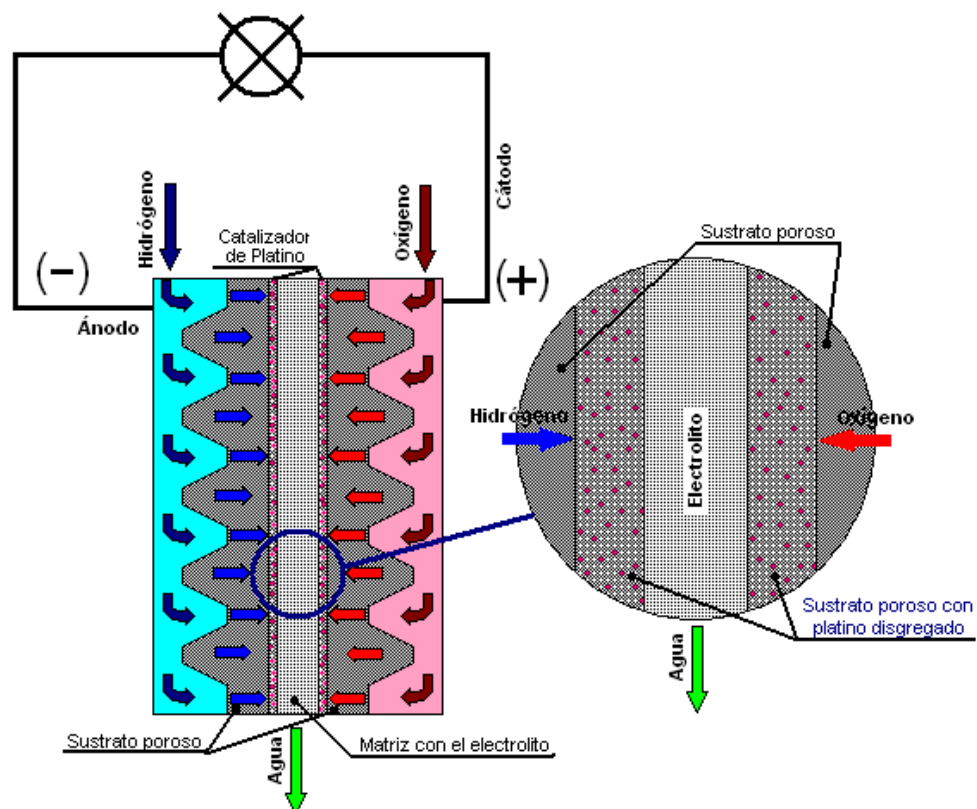
Peso Propio Cerramiento (kN/m)	Altura panel (m)	Panel solar térmico (kN/m)	Carga Total (kN/m)	Incremento de carga (%)
7,00	2,05	0,51	7,51	7,32%
7,00	2,20	0,55	7,55	7,86%

Peso Propio Cerramiento (kN/m)	Altura panel (m)	Panel solar fotovoltaico (kN/m)	Carga Total (kN/m)	Incremento de carga (%)
7,00	1,20	0,18	7,18	2,57%
7,00	1,30	0,20	7,20	2,79%

Tabla 8.- Aumento de cargas debido a la instalación de los paneles en cerramientos respecto a la carga original prevista.

b) PILAS DE HIDRÓGENO

Las células de hidrógeno son dispositivos electroquímicos que convierten directamente en energía eléctrica la energía química producida por la reacción entre oxígeno e hidrógeno puros puestos en contacto. La propaganda está difundiendo que se trata de un tipo de energía totalmente inocua, en la que, simplemente se toma hidrógeno, se le mezcla con el oxígeno y se obtiene electricidad y agua, limpiamente y sin contaminación. Sin embargo, esto no es estrictamente cierto, puesto que se obtiene, en el mejor de los casos, un subproducto –el calor– que si no es controlado podrá afectar considerablemente al microclima de nuestras ciudades cuando las pilas de hidrógeno sean incorporadas masivamente a los edificios (hay que recordar que el vapor de agua es



uno de los principales gases de efecto invernadero, ocasionando entre el 60 y el 70% del mismo). Podemos ver esquemáticamente una célula de hidrógeno en la figura 7.

Fig. 7.- Sección esquemática de una célula de hidrógeno.

El dispositivo es conceptualmente muy simple: está formado por dos electrodos separados por un electrolito que permite el paso de iones (H^+) pero no de electrones. En el electrodo negativo tiene lugar la oxidación del combustible (normalmente hidrógeno, pero también metano o metanol) y en el positivo la reducción del oxígeno, obtenido, de forma habitual, directamente del aire.

Entre el combustible y el oxígeno se produce una atracción que es capaz de disociar el combustible en electrones (e^-) e iones (H^+), los primeros de los cuales no pueden pasar a través del electrolito, por lo que quedan retenidos.

