

Trabajo Fin de Grado

Aplicación del Power to Gas al sector residencial

Power to Gas in the residential sector

Autor

Gladys Sesé Alloza

Director

Luis Miguel Romeo Giménez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

Universidad de Zaragoza

2017



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Gladys Sesé Alloza,

con nº de DNI 73104509K en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

Aplicación del Power to Gas al sector residencial

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de Julio de 2017

Fdo: _____

Aplicación del Power to Gas al sector residencial

RESUMEN

El cambio climático es un tema actual y el uso de las energías renovables está en alza, siendo esenciales para conseguir un futuro energético de bajo carbono. Sin embargo, estas energías son fluctuantes e intermitentes por lo que la tecnología de almacenamiento es el factor clave para su implantación futura. El sistema Power to Gas se propone como un método alternativo para transformar la energía eléctrica renovable sobrante en hidrógeno. Este gas puede ser posteriormente convertido en metano sintético para poder satisfacer mediante su combustión la demanda térmica de una instalación.

Por lo tanto, el principal objetivo de este proyecto es el diseño y estudio económico de un sistema Power to Gas para cubrir las necesidades tanto eléctricas como térmicas de un complejo residencial. El estudio se centra en este sector dado que su consumo representa la tercera parte de las emisiones de gases efecto invernadero por lo que su potencial de mejora es muy alto.

En las primeras partes del proyecto se contextualiza el porqué del Power to Gas, hablando sobre el cambio climático, la contaminación por dióxido de carbono y sus técnicas de captura. También se habla de las energías renovables y de su integración en el sector residencial, destacando la solar fotovoltaica por ser la más utilizada. Además, se proponen edificios singulares para la implantación del Power to Gas en ellos, escogiendo las piscinas climatizadas como sector potencial de cambio por sus grandes consumos térmicos y eléctricos, estudiados en puntos sucesivos de la presente memoria.

Tras estos estudios se calcula el campo solar que satisface tanto la demanda eléctrica de la piscina climatizada tipo estudiada, como parte de la térmica. Se llega a la conclusión de que para satisfacer los consumos serían necesarios unos 3.000 m².

Con la energía eléctrica excedente establecida, se diseña el sistema Power to Gas, analizando cada uno de los componentes que forman parte de él. Estos son el electrolizador, el *buffer* de hidrógeno, el metanizador y la caldera.

Finalmente, se realiza un análisis económico de viabilidad de la instalación, llegando a la conclusión de que hoy en día la implantación Power to Gas en este sector residencial no es económicamente viable al resultar 15-38 ct/kWh más caro que la utilización de combustibles fósiles convencionales. Esto es debido a lo poco madura que todavía se encuentra la aplicación y a la baja eficiencia global.

Sin embargo, esta aplicación arroja ventajas importantes que hay que considerar si se quieren lograr los objetivos acordados en la COP21 de disminución de carbono. Esta tecnología podría evitar anualmente 140 toneladas de carbono, además de generar estabilidad eléctrica a la red. Por lo tanto, si su tecnología mejorase en los próximos años, se estaría hablando de una aplicación muy prometedora para ayudar a mitigar el cambio climático.

Índice

| | | |
|----------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 8 |
| 1.1. | ENERGÍAS RENOVABLES | 8 |
| 1.2. | CO ₂ | 11 |
| 1.3. | INTRODUCCIÓN AL POWER TO GAS (PtG) | 12 |
| 1.4. | OBJETIVOS..... | 13 |
| 2. | ENERGÍAS RENOVABLES EN EDIFICACIÓN..... | 15 |
| 2.1. | ESTADO DEL ARTE DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA EDIFICACIÓN 15 | |
| 2.1.1. | ENERGÍA EÓLICA | 16 |
| 2.1.2. | ENERGÍA SOLAR TÉRMICA | 16 |
| 2.1.3. | ENERGÍA DE LA BIOMASA | 17 |
| 2.1.4. | ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA | 17 |
| 2.2. | EDIFICIOS SINGULARES | 17 |
| 3. | CONSUMOS ENERGÉTICOS | 19 |
| 3.1. | CONSUMO ELÉCTRICO | 20 |
| 3.2. | CONSUMO TÉRMICO | 22 |
| 4. | DIMENSIONADO DEL CAMPO SOLAR | 26 |
| 4.1. | IRRADIANCIA | 26 |
| 4.2. | PERFORMANCE RATIO | 26 |
| 4.3. | RENDIMIENTO DEL PANEL FOTOVOLTAICO..... | 28 |
| 4.4. | SUPERFICIE DEL CAMPO SOLAR | 29 |
| 4.5. | PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA..... | 29 |
| 5. | CURVAS DE DEMANDA Y CONSUMO..... | 34 |
| 6. | DIMENSIONADO DEL SISTEMA POWER TO GAS..... | 36 |
| 6.1. | ELECTROLIZADOR..... | 36 |
| 6.1.1. | ESTADO DEL ARTE DE LOS ELECTROLIZADORES | 37 |
| 6.1.1.1. | Electrolizadores alcalinos (AEL, alkaline electrolysis) | 37 |

| | | |
|----------|--|----|
| 6.1.1.2. | Electrolizadores de membrana polimérica (PEM, polymer electrolyte membranes) | 37 |
| 6.1.1.3. | Electrolizadores de óxido sólido (SOEC, solid oxide electrolysis) .. | 37 |
| 6.1.2. | DIMENSIONADO DEL ELECTROLIZADOR..... | 38 |
| 6.2. | BUFFER DE HIDRÓGENO | 40 |
| 6.3. | METANIZADOR..... | 41 |
| 6.3.1. | TIPOS DE METANIZADORES | 41 |
| 6.3.1.1. | Metanizadores catalíticos | 42 |
| 6.3.1.2. | Metanizadores biológicos..... | 42 |
| 6.3.2. | DIMENSIONADO DEL METANIZADOR..... | 42 |
| 6.4. | CALDERA..... | 43 |
| 6.5. | RESULTADOS | 44 |
| 7. | VALORACIÓN ECONÓMICA..... | 50 |
| 7.1. | ANÁLISIS DE LA INVERSIÓN | 50 |
| 7.2. | VALORACIÓN ECONÓMICA DEMANDA ELÉCTRICA | 51 |
| 7.3. | VALORACIÓN ECONÓMICA DEMANDA TÉRMICA | 52 |
| 7.4. | BALANCE ECONÓMICO | 53 |
| 8. | CONCLUSIONES | 54 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 57 |
| | Bibliografía complementaria | 59 |
| | Índice de figuras..... | 61 |
| | Índice de tablas..... | 62 |
| | ANEXO A. CATÁLOGOS DE FABRICANTES..... | 64 |
| | A.1. CATÁLOGO MÓDULO FOTOVOLTAICO | 66 |
| | A.2. CATÁLOGO ELECTROLIZADORES | 67 |

1. INTRODUCCIÓN

Desde la entrada del siglo XXI el cambio climático ha sido uno de los temas más abordados por la humanidad. Su importancia va creciendo debido a la rapidez con la que aumentan los impactos ya visibles del mismo. El aumento de las temperaturas, el deshielo del Ártico con la consecuente subida del nivel del mar o el aumento de la severidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos son algunos de los impactos más destacados.

De este modo, la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) se ha convertido en una necesidad imprescindible para atenuar el proceso de cambio climático al que estamos asistiendo. Objetivo ineludible por lo tanto para investigadores, ciudadanos y gobierno y sus políticas energéticas. Ejemplo de ello son los esfuerzos en los que países de todo el mundo están implicados como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) o la 21ª Conferencia de las Partes (COP21).

Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) relacionadas con la producción y el uso de la energía, representan casi dos tercios de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [1]. Haciéndose esencial, de este modo, la transformación del sector energético para hacer frente al desafío climático.

Por ello, la preocupación por la contaminación medioambiental junto con aspectos como el incremento de los precios de los combustibles fósiles, la importación de estos combustibles, el agotamiento de los mismos o la eficiencia energética, han propiciado el desarrollo y la investigación en la búsqueda de tecnologías de generación de origen renovable para mitigar todos estos impactos, tanto medioambientales como económicos.

1.1. ENERGÍAS RENOVABLES

La importancia primordial de las energías renovables viene dada por el hecho de que no producen gases efecto invernadero, causa principal del calentamiento global, por lo que ayudan a luchar contra el cambio climático.

La concienciación sobre el cambio climático coge cada vez más importancia lo que conlleva a que el uso de las energías renovables esté en auge a pesar de las políticas restrictivas implantadas en España sobre el autoconsumo.

Entre los datos que respaldan esta teoría está el hecho de que las energías renovables en la península elevaron su cuota en el conjunto de la generación eléctrica el 41,1% frente al 36,9% del año anterior [2], tal y como se puede observar en la *Figura 1*.

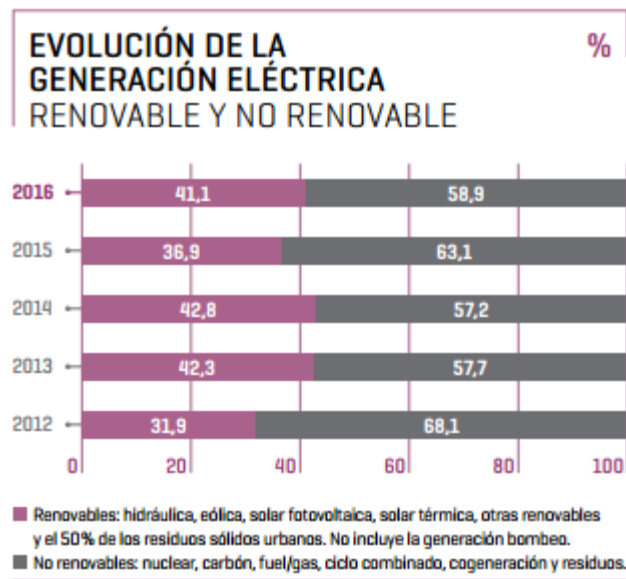


Figura 1. Evolución de la generación eléctrica renovable y no renovable [2].

Por lo tanto, y debido al uso de las energías renovables, lo más destacado ha sido el descenso de la aportación del carbón en la cobertura de la demanda eléctrica (un 13,7% frente al 20,3% del año anterior [2]) y como consecuencia, la reducción en gran medida de las emisiones de CO₂ derivadas de la generación eléctrica tal y como puede comprobarse en la *Figura 2*.

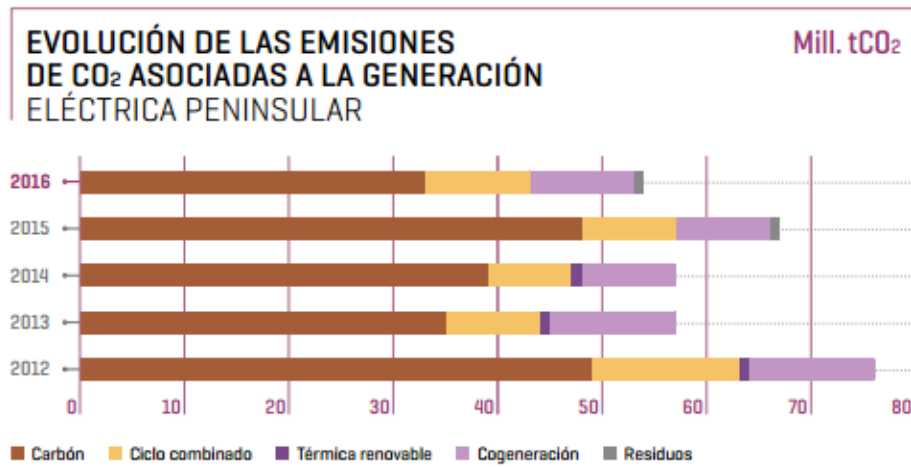


Figura 2. Evolución de las emisiones de CO₂ asociadas a la generación eléctrica peninsular [2].

Aparte de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y de tratarse de un recurso inagotable, cosa que no puede decirse de recursos como el gas, el carbón o el petróleo; otro de los aspectos que hay que tener muy en cuenta de las energías renovables es que evitan la dependencia energética exterior al tratarse de un recurso autóctono.

En el caso de España, esto es un punto clave a tener en cuenta porque es un país que destaca por la importación masiva de energía de otros países. En 2016 las importaciones superaron a las exportaciones en 7.313 GWh [2] y por lo tanto, la dependencia energética nacional se situó el año pasado en el 72,3% mientras que la de la UE es del 53,5% [3]. Esta situación sobrelleva invertir mucho dinero en la importación de combustibles de los que España no dispone (carece de yacimientos de petróleo y bolsas de gas) o son de peor calidad.

A esto hay que añadir que los principales exportadores de combustibles fósiles son países políticamente inestables. A modo de ejemplo se expone en la *Figura 3* los principales productores de petróleo.

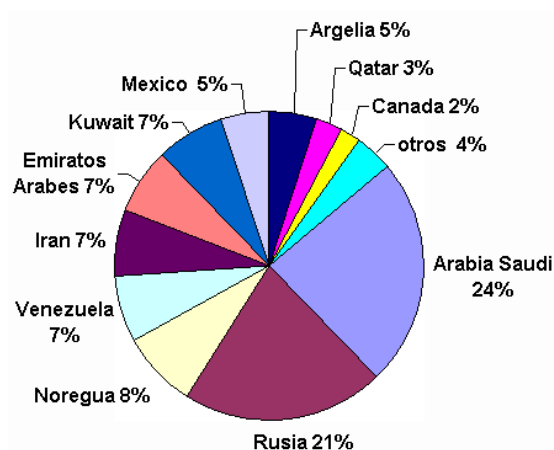


Figura 3. Principales productores de petróleo en el mundo [1] [4].