Si se les proporciona un camino de salida (por ejemplo un circuito eléctrico que los comunique con el electrodo de oxígeno, se establece de inmediato la circulación, creándose una corriente eléctrica.

Al oxígeno –polarizado por la atracción del hidrógeno– le llegarían, por un lado dichos electrones, que lo ionizan cargándolo negativamente, y, por otro, los iones (H^+). Ambos iones reaccionan entre sí produciéndose agua (H_2O).

Aunque esta formación de agua a partir del oxígeno y del hidrógeno es espontánea, también es muy lenta al estar ambos separados por el electrolito. Por ello se acelera el proceso utilizando diversos catalizadores, de los que el más común es el platino (Pt), y diversos tipos de electrolitos, de forma que éste tenga la más alta conductividad posible a los iones que deben atravesarlo. Las pilas de combustible se clasifican precisamente en función de este electrolito, aunque el tipo de catalizador utilizado, dado el costo del platino, es un elemento muy importante a tener en cuenta.

El voltaje producido por estas células de hidrógeno es escasamente superior a 1V, por lo que es necesario conectar en serie un número elevado de células para obtener una corriente eléctrica utilizable. Las células así conectadas se “apilan” en un conjunto denominado precisamente “pilas de combustible”.

Un esquema simplificado de funcionamiento de estas células puede verse en el que puede verse en la figura 8, en el que se ve los requisitos y elementos de alimentación de la célula y los productos que se obtienen.

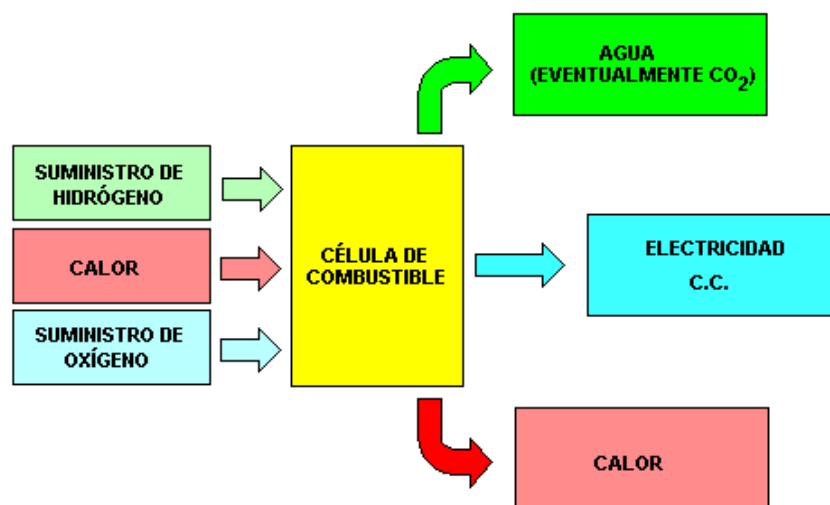


Fig. 8.- Funcionamiento esquemático de una célula de hidrógeno.

Sin embargo, este esquema es puramente teórico, puesto que para que el conjunto funcione en un edificio, son necesarios muchos más elementos, tal y como podemos ver en la figura 8.

Vemos que de una célula de combustible no sólo obtenemos energía eléctrica, sino también agua y una cantidad variable de calor que va a depender del tipo de célula de que se trate (incluso en condiciones de laboratorio isotérmicas, nunca se consigue convertir la totalidad de la energía química en eléctrica, sino que siempre se pierde una pequeña cantidad en forma de calor); también podemos observar que para obtener la

reacción, además del hidrógeno (o en su caso cualquier otro combustible utilizable) y del oxígeno, se requerirá un aporte inicial de calor externo (luego el calor necesario puede proceder de la propia célula), un aporte energético para inyectar el oxígeno y un catalizador.

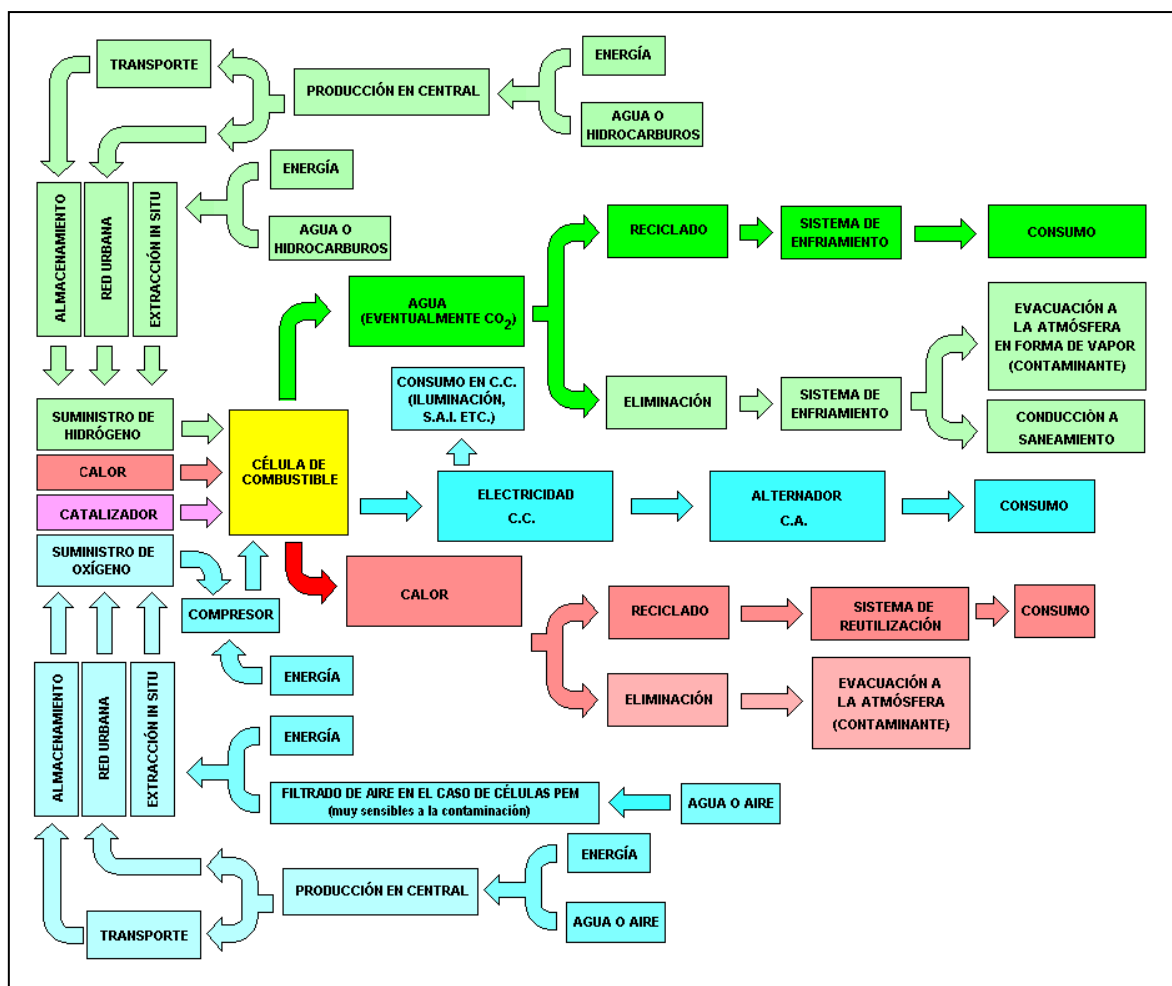


Figura 9.- Funcionamiento esquemático de un sistema de producción de energía mediante células de hidrógeno.

Dado que el objetivo esencial de las células de combustible es la obtención de electricidad, podemos considerar que los productos secundarios –agua y calor– deben eliminarse o reutilizarse para otros usos. Sin embargo, evidentemente la evacuación directa de vapor de agua a alta temperatura debería matizarse mucho, ya que, no solamente crearíamos en nuestras ciudades una enorme capa de gases de efecto invernadero, sino que podríamos estar modificando el microclima local en cuanto a temperatura y humedad relativa (incluso si el sistema se generaliza en grandes ciudades, podría alterarse el clima a nivel comarcal, con variaciones de temperatura y humedad relativa como en el caso anterior, pero también pluviométricas y de dirección e intensidad de vientos), por lo que lo lógico es reutilizar este vapor de agua para otros



aprovechamientos energéticos. Es decir, la utilización de pilas de combustible va a verse indefectiblemente asociada a la trigeneración.

Casi con toda seguridad, las primeras instalaciones de pilas de combustibles no se realizarán en edificios habitados, sino que se constituirán en centrales independientes.

También existen pilas de combustible que funcionan sustituyendo el hidrógeno por hidrocarburos del tipo del metano o el metanol; en estos casos los subproductos no son únicamente agua y calor, sino que se produce desprendimiento de dióxido de carbono. Esto evidencia que este tipo de pilas no son deseables, aunque muy probablemente sean las que primero se incorporen en nuestros hogares, puesto que la inmensa mayoría de los mismos disponen de suministro de gas natural y el suministro y almacenaje de hidrógeno presenta múltiples problemas (en cualquier caso, actualmente se está trabajando en la eliminación de este problema, con metodologías como la propuesta por Shell y Siemens Power Generation, en la que el CO_2 producido se aísla en depósitos de aceite en lugar de ser evacuado directamente a la atmósfera. Aún así, este tipo de pilas no logrará liberarnos de la dependencia energética del petróleo o del gas natural, salvo en los casos en que el hidrocarburo de que se trate sea algún tipo de biogas).