A pesar de todo ello, gracias a la aportación de las energías renovables, la dependencia energética se ha reducido un 1,5% respecto a 2015 [3] y, por todo ello, es muy importante seguir apostando por este tipo de energías, las cuales independizan nuestra economía de las fuentes de energía foráneas.

Sin embargo, pese a los alentadores desarrollos que se han producido en los últimos años debido a las mejoras tecnológicas y al incremento del uso de estas energías renovables, aún queda mucho camino por recorrer y muchos inconvenientes que solucionar.

Estas energías son fluctuantes e intermitentes por lo que en ocasiones dificultan la garantía de suministro y amenazan la estabilidad de la red eléctrica. De este modo, su almacenamiento a largo plazo y de gran capacidad juega un papel muy importante en su desarrollo.

A ello hay que añadir que tanto la situación política como financiera juegan un papel crítico en la sostenibilidad ambiental y son los que darán forma al panorama energético

en los próximos años tal y como la IEA menciona. Las decisiones de inversión son más importantes que nunca y en la actualidad España no destaca por su estabilidad ni económica ni política.

1.2. CO₂

Las emisiones de CO₂ son un creciente problema en la sociedad porque van aumentando conforme pasan los años (*Figura 4*). En la actualidad, el 80% de la energía global consumida se basa en combustibles fósiles [1].

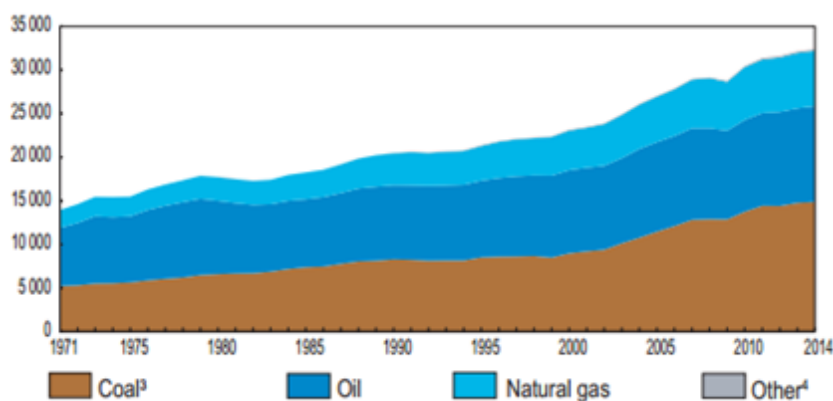


Figura 4. Emisiones de CO₂ derivadas de los combustibles fósiles en el mundo desde 1971 hasta 2014 en Mt [1].

2016 ha sido la primera vez en 40 años en la que ha habido una reducción en las emisiones de gases efecto invernadero no vinculada a una recesión económica. Esto nos lleva a pensar que no solo basta con incorporar la generación renovable a la producción de energía sino que hace falta añadir otras tecnologías que permitan reducir y estabilizar el aumento de las concentraciones atmosféricas de gases efecto invernadero. Una de las posibles tecnologías que se han desarrollado con este fin ha sido la captura y almacenamiento de carbono (CCS, *Carbon Capture and Storage*).

La captura y almacenamiento de CO₂ consiste en la separación de dicho compuesto del resto de gases que se originan durante la combustión de combustibles fósiles. Este CO₂ es posteriormente almacenado subterráneamente, en profundas minas de petróleo o gas, en formaciones salinas o en el fondo marino, entre otros lugares. Sin embargo, esta tecnología presenta inconvenientes que hay que tener en cuenta.

El primero de ellos es que almacenar dióxido de carbono puede causar daños futuros al medio ambiente. El vertido directo de CO₂ al mar puede provocar su acidificación, perjudicial para el ecosistema y, el almacenamiento del mismo tanto en yacimientos salinos como en minas, puede producir grietas a través de las cuales se liberarían tanto CO₂ como otros gases efecto invernadero [5].

Su segundo inconveniente es que el CO₂ debe estar en estado relativamente puro para que se pueda capturar, aumentándose así el precio de esta tecnología en gran medida. Por ejemplo, en el caso de las emisiones de las centrales eléctricas de carbón, el CO₂ supone únicamente un 10-12% en volumen por lo que para conseguir un secuestro eficaz en estos gases de escape el CO₂ ha de ser separado y concentrado [6]. Además de todo ello, según las estimaciones realizadas, la captura del CO₂ supone únicamente las tres cuartas partes del coste total. A este valor debe añadirse el coste de almacenamiento, transporte y mantenimiento.

Además, mediante esta tecnología solo estaría almacenándose una parte de los gases efecto invernadero. Hay otros gases como es el ejemplo de los óxidos de nitrógeno o los sulfuros que seguirían lanzándose a la atmósfera tras la combustión de los combustibles fósiles.

Por último, cabe destacar que todo lo mencionado anteriormente supone además un consumo energético adicional importante, con el consiguiente incremento de emisiones de CO₂. El aumento de las necesidades de combustible (25-40%) para la captura y compresión de CO₂ combinado junto con otros costes del sistema, supondría un aumento del 40% al 80% de los gastos de generación de energía respecto de los gastos de las centrales eléctricas convencionales [7].

En resumen, el principal problema de viabilidad para la captura de CO₂ reside en que además de su elevado costo, no se obtiene ningún beneficio posterior dado que ese CO₂ no se puede reutilizar en ninguna aplicación, simplemente es desechado. Por lo tanto, debido a las limitaciones que todavía tiene esta tecnología, suscita muchas cuestiones por resolver para ser viable tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

1.3. INTRODUCCIÓN AL POWER TO GAS (PtG)

Con el fin de encontrar una tecnología más rentable que la anteriormente mencionada, además de ayudar contra el cambio climático y crear un sistema de almacenamiento fiable para las energías renovables, se propone como alternativa la tecnología **Power to Gas (PtG)**.

El proceso Power to Gas consiste en la obtención de hidrógeno mediante la conversión por electrólisis (división del agua en hidrógeno y oxígeno) de agua y energía renovable excedente [8]. Posteriormente, el hidrógeno producido puede combinarse con CO₂, que puede obtenerse a través de varios métodos como es el ejemplo de la oxidación [9] [10], eliminando así la necesidad de capturar y separar externamente el CO₂. El gas sintético resultante de este proceso es conocido por su denominación en inglés “syngas” (SNG, *Synthetic Natural Gas*) y resulta ser a efectos prácticos igual que el metano (CH₄).

De este modo, puede ser utilizado en instalaciones de gas natural, como combustible de motor o puede inyectarse directamente en las redes de distribución de gas existentes, pudiéndose transportar de esta manera la misma cantidad de energía que por las redes eléctricas pero 20 veces más barato y con una capacidad de almacenamiento mucho mayor. Sin embargo, el objetivo de este proyecto es su aplicación al sector residencial por lo que se estudiará su utilización en el primer caso mencionado.

En cuanto a las ventajas destacables de esta tecnología prima la de aprovechar y almacenar de una manera fiable la electricidad sobrante de la generación renovable. Esto reduciría en gran medida la dependencia de las importaciones de gas natural y de sus reservas.

Además, con esta tecnología se obtiene energía de una manera limpia dado que el carbono que se produce en la combustión se compensa con el que se ha usado al principio del proceso (proceso neutro). Así mismo, no se liberan otro tipo de gases nocivos y se para el proceso de extracción y preparación del gas natural en el que se expulsan grandes cantidades de gases efecto invernadero.

Por lo tanto, el extra de ser un proceso comprometido con el medio ambiente y, con el aliciente de que permite encontrar un uso al CO₂ existente culpable del efecto invernadero, pueden convertirlo en una de las posibles soluciones en el ámbito de la mitigación del cambio climático.

1.4. OBJETIVOS

Como consecuencia, el objetivo del presente documento es la realización del diseño y el análisis de la viabilidad económica de la implantación del sistema Power to Gas en una piscina climatizada como modo ejemplo de sector residencial. Para ello también se dimensionará el campo solar que la piscina climatizada debería tener tanto para satisfacer la demanda energética del complejo como para reducir la demanda térmica mediante el aprovechamiento del exceso de generación gracias al Power to Gas.

Para poder alcanzar estos objetivos el proyecto se ha estructurado en los siguientes puntos:

- Revisión bibliográfica de las energías renovables en la edificación y estudio de edificios singulares para la posible implantación del Power to Gas (*Capítulo 2*).
- Valoración del consumo energético, tanto eléctrico como térmico, de una piscina climatizada la cual se toma como ejemplo tipo (*Capítulo 3*).
- Dimensionado del campo solar para el complejo residencial a estudio. El campo solar se dimensionará teniendo en cuenta dos emplazamientos distintos y cuatro meses tipo (*Capítulo 4*).
- Análisis de las curvas de demanda y consumo para poder obtener la energía eléctrica sobrante y calcular de esta manera el Power to Gas (*Capítulo 5*).

- Dimensionado y estudio del sistema Power to Gas compuesto por electrolizador, buffer de H₂, metanizador y caldera de combustión (*Capítulo 6*).
- Valoración económica en el *Capítulo 7* del sistema estudiado.
- Análisis global de los resultados obtenidos y exposición de las conclusiones alcanzadas mediante la información recabada (*Capítulo 8*).

Destacar que tanto para el cálculo del sistema Power to Gas como para el cálculo del dimensionado del campo solar se han utilizado hojas de cálculo. Utilizándose además en este último caso la página web PVGIS que proporciona datos sobre la radiación solar. Por último, para el dimensionado del Power to Gas también se ha empleado el programa ofimático EES (*Engineering Equation Solver*).

2. ENERGÍAS RENOVABLES EN EDIFICACIÓN

La demanda energética de los edificios representa la tercera parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, y se espera que siga creciendo en los próximos años [11].

Por lo tanto, mejorar la eficiencia energética en el sector residencial, no solo ahorraría costes gracias a la reducción de las importaciones de petróleo y de gas natural, sino que podría ayudar a paliar el efecto del cambio climático.

De este modo, debido al debate del cambio climático y al paulatino aumento del precio de los combustibles fósiles, será cada vez más común diseñar edificios basándose principalmente en el consumo de energía, así como la rehabilitación energética de edificios antiguos. Es en este punto donde la integración de las energías renovables en el sector residencial adoptará un papel muy importante.

2.1. ESTADO DEL ARTE DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA EDIFICACIÓN

El objetivo de reducir el consumo energético en el sector residencial ha generado el concepto de edificios de energía cero (EEC) o edificios energía plus; edificios en los que la energía proviene del propio edificio mediante fuentes de energía renovables. Aunque estos edificios siguen siendo poco frecuente, están ganando paulatinamente importancia y popularidad.

Dentro del marco legislativo europeo, los edificios de consumo de energía cero han generado un gran interés, propiciando un compromiso sobre la implementación efectiva de los mismos. La Directiva sobre Eficiencia Energética (EED 2012/27/UE), adoptada en octubre de 2012, incluye el requerimiento a los Estados miembros de desarrollar estrategias de renovación de su parque de edificios a largo plazo [12].

En el caso de España, se están instaurando gradualmente estas directivas europeas. Sin embargo, aunque por ejemplo se han implantado algunas iniciativas para reducir el consumo de energía en las escuelas, este proceso es muy lento y aún no existe una hoja de ruta específica.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, uno de los pilares básicos para mejorar la eficiencia energética del sector residencial consiste en la integración de las energías renovables en los edificios.

Son muchos y muy distintos los sistemas renovables que existen en la actualidad. Sin embargo, hay que ser realista a la hora de escoger los tipos de tecnologías a utilizar para que resulten sobre todo económicamente viables. Por ello, en este contexto de viabilidad, se han resumido las principales energías renovables que destacan en el ámbito residencial.

2.1.1. ENERGÍA EÓLICA

En los últimos años, España se ha colocado en los primeros lugares del mundo en cuanto a generación eólica se refiere. Este enorme potencial reflejado podría ser empleado en el sector residencial, sector en el que aún no se ha explotado esta tecnología.

El sector eólico está en constante movimiento desarrollando micro aerogeneradores eficientes y competitivos e innovando distintas tecnologías aplicables a edificios y viviendas. En la actualidad, los aerogeneradores existentes en el mercado para una instalación típica de uso doméstico son capaces de generar una potencia eléctrica inferior a 100 kW.

Sin embargo, la mini eólica aplicada al sector residencial sigue estando poco desarrollada y existen muy pocos casos de implantación. Su difícil instalación frente a la fotovoltaica hace que esta última sea la preferida y la más económica en la actualidad.

Por ello, como este proyecto se pretende acercar lo máximo posible a un caso actual, la aportación de este tipo de tecnología queda descartada en primera instancia aunque en posteriores estudios se podría plantear la posibilidad de crear un sistema híbrido añadiendo un pequeño generador a la instalación.

2.1.2. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La principal aplicación de la energía solar térmica en el sector residencial es la producción de agua caliente sanitaria (ACS). Por lo tanto, es ideal para el calentamiento de agua en piscinas, para cubrir las demandas de calefacción en suelo radiante o por ejemplo para refrigeración mediante uso de equipos de absorción.

Sin embargo, esta energía solo permite cubrir la demanda térmica de la instalación por lo que la utilización junto con el Power to Gas quedaría desestimada.

2.1.3. ENERGÍA DE LA BIOMASA

Cada vez son más los edificios que emplean calderas de biomasa. Utilizan generalmente como materia prima residuos de actividades agrícolas y forestales o subproductos de la transformación de la madera con el objetivo de generar energía térmica para agua caliente sanitaria y calefacción.