Si nos centramos en las células de combustible que funcionan con hidrógeno, deberemos tener en cuenta que dicho elemento no es una fuente de energía primaria (no existe libre en la Naturaleza) sino un vector energético secundario, obtenido a partir de otras fuentes de energía primarias. El que el sistema pueda ser calificado de totalmente “verde” o limpio depende pues de la forma de obtención del mismo, ya que en la actualidad se realiza mediante la utilización de combustibles fósiles, con desprendimiento a la atmósfera de cantidades variables de CO_2 . En el caso anterior – células de combustible que utilizan metano en lugar de Hidrógeno – tendríamos contaminación “in situ” y en caso de células a base de Hidrógeno en las que lo obtuviéramos a partir de hidrocarburos, trasladaríamos la emisión de contaminación al área de ubicación de las centrales de producción de este elemento, pero en ninguno de ambos casos podríamos calificar este método de producción de “no contaminante” o “verde”.

Sin embargo, la utilización de las pilas de combustible presenta la gran ventaja de que se trata del único método de generación eléctrica totalmente portátil, lo que lo está llevando a incorporarse a la industria mobiliaria y de automoción y que no depende de forma inmediata de la climatología como las anteriores formas de captación energéticas eólica (depende de la existencia del viento) y solar (depende del sol).

La tecnología de las pilas de combustible está completamente desarrollada y próximamente se incorporarán a nuestras vidas en su versión de pequeño tamaño, sustituyendo a las pilas y baterías convencionales en elementos como teléfonos móviles (Motorola tiene casi desarrollado un prototipo) y ordenadores portátiles (Toshiba o Nec).

Se están realizando ya experiencias piloto, en las que España está muy implicada, de funcionamiento de autobuses con este tipo de pilas (ya se ha equipado incluso estaciones de servicio con abastecimiento de hidrógeno) y diseños de vehículos de transporte frigorífico muy útiles donde no exista fácil acceso a la energía eléctrica y los combustibles fósiles (transporte de vacunas en el tercer mundo).

Aunque ya existen plantas piloto en periodo de pruebas, la implantación de esta tecnología será realidad en mayor escala a medio plazo, en cuanto se resuelvan los problemas de infraestructura de producción masiva, almacenamiento y transporte del hidrógeno (se está intentando que la producción se realice mediante el uso de energías de tipo renovable como la eólica), aunque ya existen utilizaciones paralelas como la experiencia que se va a llevar a cabo en Holanda con la introducción en los conductos de gas natural de hasta un 10% de hidrógeno, que al mezclarse con el gas nos proporcionará un compuesto mezcla con mayor poder calorífico, lo que, evidentemente,



umentará el porcentaje de energía producida en el país por este método, o las mezclas de hidrógeno con gasolina.

b.1.- Almacenamiento del Hidrógeno.

El desarrollo de las investigaciones sobre las pilas de hidrógeno no se está simultaneando, al mismo nivel, con un estudio de las dificultades constructivas, estructurales y de diseño que la incorporación de estos elementos va a suponer en la arquitectura. La afección que esta incorporación puede suponer debe tenerse en cuenta tanto para las edificaciones de nueva planta, donde serán más fácilmente asimilables estos sistemas, como para edificios existentes.

La posibilidad de utilizar las canalizaciones de gas natural existentes en múltiples ciudades, para la distribución del hidrógeno, no es, a priori, viable, debido a que las redes de gas se encuentran en servicio para transportar dicho gas y no podrían utilizarse simultáneamente para el transporte hidrógeno. Por otra parte, la duplicación de las redes urbanas de gas canalizado – una para gas natural y otra para hidrógeno – no puede esperarse de forma rápida, ya que no sería económicamente rentable hasta que el número de pilas instalado fuera considerable. Muy probablemente las pilas de combustible que primero se incorporen en las viviendas y otro tipo de edificios, sean del tipo de las que funcionan sustituyendo el hidrógeno por hidrocarburos del tipo del metano o metanol, puesto que la inmensa mayoría de los mismos disponen de suministro de gas natural. En este caso, para su utilización sólo será necesario almacenar oxígeno en los edificios, pero se seguirá emitiendo a la atmósfera altas concentraciones de CO₂, por lo que no servirán como fuente energética alternativa, aunque, en el mayor número de situaciones, ésta será el único sistema que podrá adaptarse en edificios existentes, siempre y cuando, las condiciones de almacenaje del oxígeno sea compatible con las condiciones constructivas.

Bajo este planteamiento, cuando se generalice el uso de las pilas de hidrógeno propiamente dichas, las primeras en instalarse deberán depender del almacenamiento en los propios edificios tanto de hidrógeno como de oxígeno, que se suministrarían mediante camiones-cisterna por lo que esto afectará considerablemente al diseño de los edificios, sobre todo dada la peligrosidad del hidrógeno, de la que tenemos abundantes pruebas.

Sin embargo, la utilización de las pilas de combustible, presenta tales ventajas – que sea renovable, que genere electricidad de forma distribuida y que emita a la atmósfera básicamente un solo contaminante, cuya emisión es, además fácilmente evitable con la reutilización del calor – que no es lógico renunciar a su utilización en un futuro que esperemos sea muy cercano.

Por ello, deberemos analizar los problemas que se van a presentar, no sólo desde el punto de vista de los técnicos proyectistas, sino también desde la posición de los distintos legisladores aunque en realidad, en muchos países, ya se están generando reglamentos de instalación de estos elementos.

El hidrógeno puede almacenarse tanto en forma gaseosa (aunque en esta forma ocupará un gran volumen, ya que se estima que se necesitan 238.000 litros de hidrógeno, en forma gaseosa, para reemplazar la capacidad energética que contienen 75 litros de gasolina), como en forma líquida. El desarrollo de este estudio se centra únicamente, en el almacenamiento en forma líquida, y tanto si se produce la licuación de forma criogénica como si se hace por presión, la temperatura alcanzada por el hidrógeno será extremadamente baja.



Para considerar el impacto que va a causar en la estructura portante de un edificio el almacenamiento del hidrógeno en forma líquida, se debe tener en cuenta tres aspectos muy importantes: su peso (el H₂ licuado es ochocientas veces más denso que en forma gaseosa), su temperatura (el H₂ se licua, en condiciones de presión normales, a una temperatura de -253°C , sólo 20K por encima del cero absoluto) y el hecho de que se trata de un líquido combustible, es decir, posee un punto de inflamación igual o superior a los 38°C , por lo que debe ser tratado como tal.

Desde el punto de vista de la estructura local de los depósitos de hidrógeno licuado, hay que considerar que éstos deberán respetar los Códigos de diseño reconocidos internacionalmente, como ISO, ASME (USA), CODAP (Francia), AD-MERKBLATT (Alemania), el Código Sueco de Recipientes a Presión (Suecia), el British Standard (Inglaterra) o la MIE-AP10 de España, en los apartados existentes (esta norma hace referencia a su vez a los métodos de cálculo y diseño de las anteriores). Si el depósito está construido “in situ”, y, fundamentalmente, si es de alta capacidad, deberá además tener en cuenta los efectos sísmicos y las acciones meteorológicas, por lo que deberá cumplir todas las condiciones tanto estando vacío como lleno.

El primer impacto a analizar será, por tanto, el peso tanto del líquido almacenado como del recipiente. El almacenaje de 20.000 l de hidrógeno líquido supone un peso aproximado de 14 kN. A esto habrá que incrementar el peso del recipiente contenedor, que debiendo soportar altas presiones y bajas temperaturas, pueden ser espesores importantes de material, que lleve a pesos mayores. Sin embargo, esto no supone una dificultad a la hora de incorporarlo a las edificaciones, ya que las estructuras de edificación pueden ser diseñadas para soportar estas cargas. En cambio, el coste final de éstas aumentará (entre ligera a moderadamente) en función del área ocupada por los depósitos.

Por otro lado un gran peligro que se debe afrontar al instalar estos recipientes en edificios será la afección que puedan sufrir los elementos estructurales del mismo ante una fuga. Esta posibilidad no es precisamente hipotética, ya que se estima que la evaporación y escape mínimos que se producirán en los depósitos es de alrededor del 1,7% diario.

Un escape de hidrógeno de un depósito criogénico causaría dos efectos diferentes: por una parte un enfriamiento brusco de todos los objetos y ocupantes que alcance y una expansión brusca del gas. Esto significa que todo lo que quede al alcance de una hipotética fuga –tanto si se trata de elementos de la propia instalación de hidrógeno (fundamentalmente del circuito primario y del depósito, como tuberías, válvulas, manómetros, niveles, etc.) como si se trata de elementos ajenos a dicha instalación – deberán soportar al menos la presión de prueba del depósito (la vaporización produce un enorme volumen de gas) y su temperatura, además de ser compatibles con el hidrógeno.

En la actualidad no es habitual verificar la presión en las estructuras de edificación en los casos de depósitos o silos, por lo que no es un parámetro frecuentemente manejado en el diseño y cálculo de estructuras. La incorporación de los depósitos de a los edificios supondría la inclusión de estos parámetros en la normativa estructural de edificación (CTE SE), que en estos momentos no se encuentra. Para encontrar alguna referencia hay que remitirse a la normativa de hormigón estructural (EHE), que contempla edificación y obra civil, y es en este último caso donde aparecen estos conceptos.