Como consecuencia, al igual que la energía solar térmica, su utilización junto con el Power to Gas también quedaría desestimada.

2.1.4. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La radiación solar incidente en la superficie terrestre alcanza valores superiores a lo consumido por los humanos en todo un año. Por ello, puesto que es la única que podría satisfacer la creciente demanda energética existente en el planeta, la energía solar está jugando un papel de creciente importancia.

Es por este motivo por lo que se están investigando materiales alternativos para mejorar la eficiencia de las células fotovoltaicas y sustituyendo materiales de construcción convencionales como tragaluces, claraboyas o fachadas por materiales como vidrio fotovoltaico para incorporar directamente esta tecnología en los edificios y satisfacer así las altas demandas eléctricas de los mismos.

Uno de los últimos ejemplos de integración de esta energía en España ha sido Supermercados Deza, donde se han instalado sobre su cubierta 32,4 kW fotovoltaicos destinados al autoconsumo, evitando así la emisión de más de 25 toneladas de CO₂ al año [13].

Por lo tanto, debido a su relevante desarrollo y por su amplia y cada vez más frecuente implantación, se ha considerado que la energía **solar fotovoltaica** sea la tecnología que va a satisfacer los consumos eléctricos del sector residencial a estudio. Por ello, los cálculos de la instalación renovable se centrarán alrededor de esta tecnología.

2.2. EDIFICIOS SINGULARES

Para que resulte interesante la aplicación del sistema Power to Gas en un complejo residencial, el edificio debe satisfacer las condiciones de solicitar tanto una gran demanda eléctrica como térmica.

Algunos de los complejos que cumplen esta condición son los hipermercados (debido al gran consumo de sus cámaras frigoríficas), los centros de ocio, los hospitales y los hoteles. Estos edificios, según el Código Técnico de Edificación (CTE), tienen la

obligatoriedad de instalar sistemas solares fotovoltaicos en caso de superar las dimensiones establecidas en la *Tabla 1* [14]. Esta situación podría aprovecharse para implantar el sistema Power to Gas dado que la inversión en renovables sería obligatoria y no supondría un gasto añadido.

| TIPO DE USO | LIMITE DE APLICACIÓN |
|---------------------------------|----------------------|
| Hipermercado | 5000 m2 contruidos |
| Multitiendas y centros de ocio | 3000 m2 contruidos |
| Nave de almacenamiento | 10000 m2 contruidos |
| Administrativos | 4000 m2 contruidos |
| Hoteles y hostales | 100 plazas |
| Hospitales y clínicas | 100 camas |
| Pabellones de recintos feriales | 10000 m2 contruidos |

Tabla 1. Edificios con obligación de instalar sistemas solares fotovoltaicos [14]

Las escuelas es otro de los sectores destacables para implantar el sistema Power to Gas. Se ha estudiado que el consumo de las mismas se mueve entre los 68-122 kWh/m² al año, con una contribución térmica del 60-90% [12], demostrando de esta manera su gran potencial de aplicación.

También cabe mencionar otros edificios singulares como las residencias para ancianos, las grandes urbanizaciones de propietarios así como edificios de oficinas, grandes consumidores tanto de energía eléctrica como térmica. El palacio de hielo de Jaca también podría ser una propuesta interesante.

Entre los edificios privados es destacable el sector industrial. Sin embargo, sus consumos son muy dependientes del sector en el que trabajan por lo que el estudio del Power to Gas no se podría generalizar, además de que la integración de las energías renovables es más compleja.

Por último, mencionar los complejos deportivos, resaltando el consumo de las piscinas climatizadas por necesitar grandes cantidades de agua caliente. Se ha estimado que en España existen aproximadamente 1.000 piscinas climatizadas [15] y como se puede comprobar en el *Apartado 3*, la demanda térmica en una piscina climatizada es muy elevada por lo que su impacto ambiental es importante a largo plazo.

Por estos motivos, se ha considerado que las **piscinas climatizadas** son un sector singular con gran potencial de cambio y de este modo se han elegido para estudiar la propuesta del Power to Gas. Además, muchas de ellas ya disponen de una instalación solar fotovoltaica en su cubierta por lo que la introducción del Power to Gas en estas instalaciones no supondría una inversión económica tan severa y su integración sería mucho más fácil.

3. CONSUMOS ENERGÉTICOS

El primer paso que hay que llevar a cabo para realizar el dimensionado del Power to Gas consiste en analizar los consumos de energía eléctrica y térmica de la instalación a estudio.

Los datos de consumo utilizados en este proyecto como base para el cálculo del sistema se han extraído del proyecto fin de carrera *“Auditoría energética en una piscina climatizada”* de Antonio Gayo Píriz [15] donde se muestran en detalle todos los cálculos realizados.

La piscina climatizada estudiada en el proyecto antes mencionado se encuentra dentro del Polideportivo Municipal “José Caballero” de Alcobendas, Madrid.

En el caso de este proyecto se ha elegido como caso tipo de piscina climatizada y por ello, se va a suponer que todos los datos utilizados van a ser los mismos para cualquier localización española. De todas maneras, los valores calculados no varían significativamente por la localización ya que las condiciones interiores que se deben mantener en una piscina son muy similares.

Los cálculos realizados en apartados posteriores de la presente memoria se han centrado en cuatro meses tipo, Febrero, Mayo, Junio y Noviembre, meses representativos de las cuatro estaciones del año. Por lo tanto, se han recopilado los datos necesarios de estos meses con ayuda de una hoja de cálculo y se ha trabajado sobre ellos realizando diversos cálculos.

Otros datos de interés para su empleo en el proyecto son:

- Se ha supuesto que los meses de uso de la piscina son desde septiembre hasta junio ya que los meses de julio y agosto se utiliza como piscina de verano.
- Las horas de funcionamiento son 15 de lunes a viernes de (8:30-23:30) y 2 los fines de semana (8:30-10:30). Por lo tanto, se encuentra en funcionamiento unas 4120 horas al año.
- La ocupación media diaria es de 110 personas.

Con estos datos se puede adelantar que tanto el consumo energético como el térmico serán elevados debido al uso de la instalación.

3.1. CONSUMO ELÉCTRICO

En el consumo eléctrico se han tenido en cuenta los consumos de la enfriadora, el ventilador de la torre de refrigeración, los ventiladores de los climatizadores y las bombas; así como se han considerado otros posibles pequeños puntos de consumo de electricidad como puede ser el caso de los secadores, la iluminaria y neveras de venta de bebidas entre otros casos [15].

A continuación se muestra en las *Tablas 2-5* un resumen de los consumos, en términos de potencia y energía, de los cuatro meses estudiados.

| Hora | Potencia enfriadora (kW) | Potencia resto equipos (kW) | Potencia iluminación (kW) | Potencia equipos pequeños (kW) | Potencia total (kW) |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 0 | 16,43 | 47,99 | 0 | 0 | 64,42 |
| 1 | 16,43 | 47,99 | 0 | 0 | 64,42 |
| 2 | 16,43 | 47,99 | 0 | 0 | 64,42 |
| 3 | 16,43 | 47,99 | 0 | 0 | 64,42 |
| 4 | 16,43 | 47,99 | 0 | 0 | 64,42 |
| 5 | 16,43 | 47,99 | 0 | 0 | 64,42 |
| 6 | 16,49 | 47,99 | 0 | 0 | 64,48 |
| 7 | 16,49 | 47,99 | 0 | 0 | 64,48 |
| 8 | 16,49 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 71,10 |
| 9 | 16,43 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 71,04 |
| 10 | 22,30 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 76,91 |
| 11 | 22,23 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 76,84 |
| 12 | 22,17 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 76,78 |
| 13 | 22,17 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 76,78 |
| 14 | 28,20 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 82,81 |
| 15 | 28,20 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 82,81 |
| 16 | 28,20 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 82,81 |
| 17 | 28,20 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 82,81 |
| 18 | 28,20 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 82,81 |
| 19 | 28,27 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 82,88 |
| 20 | 22,17 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 76,78 |
| 21 | 22,23 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 76,84 |
| 22 | 22,23 | 47,99 | 5,96 | 0,66 | 76,84 |
| 23 | 22,23 | 47,99 | 0 | 0 | 70,22 |
| Energía al día (kWh) | 512 | 1.151,75 | 89,39 | 9,85 | 1.762,47 |
| Energía al mes (kWh) | 14.322 | 32.249 | 2.503 | 275,83 | 49.349,27 |

Tabla 2. Consumos eléctricos Febrero.

Una de las conclusiones que se extrae de las *Tablas 2-5* es que la potencia consumida por la enfriadora aumenta del orden de 15.000 kWh/mes en los meses de primavera y verano respecto otoño e invierno. Esto es debido a que la potencia frigorífica que consume la enfriadora para deshumectar el aire de la piscina depende de las condiciones del exterior. Por ello, cuanto más alta sea la temperatura exterior, mayor será el consumo de la enfriadora. Este es el equipo que más pérdidas genera.

| Hora | Potencia enfriadora (kW) | Potencia resto equipos (kW) | Potencia iluminación (kW) | Potencia equipos pequeños (kW) | Potencia total (kW) |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 0 | 39,36 | 47,98 | 0 | 0 | 87,34 |
| 1 | 38,33 | 47,98 | 0 | 0 | 86,31 |
| 2 | 28,74 | 47,98 | 0 | 0 | 76,72 |
| 3 | 29,52 | 47,98 | 0 | 0 | 77,50 |
| 4 | 28,54 | 47,98 | 0 | 0 | 76,52 |
| 5 | 28,81 | 47,98 | 0 | 0 | 76,79 |
| 6 | 28,27 | 47,98 | 0 | 0 | 76,25 |
| 7 | 28,27 | 47,98 | 0 | 0 | 76,25 |
| 8 | 33,37 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 84,46 |
| 9 | 30,58 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 81,67 |
| 10 | 39,15 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 90,24 |
| 11 | 39,71 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 90,80 |
| 12 | 41,68 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 92,77 |
| 13 | 42,53 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 93,62 |
| 14 | 41,25 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 92,34 |
| 15 | 51,79 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 102,88 |
| 16 | 53,72 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 104,81 |
| 17 | 53,39 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 104,48 |
| 18 | 53,39 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 104,48 |
| 19 | 55,08 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 106,17 |
| 20 | 51,49 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 102,58 |
| 21 | 41,68 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 92,77 |
| 22 | 40,94 | 47,98 | 2,51 | 0,59 | 92,03 |
| 23 | 40,15 | 47,98 | 0 | 0 | 88,13 |
| Energía al día (kWh) | 959,74 | 1.151,55 | 37,68 | 8,90 | 2.157,86 |
| Energía al mes (kWh) | 29.752 | 35.698 | 1.168 | 275,83 | 66.893,77 |

Tabla 3. Consumos eléctricos Mayo.

| Hora | Potencia enfriadora (kW) | Potencia resto equipos (kW) | Potencia iluminación (kW) | Potencia equipos pequeños (kW) | Potencia total (kW) |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 0 | 53,01 | 47,96 | 0 | 0 | 100,97 |
| 1 | 52,21 | 47,96 | 0 | 0 | 100,17 |
| 2 | 42,12 | 47,96 | 0 | 0 | 90,08 |
| 3 | 42,61 | 47,96 | 0 | 0 | 90,57 |
| 4 | 41,48 | 47,96 | 0 | 0 | 89,44 |
| 5 | 40,00 | 47,96 | 0 | 0 | 87,96 |
| 6 | 38,60 | 47,96 | 0 | 0 | 86,56 |
| 7 | 39,22 | 47,96 | 0 | 0 | 87,18 |
| 8 | 41,01 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 91,07 |
| 9 | 43,89 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 93,95 |
| 10 | 55,20 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 105,26 |
| 11 | 55,79 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 105,85 |
| 12 | 59,33 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 109,39 |
| 13 | 59,33 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 109,39 |
| 14 | 59,23 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 109,29 |
| 15 | 60,48 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 110,59 |
| 16 | 59,23 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 109,29 |
| 17 | 71,52 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 121,58 |
| 18 | 71,52 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 121,58 |
| 19 | 59,23 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 109,29 |
| 20 | 56,90 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 106,96 |
| 21 | 55,70 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 105,76 |
| 22 | 56,25 | 47,96 | 1,48 | 0,61 | 106,31 |
| 23 | 53,39 | 47,96 | 0 | 0 | 101,35 |
| Energía al día (kWh) | 1.267,25 | 1.151,07 | 22,23 | 9,19 | 2.449,74 |
| Energía al mes (kWh) | 38.017,50 | 34.532 | 667 | 275,83 | 73.492,33 |

Tabla 4. Consumos eléctricos Junio.

| Hora | Potencia enfriadora (kW) | Potencia resto equipos (kW) | Potencia iluminación (kW) | Potencia equipos pequeños (kW) | Potencia total (kW) |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 0 | 16,49 | 48,01 | 0 | 0 | 64,50 |
| 1 | 10,86 | 48,01 | 0 | 0 | 58,87 |
| 2 | 10,91 | 48,01 | 0 | 0 | 58,92 |
| 3 | 10,91 | 48,01 | 0 | 0 | 58,92 |
| 4 | 10,91 | 48,01 | 0 | 0 | 58,92 |
| 5 | 10,95 | 48,01 | 0 | 0 | 58,96 |
| 6 | 10,95 | 48,01 | 0 | 0 | 58,96 |
| 7 | 10,95 | 48,01 | 0 | 0 | 58,96 |
| 8 | 10,95 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 65,14 |
| 9 | 10,91 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 65,10 |
| 10 | 16,08 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 70,27 |
| 11 | 22,23 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 76,42 |
| 12 | 22,17 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 76,36 |
| 13 | 29,90 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 84,09 |
| 14 | 29,03 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 83,22 |
| 15 | 29,46 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 83,65 |
| 16 | 29,03 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 83,22 |
| 17 | 28,14 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 82,33 |
| 18 | 22,13 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 76,32 |
| 19 | 22,17 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 76,36 |
| 20 | 16,39 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 70,58 |
| 21 | 16,43 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 70,62 |
| 22 | 16,43 | 48,01 | 5,56 | 0,613 | 70,62 |
| 23 | 16,49 | 48,01 | 0 | 0 | 64,50 |
| Energía al día (kWh) | 430,87 | 1.152,23 | 83,43 | 9,19 | 1.675,73 |
| Energía al mes (kWh) | 12.925 | 34.567 | 2.503 | 275,83 | 50.271,93 |

Tabla 5. Consumos eléctricos Noviembre.

Otro de los datos a destacar es que la potencia total del resto de los equipos, entre los cuales se incluyen el ventilador de la torre de refrigeración, los ventiladores de los climatizadores y las bombas se ha considerado constante a lo largo de las estaciones al igual que la potencia de los equipos pequeños.

Por último, destacar que la potencia consumida por la luminaria es mucho menor en los meses de primavera y verano dado que al haber más horas de sol su utilización no es tan necesaria.

3.2. CONSUMO TÉRMICO

En cuanto al consumo térmico se han tenido en cuenta las pérdidas de calor por evaporación anual, por renovación de aire de la piscina, por renovación del agua de la piscina, por renovación del aire de los vestuarios, el consumo de agua caliente sanitaria (ACS) y por último se han considerado las pérdidas por conducción, convección y radiación.

En las *Tablas 6-9* se expone un resumen de los consumos, en términos de potencia y energía, de los cuatro meses en estudio.

| Hora | Evaporación (kW) | Renovación aire piscina (kW) | Renovación agua piscina (kW) | Renovación aire vestuarios (kW) | ACS (kW) | Conducción, convección y radiación (kW) | Potencia total (kW) |
|-----------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------|---|---------------------|
| 0 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,26 | 5,65 | 28,85 | 227,32 |
| 1 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,43 | 5,65 | 28,85 | 227,49 |
| 2 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,62 | 5,65 | 28,85 | 227,68 |
| 3 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,73 | 5,65 | 28,85 | 227,79 |
| 4 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,91 | 5,65 | 28,85 | 227,97 |
| 5 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,90 | 5,65 | 28,85 | 227,96 |
| 6 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 8,02 | 5,65 | 28,85 | 228,08 |
| 7 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 8,08 | 5,65 | 28,85 | 228,14 |
| 8 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 8,07 | 5,65 | 28,85 | 228,13 |
| 9 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,82 | 5,65 | 28,85 | 227,88 |
| 10 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,30 | 5,65 | 28,85 | 227,36 |
| 11 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,75 | 5,65 | 28,85 | 226,81 |
| 12 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,22 | 5,65 | 28,85 | 226,28 |
| 13 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,72 | 5,65 | 28,85 | 225,78 |
| 14 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,67 | 5,65 | 28,85 | 225,73 |
| 15 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,40 | 5,65 | 28,85 | 225,46 |
| 16 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,39 | 5,65 | 28,85 | 225,45 |
| 17 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,43 | 5,65 | 28,85 | 225,49 |
| 18 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,67 | 5,65 | 28,85 | 225,73 |
| 19 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,99 | 5,65 | 28,85 | 226,05 |
| 20 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,32 | 5,65 | 28,85 | 226,38 |
| 21 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,55 | 5,65 | 28,85 | 226,61 |
| 22 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,69 | 5,65 | 28,85 | 226,75 |
| 23 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,78 | 5,65 | 28,85 | 226,84 |
| Energía al día (kWh) | 1.412 | 2.486,39 | 555 | 164 | 135,57 | 692,43 | 5.445,39 |
| Energía al mes (kWh) | 39.536 | 69.619 | 15.540 | 4.584 | 3.796 | 19.388 | 152.463 |

Tabla 6. Consumos térmicos Febrero.

| Hora | Evaporación (kW) | Renovación aire piscina (kW) | Renovación agua piscina (kW) | Renovación aire vestuarios (kW) | ACS (kW) | Conducción, convección y radiación (kW) | Potencia total (kW) |
|-----------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------|---|---------------------|
| 0 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,51 | 4,51 | 28,44 | 223,02 |
| 1 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,73 | 4,73 | 28,44 | 223,46 |
| 2 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,05 | 5,05 | 28,44 | 224,10 |
| 3 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,42 | 5,42 | 28,44 | 224,84 |
| 4 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,73 | 5,73 | 28,44 | 225,46 |
| 5 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,94 | 5,94 | 28,44 | 225,88 |
| 6 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,10 | 6,10 | 28,44 | 226,20 |
| 7 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,25 | 6,25 | 28,44 | 226,50 |
| 8 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,77 | 5,77 | 28,44 | 225,54 |
| 9 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,19 | 5,19 | 28,44 | 224,38 |
| 10 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,47 | 4,47 | 28,44 | 222,94 |
| 11 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,93 | 3,93 | 28,44 | 221,86 |
| 12 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,43 | 3,43 | 28,44 | 220,86 |
| 13 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,03 | 3,03 | 28,44 | 220,06 |
| 14 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,57 | 2,57 | 28,44 | 219,14 |
| 15 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,64 | 2,64 | 28,44 | 219,28 |
| 16 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,43 | 2,43 | 28,44 | 218,86 |
| 17 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,39 | 2,39 | 28,44 | 218,78 |
| 18 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,43 | 2,43 | 28,44 | 218,86 |
| 19 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,63 | 2,63 | 28,44 | 219,26 |
| 20 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,75 | 2,75 | 28,44 | 219,50 |
| 21 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,34 | 3,34 | 28,44 | 220,68 |
| 22 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,69 | 3,69 | 28,44 | 221,38 |
| 23 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,12 | 4,12 | 28,44 | 222,24 |
| Energía al día (kWh) | 1.412 | 2.486,39 | 555 | 99 | 133,97 | 1.412 | 682,65 |
| Energía al mes (kWh) | 43.772 | 77.078 | 17.205 | 3.055 | 4.153 | 43.772 | 21.162 |

Tabla 7. Consumos térmicos Mayo.

| Hora | Evaporación (kW) | Renovación aire piscina (kW) | Renovación agua piscina (kW) | Renovación aire vestuarios (kW) | ACS (kW) | Conducción, convección y radiación (kW) | Potencia total (kW) |
|-----------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------|---|---------------------|
| 0 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,03 | 5,47 | 25,77 | 219,82 |
| 1 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,39 | 5,47 | 25,77 | 220,18 |
| 2 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,70 | 5,47 | 25,77 | 220,49 |
| 3 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,20 | 5,47 | 25,77 | 220,99 |
| 4 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,47 | 5,47 | 25,77 | 221,26 |
| 5 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,73 | 5,47 | 25,77 | 221,52 |
| 6 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,03 | 5,47 | 25,77 | 221,82 |
| 7 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,08 | 5,47 | 25,77 | 221,87 |
| 8 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,33 | 5,47 | 25,77 | 221,12 |
| 9 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,75 | 5,47 | 25,77 | 220,54 |
| 10 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 3,03 | 5,47 | 25,77 | 219,82 |
| 11 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,58 | 5,47 | 25,77 | 219,37 |
| 12 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,06 | 5,47 | 25,77 | 218,85 |
| 13 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 1,60 | 5,47 | 25,77 | 218,39 |
| 14 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 1,15 | 5,47 | 25,77 | 217,94 |
| 15 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 0,99 | 5,47 | 25,77 | 217,78 |
| 16 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 0,87 | 5,47 | 25,77 | 217,66 |
| 17 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 0,77 | 5,47 | 25,77 | 217,56 |
| 18 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 0,77 | 5,47 | 25,77 | 217,56 |
| 19 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 0,88 | 5,47 | 25,77 | 217,67 |
| 20 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 0,98 | 5,47 | 25,77 | 217,77 |
| 21 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 1,59 | 5,47 | 25,77 | 218,38 |
| 22 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,13 | 5,47 | 25,77 | 218,92 |
| 23 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 2,58 | 5,47 | 25,77 | 219,37 |
| Energía al día (kWh) | 1.412 | 2.486,40 | 555 | 64 | 131,17 | 618,40 | 5.266,97 |
| Energía al mes (kWh) | 42.360 | 74.592 | 16.650 | 1.920 | 3.935 | 18.552 | 158.009 |

Tabla 8. Consumos térmicos Junio.

| Hora | Evaporación (kW) | Renovación aire piscina (kW) | Renovación agua piscina (kW) | Renovación aire vestuarios (kW) | ACS (kW) | Conducción, convección y radiación (kW) | Potencia total (kW) |
|-----------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------|---|---------------------|
| 0 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 8,31 | 5,44 | 28,94 | 228,25 |
| 1 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 8,58 | 5,44 | 28,94 | 228,52 |
| 2 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 8,97 | 5,44 | 28,94 | 228,91 |
| 3 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 9,16 | 5,44 | 28,94 | 229,10 |
| 4 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 9,36 | 5,44 | 28,94 | 229,30 |
| 5 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 9,56 | 5,44 | 28,94 | 229,50 |
| 6 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 9,69 | 5,44 | 28,94 | 229,63 |
| 7 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 9,76 | 5,44 | 28,94 | 229,70 |
| 8 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 9,86 | 5,44 | 28,94 | 229,80 |
| 9 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 9,00 | 5,44 | 28,94 | 228,94 |
| 10 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,89 | 5,44 | 28,94 | 227,83 |
| 11 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,81 | 5,44 | 28,94 | 226,75 |
| 12 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,84 | 5,44 | 28,94 | 225,78 |
| 13 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,96 | 5,44 | 28,94 | 224,90 |
| 14 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,73 | 5,44 | 28,94 | 224,67 |
| 15 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,58 | 5,44 | 28,94 | 224,52 |
| 16 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,59 | 5,44 | 28,94 | 224,53 |
| 17 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 4,93 | 5,44 | 28,94 | 224,87 |
| 18 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,46 | 5,44 | 28,94 | 225,40 |
| 19 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 5,96 | 5,44 | 28,94 | 225,90 |
| 20 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 6,80 | 5,44 | 28,94 | 226,74 |
| 21 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,35 | 5,44 | 28,94 | 227,29 |
| 22 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 7,80 | 5,44 | 28,94 | 227,74 |
| 23 | 58,83 | 103,60 | 23,13 | 8,17 | 5,44 | 28,94 | 228,11 |
| Energía al día (kWh) | 1.412 | 2.486,40 | 555 | 178 | 130,47 | 694,57 | 5.456,43 |
| Energía al mes (kWh) | 42.360 | 74.592 | 16.650 | 5.344 | 3.914 | 20.837 | 163.697 |

Tabla 9. Consumos térmicos Noviembre.

Entre los datos de las *Tablas 6-9* es destacable que el 97% del consumo térmico se destina a que la piscina climatizada cumpla con las condiciones de confort establecidas como es el ejemplo de mantener el agua de la piscina caliente o climatizar el aire. En este caso, las máximas pérdidas se generan por la renovación del aire de la piscina seguido de las pérdidas por evaporación.

También cabe mencionar que la potencia consumida es muy estable, del orden de 220 kW y por lo tanto, los consumos energéticos también, situándose estos en el rango de 15.000-20.000 kWh/mes. Esto es debido a que el aire exterior apenas influye en la demanda térmica por renovación del aire de la piscina.

En conclusión, el consumo eléctrico de una piscina climatizada convencional ronda el valor de 550 MWh mientras que el consumo térmico es de 1.500 MWh. Este gran foco de consumo genera como consecuencia la emisión al medio ambiente de 400 Tn/año de CO₂, cifra muy elevada para un único punto de consumo.

La reducción o eliminación al completo de estas emisiones mediante la generación de energía eléctrica con energías renovables y la generación de energía térmica mediante el sistema Power to Gas supondrá una gran ayuda a la mitigación del cambio climático.

4. DIMENSIONADO DEL CAMPO SOLAR

El dimensionamiento del campo solar está basando en el hecho de que, para que el Power to Gas sea factible, debe sobrar energía proveniente de la generación renovable. De este modo, se podrá cubrir la demanda eléctrica de la instalación y se obtendrá además hidrógeno para poder utilizarlo posteriormente en el consumo térmico del complejo.

El cálculo va a realizarse para dos localizaciones posibles, Zaragoza y Almería. Estos cálculos permitirán observar las diferencias que la localización del complejo ofrece al sistema Power to Gas. Además, tal y como se ha mencionado anteriormente, los cálculos van a centrarse en cuatro meses tipo, representativos de las cuatro estaciones del año, para asemejar el cálculo de la producción fotovoltaica conectada a red e instalada en cubierta lo más posible a la realidad.

A continuación se expone resumidamente el método seguido en el cálculo del campo solar.

4.1. IRRADIANCIA

En primer lugar hay que obtener información sobre la radiación solar para poder evaluar el recurso. Esta información puede encontrarse en páginas como METEONORM, NASA, IDAE o PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*), programa elegido en este proyecto para obtener los datos.

PVGIS realiza una primera estimación de la irradiancia diaria tipo, lo que permite calcular la energía eléctrica que puede producirse en una ubicación determinada.

De este modo, se han extraído los datos de la irradiancia global en un plano fijo y se ha calculado la inclinación óptima de los paneles para cada emplazamiento elegido; 37° para Zaragoza y 34° para Almería.