Las temperaturas de servicio a las que se suelen presentar las estructuras de edificios, no están preparadas para soportar muy bajas temperaturas. La exposición a temperaturas criogénicas causa una intensa fragilización de materiales como el acero, el aluminio o el hormigón, dando lugar a grietas en chapas o estructuras y pudiendo provocar el colapso de las mismas por rotura o desmoronamiento. Se han determinado casos de colapso de edificios realizados con estructuras metálicas expuestas a temperaturas de apenas -10°C .



Aun con toda la peligrosidad que presenta la fuga de hidrógeno, es aún más peligroso el riesgo de explosión, por lo que las normas de instalación de estos depósitos que se están publicando indican que deben ser dotados de válvulas de seguridad (al menos dos unidades) colocadas en la fase de gas – tras el gasificador –, de forma que la posibilidad de que sean bloqueadas por la formación de hielo sea mínima, y en comunicación permanente con el interior del recipiente.

Obviamente, la salida de estos elementos de seguridad debe estar dirigida de forma que no dañe los elementos estructurales del depósito o a las personas o bienes que puedan estar próximas (la temperatura del hidrógeno líquido causaría quemaduras de consideración o lesiones pulmonares a cualquier persona a la que alcanzase o que lo inhalase), ni debe crear condiciones peligrosas ambientales.

b.2.- Adaptación Arquitectónica.

En edificios de nueva construcción, podremos adaptar los anteriores efectos de varias maneras. La primera pueden ser variar el material con el que se ejecuta la estructura – al menos en las partes de la estructura del edificio susceptibles de encontrarse en el camino de una posible fuga –, como el hormigón o el acero estructural por otros materiales resistentes a estas condiciones de presión y temperatura y compatibles con el hidrógeno (que no sean atacados por éste). Un ejemplo podría ser el acero austénico al cromo-níquel, ya que es capaz de soportar una temperatura de -270°C o los aceros estructurales soldables de grano fino, para bajas temperaturas. Éstos últimos se presentan en calidades altas como S355ML y S460ML. Los altos límites elásticos de estos productos no hacen posible utilizar todas sus propiedades resistentes en edificación – provocaría altas deformaciones no compatibles con el uso del edificio – por lo no podrían aprovecharse todas sus cualidades. Éste hecho junto con el alto coste económico que tienen estos aceros, suponen un incremento notable al coste de la estructura. Sin embargo, sea cual sea el material elegido, se deberá considerar en el cálculo estructural la reducción progresiva del espesor del material, en caso de que el hidrógeno provoque éste efecto.

Otra forma de actuar podría ser el aislar térmicamente el elemento estructural con un material aislante de suficiente espesor como para que la temperatura en la cara exterior del elemento estructural no afecte a su comportamiento mecánico. Este material aislante deberá ser resistente al hidrógeno, es decir, se tratará de materiales no combustibles y de punto de fusión superior de 850°C , ya que, como se ha indicado, el hidrógeno gaseoso es altamente inflamable.

Finalmente, la tercera forma de protección estructural sería el separar el depósito de hidrógeno del elemento de estructura lo suficiente como para conseguir que el hidrógeno se haya calentado lo suficiente cuando lo alcance como para no afectarle.

El Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España ha fijado –en la ITC MIE-AP10– unas distancias mínimas que hay que dejar entre los límites del depósito con sus equipos auxiliares y los elementos estructurales (tabla 9), para diversos riesgos y en función de la siguiente clasificación de los depósitos:

A: Depósitos desde 450 a 5.000 litros.

B: Depósitos desde 5.001 a 20.000 litros.

C: Depósitos desde 20.001 a 60.000 litros.

D: Depósitos desde 60.001 a 200.000 litros.

E: Depósitos desde 200.001 a 400.000 litros.

F: Depósitos desde 400.001 a 2.000.000 litros.

De dicha tabla, para los depósitos a utilizar para las pilas de combustibles, debemos centrarnos en los depósitos de gases comburentes para el oxígeno y en los de gases inflamables para el hidrógeno. En el caso de existir varios depósitos en el mismo recinto, la separación recomendada entre ellos, siempre que sea posible, debería ser la semisuma de sus radios y siempre superior a 0,5 m. Las distancias indicadas en la tabla I se medirán siguiendo la posible trayectoria del gas en caso de escape contorneando las paredes de protección si existen, tanto en sentido horizontal como vertical, estimando además los ángulos rectos como equivalentes a 2,5 m. cuando los tramos que constituyan sus lados tengan una longitud mínima de 1,5 m.