4.2. PERFORMANCE RATIO

Por otro lado se calculan las pérdidas que dan valor al *Performance Ratio (PR)*. El *Performance Ratio* es un valor que evalúa la calidad de una instalación fotovoltaica ya que representa la relación entre el rendimiento real y el rendimiento nominal de la instalación.

Entre las pérdidas más destacables se encuentran las **pérdidas por temperatura** que se producen en los módulos fotovoltaicos. Una variación de temperatura modifica directamente la tensión del panel solar y, en consecuencia, disminuye su punto de máxima potencia. Su rendimiento empieza a disminuir cayendo hasta el 10% de su rendimiento nominal [16] y, una vez superados los 75 °C, el dispositivo deja de funcionar como medida autoprotectora tal y como se muestra en la *Figura 5*.

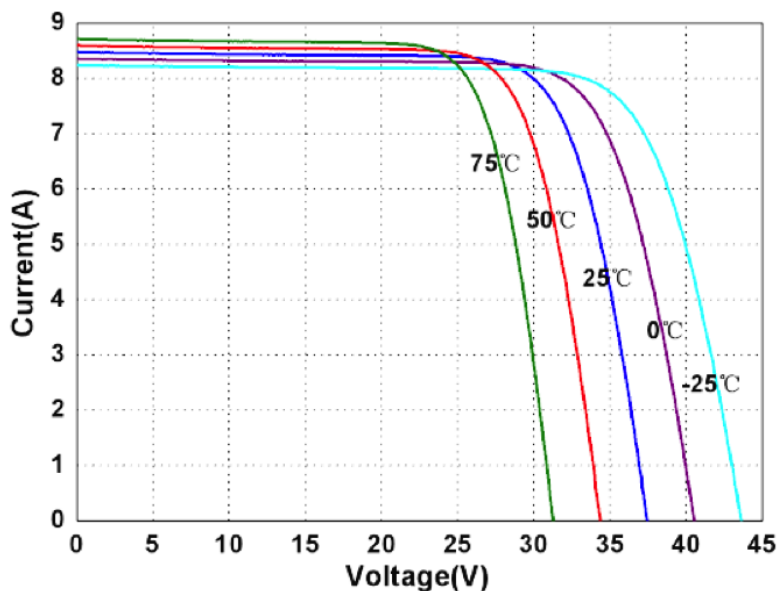


Figura 5. Relación entre temperatura, tensión e intensidad eléctrica en los paneles [17].

Estas pérdidas suelen encontrarse entre el 5% y el 20%.

El resto de pérdidas que pueden encontrarse entre el valor del PR apenas influyen en el resultado final. Sin embargo, cabe mencionar las siguientes:

- **Pérdidas por el inversor:** Son muy bajas ya que los inversores utilizados suelen tener un rendimiento muy alto, del orden del 95%.
- **Pérdidas en el cableado de corriente continua y alterna:** No suponen un gran valor dado que por normativa no puede superarse el 1,5% de caída de tensión en el cableado de corriente continua y el 2% en el de corriente alterna [16].
- **Pérdidas por sombras:** casi no influyen porque al realizar la instalación se asegura que la zona de colocación de paneles esté libre de obstáculos. Además, normalmente en las piscinas municipales no suele haber ningún problema al encontrarse alejadas de edificios alto u otros obstáculos.
- **Pérdidas por suciedad:** son prácticamente nulas. Su porcentaje suele situarse entre el 0,5-3% en caso de mucha suciedad en el entorno.
- **Otras pérdidas** por dispersión de los paneles, por fallos de funcionamiento, por energía disipada o por la calidad de los materiales instalados.

En conclusión, el rango de rendimiento en el que se encuentra el PR es entre 50-90%. En este proyecto se propone **75%** como valor por defecto. De todos modos, hay

que resaltar que este valor depende mucho de las condiciones de la instalación fotovoltaica y de todos los parámetros que se han destacado anteriormente.

4.3. RENDIMIENTO DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Un valor crítico, muy influyente en el rendimiento global de una instalación fotovoltaica, es la eficiencia de las células fotovoltaicas.

Aunque se han producido importantes avances en la tecnología fotovoltaica a lo largo de estos últimos años y ya existen paneles experimentales con rendimientos superiores al 40% tal y como se muestra en la *Figura 6*, el rendimiento de las células fotovoltaicas comerciales sigue siendo muy bajo.

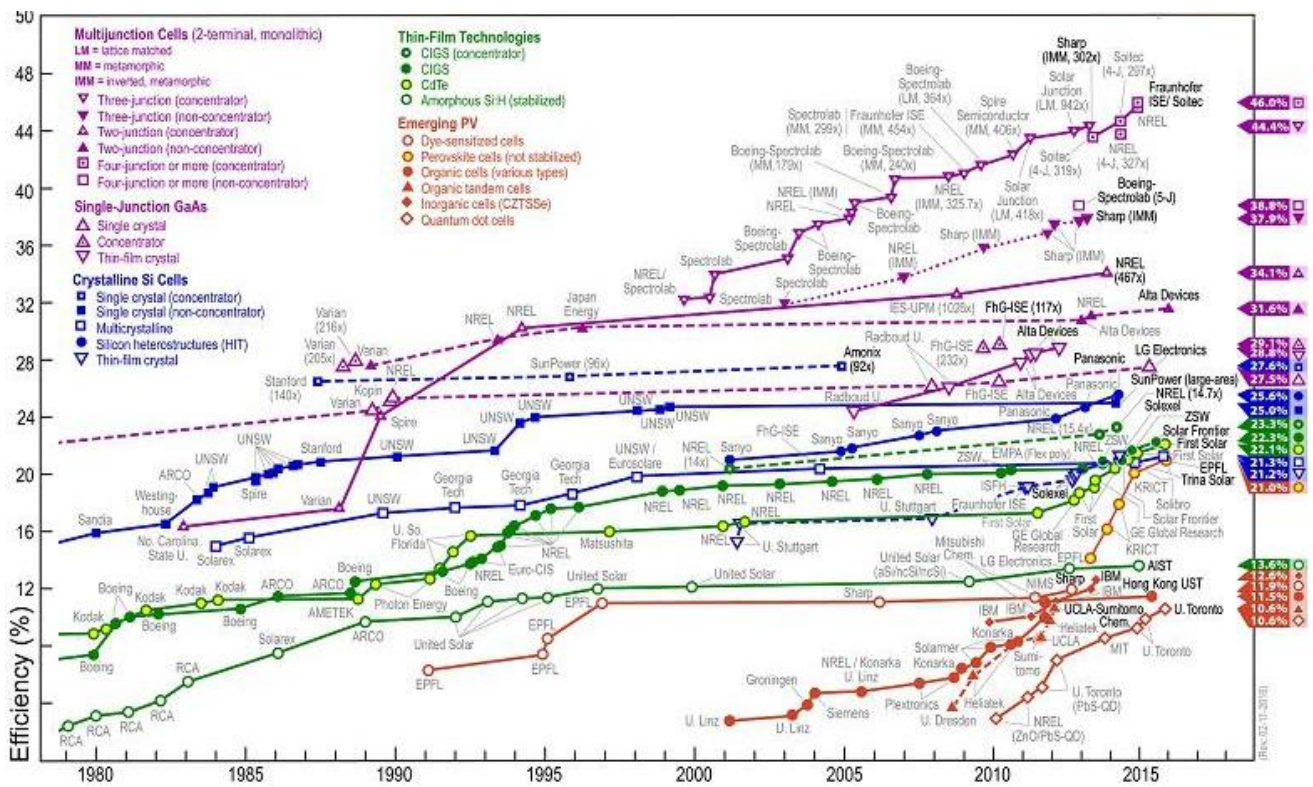


Figura 6. Evolución de las eficiencias de conversión logradas en células fotovoltaicas [17].

En la actualidad y para el uso común, se utilizan paneles de silicio por su alta fiabilidad a precios razonables. Los paneles de celdas monocristalinas son los más eficientes, seguidos de los policristalinos. Mientras que los mejores paneles monocristalinos superan ligeramente el 20%, la mayoría de los paneles en producción captan alrededor del 16% de la energía disponible de la luz.

Como ejemplo de eficiencia típica y para poder emplearla en los cálculos del proyecto, se ha elegido de un catálogo de fabricante, *ANEXO A.I.*, el módulo

fotovoltaico HIP-210NHE1 (*Hit Photovoltaic Module de Sanyo*) donde puede comprobarse que la eficiencia de la célula es de 18,7% y la del módulo de **16,8%**.

4.4. SUPERFICIE DEL CAMPO SOLAR

Para acercar el proyecto a la realidad y por tratarse de un complejo deportivo con piscina climatizada, se ha escogido el Centro Natación Helios como referencia para estimar la superficie del campo solar. Este complejo cuenta con una superficie edificada de más de 3.000 m² repartida por sus 65.000 m² [18].

Por lo tanto, se ha propuesto esta superficie de 3.000 m² para el cálculo de la producción fotovoltaica.

4.5. PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA

Con todos los valores anteriores escogidos, la fórmula global para estimar la energía generada por un sistema fotovoltaico es la siguiente (Eq. (1)) [19]:

$$E = I * r * A * PR \quad \text{Eq. 1}$$

E = Energía (kWh)

I = Media diaria de la irradiación solar global (kWh/m²)

r = Eficiencia del módulo fotovoltaico

A = Superficie total de paneles solares (m²)

PR = Performance Ratio

Los valores obtenidos se presentan frente al consumo eléctrico de la piscina climatizada en las *Figuras 7-11*, detallando los datos por mes tipo en el caso de la localización de Zaragoza y mediante una gráfica general en el caso de Almería.

En las gráficas se observa como el consumo eléctrico de la piscina climatizada es muy estable. La potencia consumida por el establecimiento aumenta progresivamente desde el horario de apertura (8 de la mañana) hasta el cierre del mismo (11 de la noche). A partir de ese momento, disminuye hasta un valor de 55 a 80 kW, dependiendo de la estación, que se mantiene constante durante toda la noche.

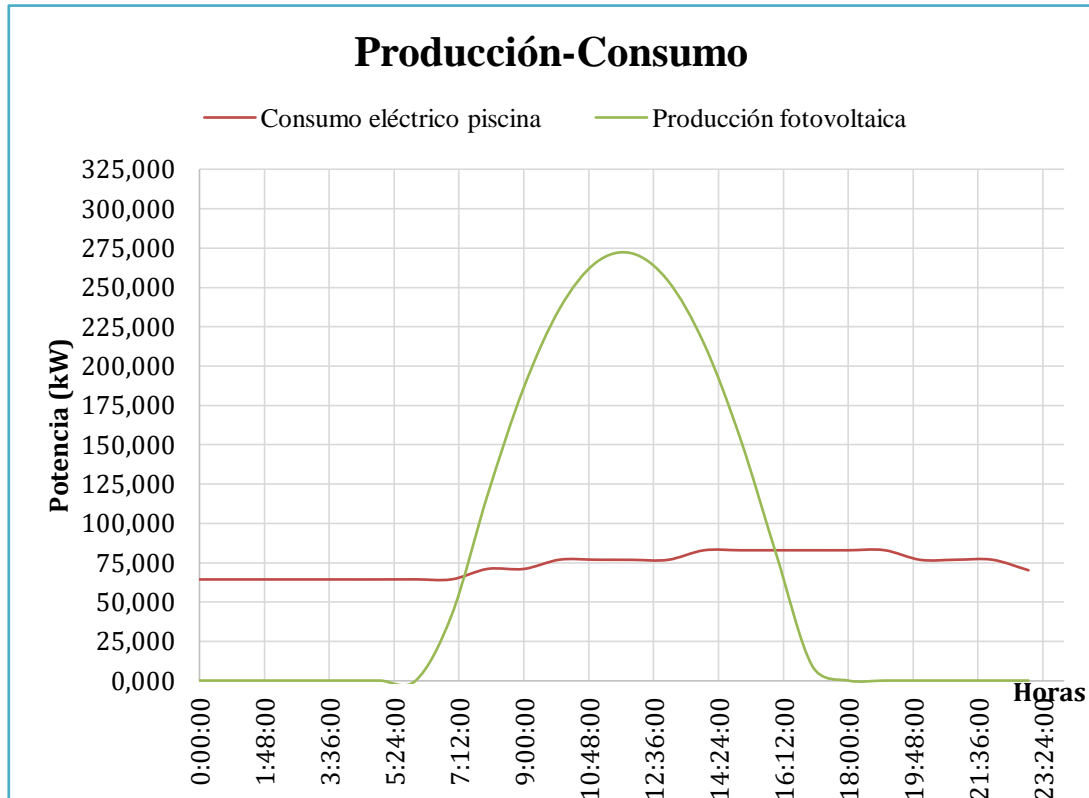


Figura 7. Relación producción-consumo piscina climatizada en Febrero en Zaragoza.

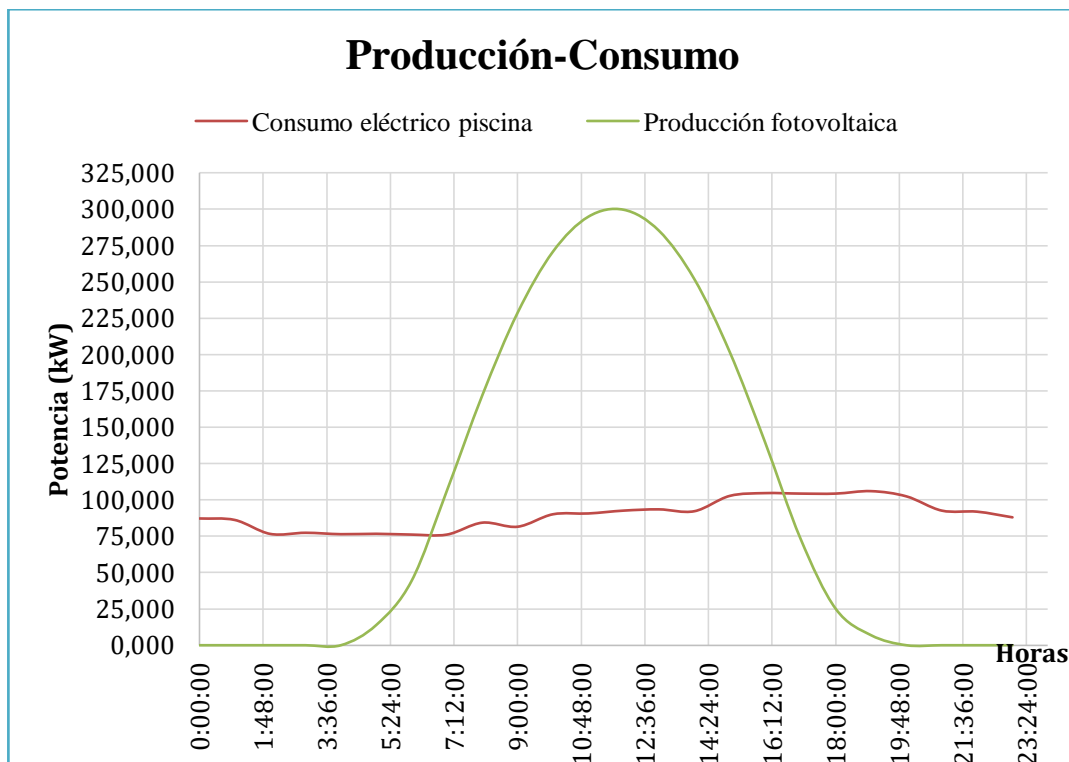


Figura 8. Relación producción-consumo piscina climatizada en Mayo en Zaragoza.

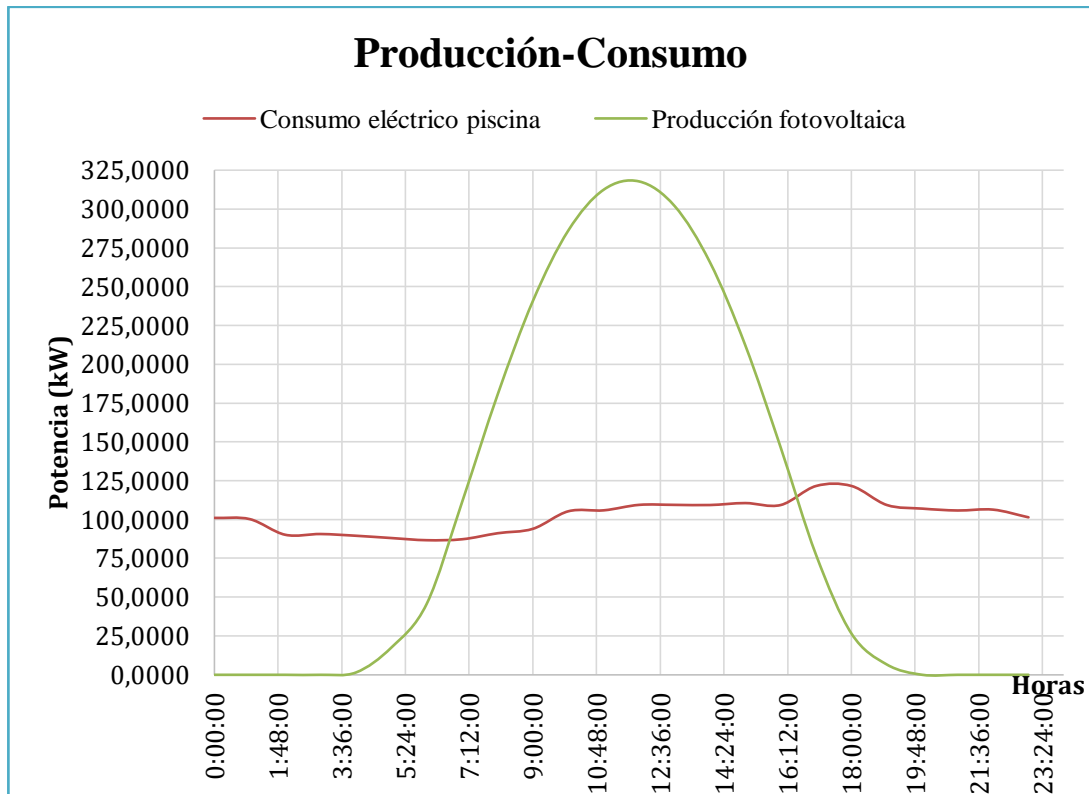


Figura 9. Relación producción-consumo piscina climatizada en Junio en Zaragoza.

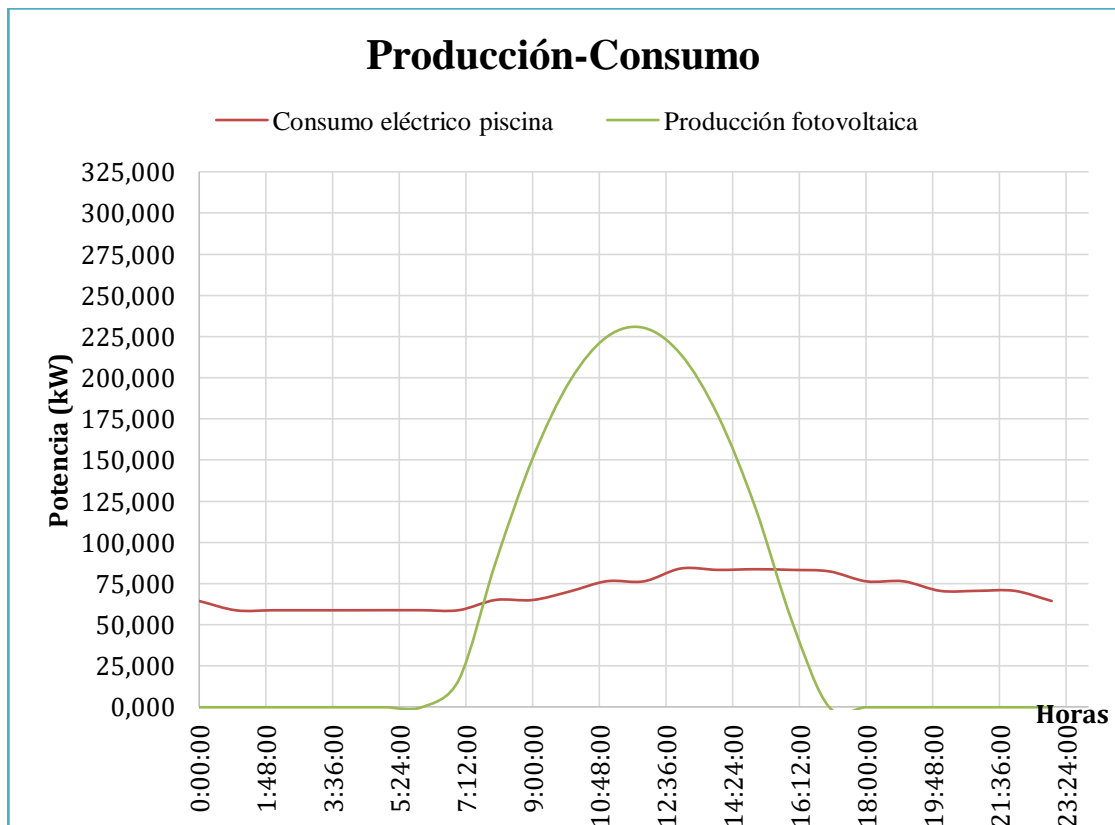


Figura 10. Relación producción-consumo piscina climatizada en Noviembre en Zaragoza.

También puede comprobarse que en las horas solares la producción fotovoltaica cubre por completo la demanda eléctrica del complejo residencial desde las 7:12:00 hasta las 16:12:00. En las horas nocturnas, momento en que la producción fotovoltaica no cubre todas las necesidades eléctricas, aproximadamente de 16:12:00 a 7:12:00, la piscina climatizada se acogerá a una tarifa eléctrica para suplir dicho consumo.

La energía sobrante, del orden de unos 150 kWh, se transformará posteriormente en hidrógeno. Es claro que la aplicación Power to Gas será más eficiente y más productiva en los meses de primavera-verano ya que la energía excedente de estos meses está entorno a 50 kWh más que la producida en los meses de otoño e invierno.

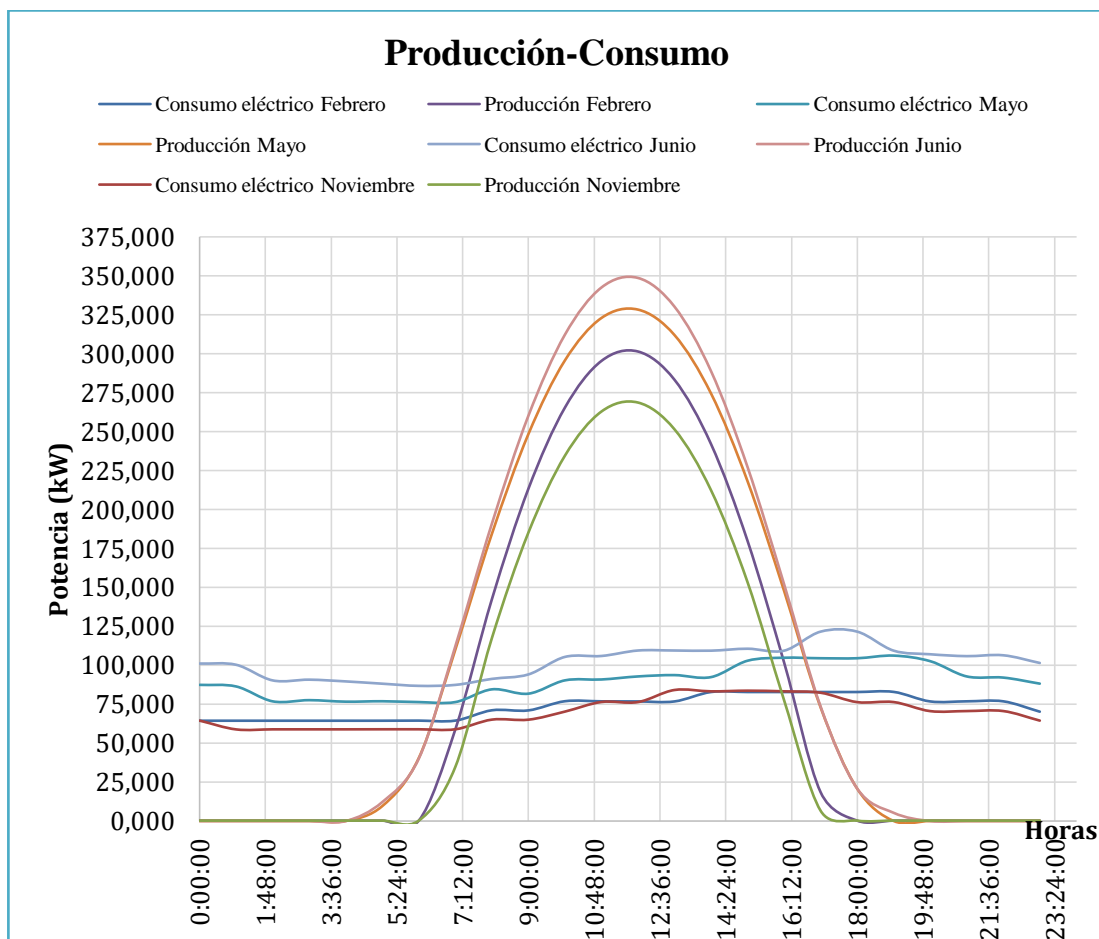


Figura 11. Relación producción-consumo piscina climatizada en Febrero-Mayo-Junio-Noviembre en Almería.

En lo referente a la localización geográfica, es muy destacable que la potencia producida en Almería es del rango de 30 kW mayor dado que, tal y como muestran las gráficas, la potencia máxima alcanzada en Zaragoza es 318 kW mientras que en Almería es 349 kW.

Estos valores indican que la situación del sistema es importante y se rentabilizará más rápidamente y en mayor o menor medida dependiendo de esta. En el caso de Almería, la inversión podría reducirse considerablemente ya que con una superficie de campo solar menor, alrededor de 400 m² menos, se obtendría la misma energía que en Zaragoza.

Por último, hay que destacar la gran aportación que los paneles solares realizan en la reducción del consumo de energía. En un año se logra reducir 200 kWh por lo que de 275 Tn CO₂/año que emite una piscina climatizada, el valor queda reducido a 150 Tn CO₂/año. Casi la mitad de toneladas son evitadas gracias a la generación renovable.

5. CURVAS DE DEMANDA Y CONSUMO

En las *Figuras 12-13* se representan las curvas de demanda térmica de la piscina climatizada frente al exceso eléctrico, generado por las placas fotovoltaicas, que no se ha consumido en la instalación. Estas curvas servirán para dimensionar en el *Apartado 6* de la presente memoria el sistema Power to Gas.