Tamaño del depósito		A		B		C		D		E		F	
		Com b.	Infla m.	Co mb.	Infla m.	Co mb.	Infla m.	Co mb.	Infla m.	Co mb.	Infla m.	Co mb.	Infla m.
Tipo de riesgo	Locales de trabajo (edificaciones, vestuarios) (1)	3	5	5	10	7,5	15	10	20	10	20	10	30
	Sótanos, alcantarillados, Galerías servicio	5	5	5	10	7,5	10	7,5	10	10	20	10	20
	Motores, Interruptores (No antideflagrantes)	–	5	–	10	–	15	–	15	–	15	–	20
	Depósitos aéreos de material Inflamable	5	5	10	10	15	10	15	10	20	10	30	20
	Depósitos subterráneos de material Inflamable	5	5	5	5	7,5	5	10	5	15	5	20	10
	Vías públicas, carreteras, ferrocarriles	3	5	5	10	5	15	5	25	10	(2)	20	(2)
	Instalaciones con peligro de incendio (madera, plástico, etc.)	5	8	5	10	7,5	15	10	25	15	30	20	30

Llamas controladas (sopletes, mecheros, etc.)	5	7,5	5	10	7,5	15	10	25	15	30	15	30
Propiedad colindante	1	2	1,5	3	2	4	2	4	5	(2)	10	(2)
Proyección líneas eléctricas	–	8	–	15	5	15	5	15	3	15	5	15
Edificios habitables	5	7,5	7,5	10	10	12,5	12,5	15	15	(2)	15	(2)

(1) Se excluyen las zonas de manipulación y utilización del producto (talleres, zona de producción)

(2) Se aplicará lo indicado en distancias de seguridad.

Tabla 9: Distancias mínimas recomendadas. Fuente: ITC MIE-AP10. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.

Cuando no sea posible cumplir con dichas distancias, deberán justificarse todas las variaciones que se introduzcan y las medidas de otro orden que se tomen en sustitución. Si los depósitos se sitúan en recintos cerrados debe garantizarse la ventilación mediante procedimientos adecuados, tales como rejillas, ventiladores, etc., salvo en aquellos locales cuyas dimensiones permitan ubicarlo respetando una separación mínima de 15 m. con una pared y simultáneamente 5 m. en su dirección perpendicular.

Los depósitos para gases no inflamables con envolvente exterior de acero se considerarán protegidos por esta envolvente, debiendo en ese caso proteger las partes no incluidas dentro de la envolvente exterior (tuberías, equipos de control, válvulas, etc.).

La forma y dimensiones de las paredes de protección variarán dependiendo de los componentes del sistema y su colocación en el mismo. Las nuevas distancias se medirán bordeando dichas protecciones. Para garantizar la ventilación, en ningún caso se pueden colocar más de tres lados con estas paredes. En casos especiales en que sea necesario hacer un cierre con más de tres lados deben utilizarse muros de perfil autoventilante como los de la figura 10, ó colocar rejillas de aireación de dimensiones adecuadas.

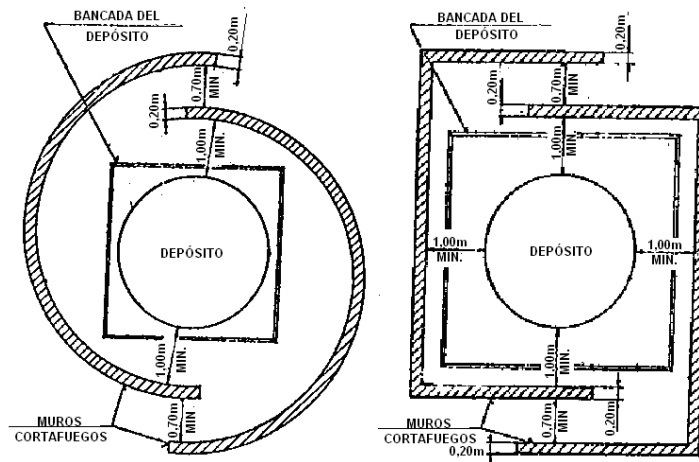


Figura 10.- Muros de perfil autoventilante. Fuente: ITC MIE-AP10. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.

Por último, la vaporización del hidrógeno licuado ocasiona un gran volumen de gas, desplazando el aire y ocasionando riesgo de asfixia. La extracción de estos escapes y de la nube de gas condensado que producen, debe realizarse de forma automática utilizando conductos de materiales que resistan el ataque del hidrógeno a temperaturas cercanas a su punto de ebullición y extractores de tipo antideflagrante.

CONCLUSIONES.

En el caso de los paneles solares, su implantación en los edificios presenta afecciones en la estructura que en algunos casos llegan a ser importantes, cuando éstos no se han tenido en cuenta inicialmente en la evaluación de cargas. La no previsión de las cargas puede tener consecuencias significativas, más aún cuando en edificios con demandas importantes bien de agua caliente necesaria bien eléctricas, las áreas de paneles solares son extensas.