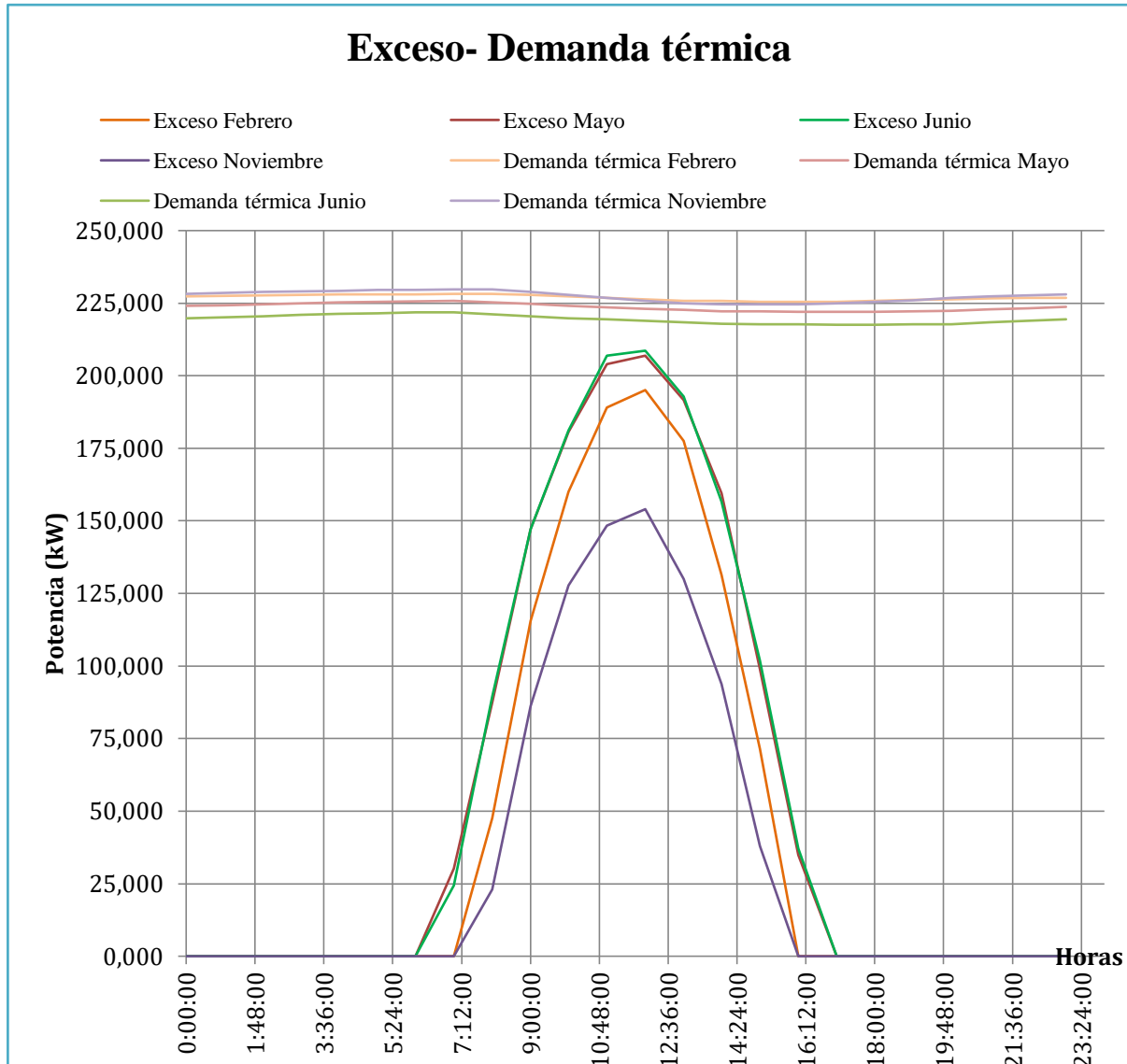


Figura 12. Relación exceso eléctrico-demanda térmica Febrero-Mayo-Junio-Noviembre en Zaragoza.

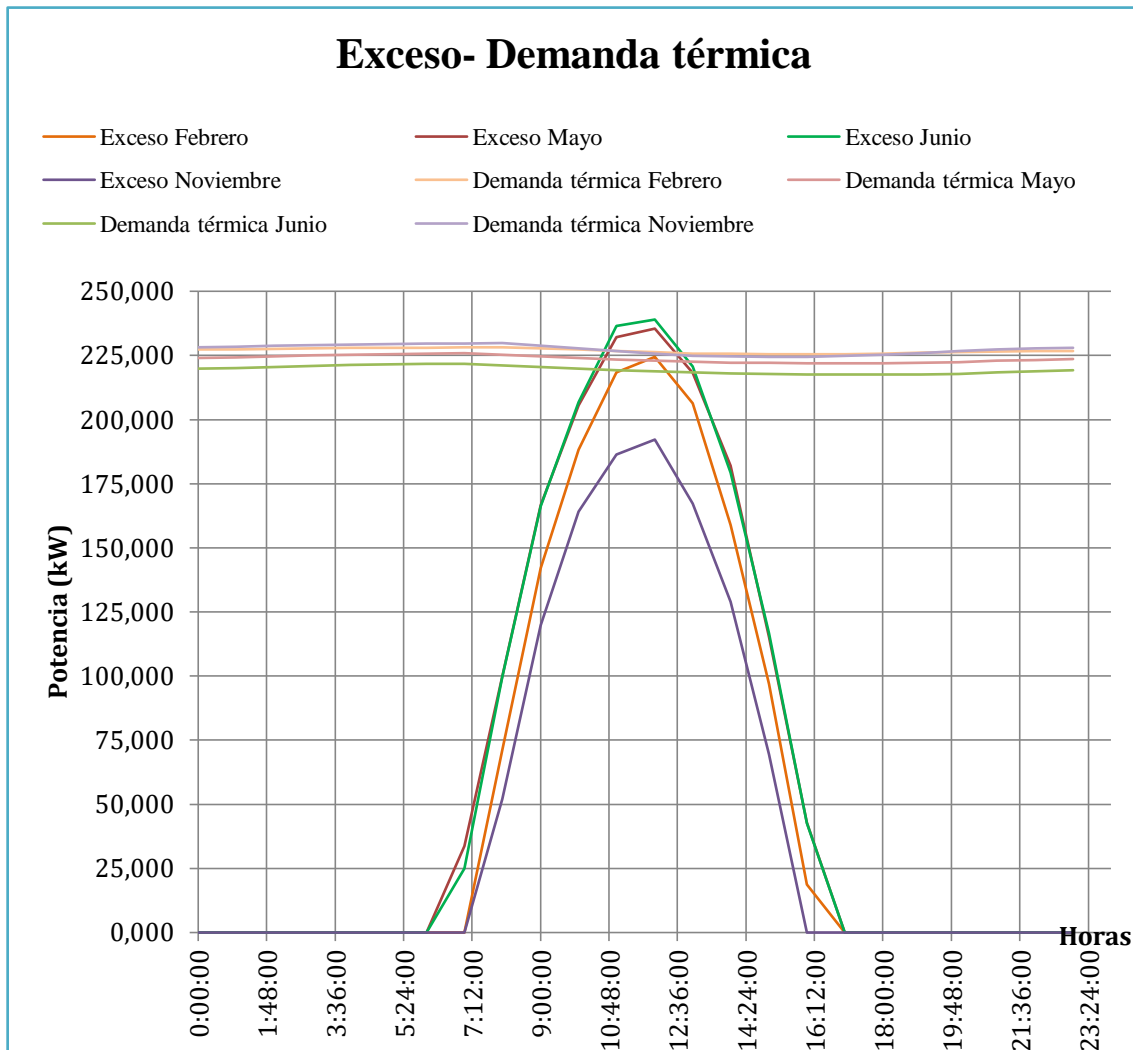


Figura 13. Relación exceso eléctrico-demanda térmica Febrero-Mayo-Junio-Noviembre en Almería.

Gráficamente puede corroborarse, tal y como se ha mencionado en el *Apartado* 3.2., que la demanda térmica de la instalación es muy constante a lo largo de todo el día, así como de todo el año.

En lo referente a la localización geográfica, se observa cómo el exceso eléctrico de la generación renovable en Almería es mucho mayor que en Zaragoza, llegando a satisfacer en este caso la demanda térmica en los meses de primavera y verano durante las horas de 10:48:00 a 12:36:00. Sin embargo, por lo general, este exceso eléctrico no cubre por completo la demanda térmica de la instalación, pero sí ayudará a reducir sus consumos.

6. DIMENSIONADO DEL SISTEMA POWER TO GAS

El objetivo del Power to Gas consiste en transformar la energía eléctrica en gas. El proceso completo que sigue para alcanzar este objetivo se muestra en la *Figura 14*.

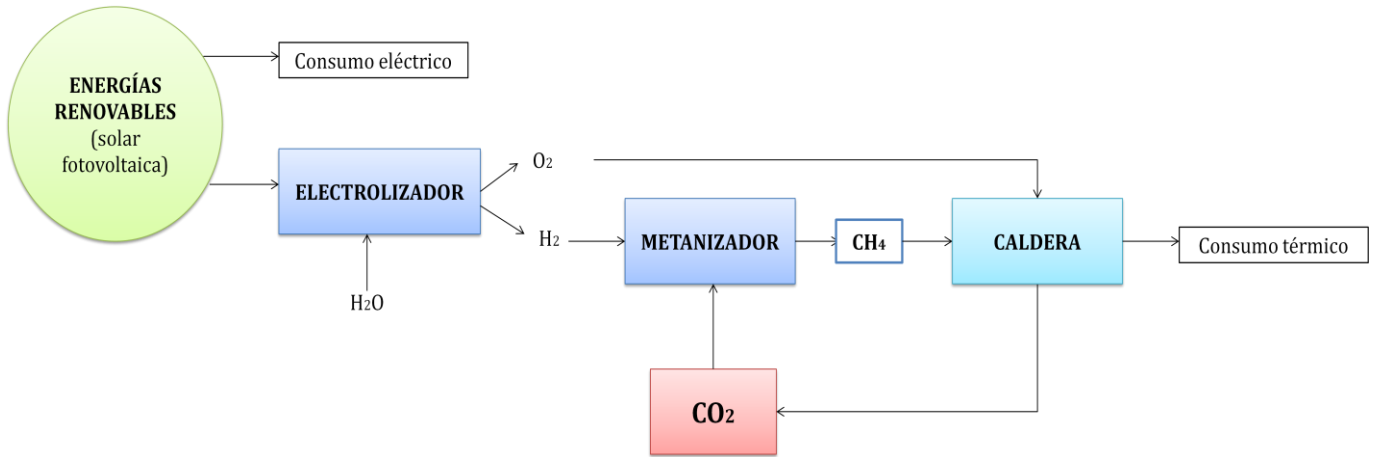


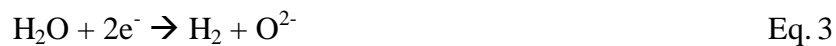
Figura 14. Proceso global del Power to Gas en el caso de estudio.

A continuación se explicará uno a uno los componentes que forman este sistema.

6.1. ELECTROLIZADOR

El proceso global del Power to gas requiere la presencia de un electrolizador el cual genera hidrógeno y oxígeno a partir de la descomposición del agua mediante un aporte de electricidad. De esta manera, en nuestro caso de estudio, esta electricidad empleada para la descomposición del agua será la que no se ha utilizado en el consumo eléctrico de la instalación, proveniente de los paneles solares.

La ecuación química que se produce en el proceso de la electrólisis (Eq. (2)) puede segmentarse en dos pasos.



En el cátodo, el cual está cargado negativamente, se produce la reacción de reducción (Eq. (3)), mientras que la reacción de oxidación tiene lugar en el ánodo, cargado positivamente (Eq. (4)).

6.1.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ELECTROLIZADORES

Las diferentes tecnologías de interés que podría utilizarse en el proceso del Power to Gas se exponen a continuación.

6.1.1.1. Electrolizadores alcalinos (AEL, *alkaline electrolysis*)

Es la tecnología más barata y madura por haber estado disponible comercialmente durante décadas [20]. La ventana de operación de esta tecnología se encuentra entre el 20% y el 100% de su capacidad, rango que hace que sea una buena opción para sistemas como Power to Gas que están acoplados a una fuente de alimentación fluctuante e intermitente [21]. Además, la vida útil esperada para un electrolizador alcalino es de unos 30 años [22], alto en comparación con los otros tipos de electrolizadores. Por último, cabe destacar que el AEL ha optimizado su eficiencia en los últimos años.

6.1.1.2. Electrolizadores de membrana polimérica (PEM, *polymer electrolyte membranes*)

Es una tecnología relativamente nueva comparada con AEL. Por ello, se trata de una tecnología más cara aunque se espera un gran desarrollo técnico futuro, siendo probable que esta tecnología acabe sustituyendo la anterior mencionada para el proceso Power to Gas.

Las principales ventajas de PEM incluyen un arranque más rápido, una mayor flexibilidad y un mejor acoplamiento con sistemas intermitentes [23], además de que su carga mínima es del 5% [24]. Sin embargo, debido a los costos de la membrana, al uso de un catalizador de metal noble y a su vida útil limitada [25], sigue siendo una tecnología cara y en desarrollo.

6.1.1.3. Electrolizadores de óxido sólido (SOEC, *solid oxide electrolysis*)

En la actualidad está en pleno desarrollo y todavía se encuentra en fase de laboratorio. Esta tecnología aún tiene demasiadas desventajas [26] para trabajar con sistemas fluctuantes e intermitentes y es muy costosa, sin la posibilidad de suministrar energía a precios competitivos.