Los paneles térmicos planos, que son los más pesados, no tienen gran incidencia en la situación global de cargas, ya que sus pesos no son importantes, del orden de $0,34 \text{ kN/m}^2$ incluyendo subestructura, y además se reduce las cargas previstas, ya que bien, no se ejecutan todos los acabados, tales como tejas, solados y acabados de grava, bien el área ocupada no recibe sobrecargas de uso y nieve.

Sin embargo, los equipos monoblock empiezan a tener cargas mayores, ya que al incorporar los depósitos de acumulación su peso aumenta de manera importante llegando a cargas cercanas a los $1,25 \text{ kN/m}^2$.

Donde ya es muy notable el aumento de cargas es en aquellas originadas por los contrapesos, que pueden ser de $4,50 \text{ kN/m}^2$, una carga que es la misma de todas las permanentes evaluadas inicialmente.

Valorando la variación entre las cargas previstas (permanentes sin incluir forjados, sobrecargas de uso y sobrecargas de nieve) y las actuantes (permanentes, equipos y contrapesos) se comprueba que en la totalidad de los casos evaluados aumentan. Los coeficientes de seguridad de las cargas empleados en el cálculo inicial, ponderando en función de su origen permanente y variable, se reduce en un 40 - 50 % en cubiertas plantas y un 35 - 80 % en cubiertas inclinadas, dependiendo de los tipos de cubiertas y los equipos instalados.



Las consecuencias del aumento significativo de cargas son en primer lugar, aumento de deformaciones, ya que en ELS las cargas son directamente mayores porque sus coeficientes de seguridad suelen coincidir con la unidad. En segundo lugar la reducción de la seguridad puede llevar a la estructura de cubierta cerca del colapso, especialmente en los casos de cubiertas ligeras o sensibles a un aumento de cargas significativo. En elementos locales, donde las cargas en vez de repartirse en un área de influencia, se transmiten directamente sobre los apoyos de los paneles (ya sean los rastreles para las tejas o en correas), la situaciones son más preocupantes si no se han dimensionado para ellos. Este hecho es la consecuencia fundamental de instalación de paneles solares en cubiertas inclinadas, y cuando mayor sea la inclinación, mayor es la repercusión, ya que en la evaluación inicial, las cargas son menores.

Se puede concluir que, aunque se pierda las inclinaciones óptimas a efectos de máxima captación, es recomendable reducir las inclinaciones de los paneles. Con ello se consigue reducir la superficie de exposición, se aumenta la superficie afectada y se reduce la carga del contrapeso necesario, por lo que el impacto es menor. También es importante hacer hincapié en la necesidad de una evaluación correcta de cargas, especialmente con las cargas de los equipos monoblock y los contrapesos.

Por otra parte, en el caso de los depósitos de almacenamiento de hidrógeno en forma líquida obtenida por criogenización, su impacto estructural es también considerable, tanto por su peso como por los ataques que una fuga a bajísima temperatura podrían ocasionar sobre los elementos de estructura.

Estos depósitos de almacenamiento deben situarse preferentemente al aire libre y sobre el nivel de la cubierta del edificio (si se colocan a nivel del suelo se deberán retirar considerablemente del edificio para evitar que la fuga del gas a bajísima temperatura pueda llegar a afectar a la estructura del inmueble hasta llegar a colapsarla).

Además, al destinarse a contener gases inflamables, cualquier elemento de protección meteorológica que se ubique sobre él debe ser de construcción ligera para facilitar la salida de la onda expansiva en caso de explosión y que ésta afecte lo menos posible a la estructura portante del edificio.

El diseño de la estructura deberá contemplar la presión de servicio de los depósitos, ser capaz de mantener sus propiedades resistentes a muy bajas temperaturas (utilizando para ello por ejemplo, aceros austeníticos o de grano fino o aislándolos convenientemente) y diseñarse para soportar las cargas introducidas.

En el diseño de los edificios también habrá que considerar que el emplazamiento del depósito será tal que permita el fácil acceso a los vehículos de abastecimiento y al personal autorizado, así como disponer de las canalizaciones necesarias para poder abastecer los depósitos desde el exterior.

REFERENCIAS.

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Seguridad Estructural

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación.

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Ahorro Energético

Stiebel Eltron, Catálogo de equipos

ITC MIE-AP 10. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales

Código Técnico de la Edificación. DB-SE. Ministerio de la Vivienda

Código Técnico de la Edificación. DB-SI. Ministerio de la Vivienda

Fichas de Datos de Seguridad. Carburos Metálicos

Aceros estructurales. Arcelor Mittal

Comisión Europea. Dirección General de Energía y Transportes