6.1.2. DIMENSIONADO DEL ELECTROLIZADOR

Teniendo en cuenta los principales parámetros operativos de las tecnologías de electrólisis nombradas anteriormente y observando los electrolizadores disponibles en el mercado actual, se ha llegado a una serie de conclusiones.

Para el diseño del electrolizador va a elegirse el diseño alcalino por ser el más comercial. Se ha tomado un consumo del $4,7 \text{ kWh/m}^3 \text{ H}_2$, parámetro que entra en el rango de valores de mercado. Como consecuencia, el rendimiento del electrolizador estará alrededor del 64%. Sin embargo, la tendencia de estos electrolizadores es mejorar su rendimiento en los próximos años tal y como se muestra en [21] donde se pretenden alcanzar unos consumos de $4,3 \text{ kWh/m}^3 \text{ H}_2$.

En cuanto a los flujos de hidrógeno nominal seleccionados se han tomado valores comerciales y que además encajen bien en la curva de potencia de la energía eléctrica excedente (*Figuras 15-16*). Este valor tiene que ser lo más alto posible para obtener cantidades de hidrógeno mayores. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que el electrolizador pueda transformar hidrógeno a lo largo de todo el año y no solamente los meses de primavera y verano, además de que debe trabajar en régimen nominal durante el mayor tiempo posible. Así, los limitadores de esta potencia nominal serán en gran medida los meses de otoño e invierno

Por lo tanto, se han seleccionado tres rangos distintos de flujo de hidrógeno nominal, $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$ y $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ que dan unas potencias de 47, 70,5 y 141 kW respectivamente, para comprobar cuál de ellas encajaría mejor (*Figuras 15-16*). Estos valores se han extraído del catálogo de fabricante Hydrogenics, *ANEXO A.2.* y son los valores más utilizados comercialmente en la actualidad por empresas que destacan en este sector como Angstrom Advanced Inc., H2 NitidorHydrogenics o PxiTech.

Con todos estos supuestos se ha obtenido la producción total de hidrógeno en $\text{Nm}^3/\text{día}$ para cada una de las estaciones del año y para cada una de las tres potencias. Esto es, se han obtenido doce posibilidades expuestas en las *Tablas 10-11*.

| Mes/ Potencias (kW) | Invierno | Primavera | Verano | Otoño |
|------------------------|----------|-----------|--------|--------|
| 141 | 197,86 | 233,52 | 228,60 | 161,16 |
| 70,5 | 115,11 | 133,85 | 133,09 | 102,97 |
| 47 | 80 | 93,85 | 93,09 | 72,96 |

Tabla 10. Producción de hidrógeno en Zaragoza.

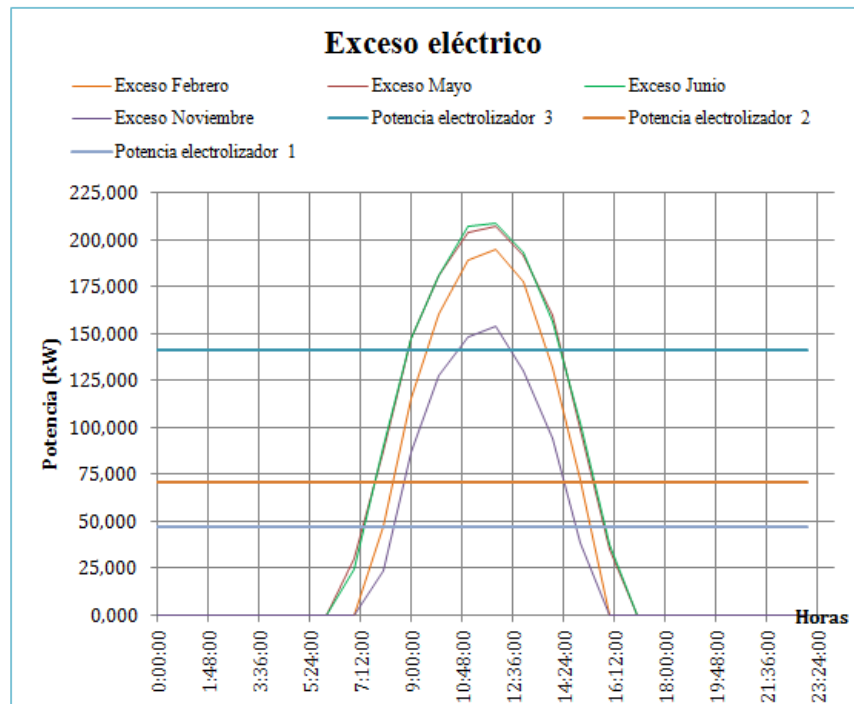


Figura 15. Potencias de electrolizador seleccionadas frente al exceso eléctrico de la producción fotovoltaica en Zaragoza.

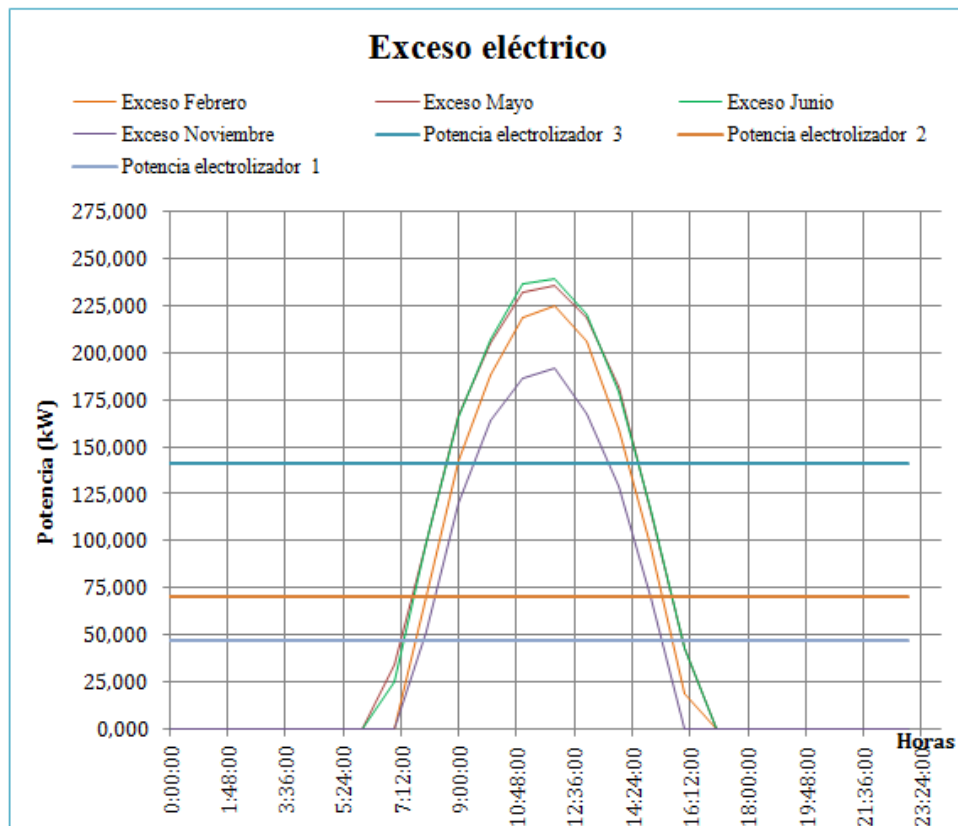


Figura 16. Potencias de electrolizador seleccionadas frente al exceso eléctrico de la producción fotovoltaica en Almería.

| Mes/ Potencias (kW) | Invierno | Primavera | Verano | Otoño |
|------------------------|----------|-----------|--------|--------|
| 141 | 215,72 | 242,06 | 235,12 | 198,78 |
| 70,5 | 124,00 | 136,31 | 134,40 | 115,85 |
| 47 | 84,00 | 96,31 | 94,40 | 80 |

Tabla 11. Producción de hidrógeno en Almería.

Cabe destacar que todas las potencias obtienen su máxima producción en primavera, valor que no varía apenas en verano. Es lógico que se obtenga mayor producción en estas dos estaciones dado que son las que más horas de sol tienen.

El otro de los datos destacables es que la producción de hidrógeno con el electrolizador de 141 kW es mucho más alta que en los otros casos, del orden de 100 Nm³/día superior. Por lo tanto, se ha elegido este electrolizador para el diseño del Power to Gas frente a los otros dos y aunque no trabaje siempre a máxima potencia, su rango de trabajo es aceptable.

Por último cabe mencionar que como de la electrólisis del agua se producen 8 kg de O₂ por kg de H₂ (2 m³ de O₂ por m³ de CH₄ para la metanización), existen varias opciones para la valorización de este O₂ [27] como es el ejemplo de la oxicomustión [10], valorización que se aplica en este proyecto.

6.2. BUFFER DE HIDRÓGENO

El diseño del almacenamiento de hidrógeno es otro de los retos del sistema Power to Gas dado que el funcionamiento del electrolizador es intermitente al acoplarse a una fuente de alimentación fluctuante y discontinua. De este modo el metanizador podrá funcionar en modo continuo y con un rendimiento más alto, produciendo continuamente metano.

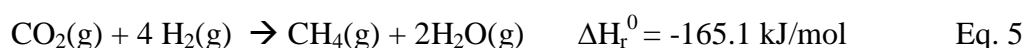
Este almacenamiento depende en gran medida del tamaño necesario y de los parámetros del sistema [23] por lo que hay una gran cantidad de almacenamientos posibles como pueden ser los tanques de gas comprimido, tanques criogénicos de hidrógeno líquido comprimido, almacenamiento de hidruros metálicos, almacenamiento físico o almacenamiento subterráneo (como por ejemplo cavernas de sal).

Sin embargo, para los sistemas Power to Gas aplicados al sector residencial, el diseño que mejor se adapta al tratarse de un almacenamiento a pequeña escala, in situ y temporal, son los tanques de gas a alta presión (300-700 bar) o los tanques de hidruros metálicos. Según Gahleitner [23], el almacenamiento de hidrógeno dentro de los

sistemas Power to Gas en tanques de gas a alta presión es el método actual y futuro de elección.

6.3. METANIZADOR

El hidrógeno obtenido es combinado con el dióxido de carbono capturado mediante la reacción de Sabatier, proceso mediante el cual reaccionan el hidrógeno y el dióxido de carbono a altas temperaturas y presiones para transformarlos en agua y metano. La reacción que transcurre en este proceso es la siguiente (Eq. (5)):



Como puede comprobarse, la reacción es altamente exotérmica. Por ello, este calor liberado en la reacción puede ser reutilizarlo para satisfacer la demanda térmica y mejorar de este modo la eficiencia del proceso Power to Gas.

También cabe destacar que el dióxido de carbono utilizado en esta reacción se obtiene mediante el proceso de oxidación por lo que se captura directamente de la caldera. La oxidación involucra altas concentraciones de O_2 en un ambiente que utiliza gases de combustión recirculados (CO_2) como gas de balance. De esta manera, la composición de los gases de chimenea es mayoritariamente dióxido de carbono. Así se pretende que el sistema sea lo más autosuficiente posible, eliminando la necesidad de capturar y separar externamente el CO_2 [9] [10], consiguiendo además de este modo un balance neutro de carbono en la instalación.

6.3.1. TIPOS DE METANIZADORES

La selección de un metanizador adecuado es un proceso difícil ya que para una metanización correcta, el diseño debe cumplir unos requerimientos estrictos debido a, entre otras cosas, las altas temperaturas y presiones que se alcanzan en el reactor. Además, se han de tener en cuenta valores como la calidad del metano obtenido, el volumen necesario del reactor (encarece mucho el precio) o la complejidad del proceso.

Por lo tanto, para realizar un buen control de la temperatura en el reactor y evitar la limitación termodinámica entre otros problemas (sinterizado del catalizador en el caso de los metanizadores catalíticos), se han desarrollado varios conceptos de reactores, tanto biológicos como catalíticos.

6.3.1.1. Metanizadores catalíticos

Estos reactores operan normalmente en un rango de temperaturas entre 350-600°C y en un rango de presiones entre 1-100 bar. Como catalizador pueden emplearse distintos metales, siendo el Níquel el más utilizado en la actualidad. Estos tienen una selectividad de casi el 100% [28] [29]. Sin embargo, la falta de hidrocarburos como etano, propano y metano en la corriente de “syngas” reduce el valor calorífico de este flujo respecto del gas natural [21].

Entre los reactores catalíticos destacan los de lecho fijo, los de lecho fluidizado, los trifásicos y los estructurados. Los dos últimos están todavía en fase de desarrollo y normalmente, los más utilizados son los reactores adiabáticos de lecho fijo que pueden funcionar tanto en estado estacionario como dinámico. Para el funcionamiento estacionario, el sistema Power to Gas requiere un almacenamiento de hidrógeno (*Apartado 6.2.*) para que el flujo de hidrógeno sea constante en el reactor. Aunque esto aumenta los costos de la instalación, el proceso es mucho más sencillo que en el otro caso.

6.3.1.2. Metanizadores biológicos

Es otra de las opciones para el proceso Power to Gas donde los microorganismos metanogénicos sirven como biocatalizadores. Sin embargo, esta tecnología sigue teniendo problemas importantes para su implantación en los sistemas Power to Gas por lo que sus dos versiones, metanización en un reactor separado o metanización en un digestor in situ, aun están en fase de investigación.

6.3.2. DIMENSIONADO DEL METANIZADOR

Del metanizador se obtiene por una parte el metano que se quemará posteriormente en la caldera. Y, por otra parte, el calor reutilizable anteriormente mencionado debido a lo altamente exotérmica que es la reacción que se produce en él.

En la *Figura 17*, obtenida mediante EES, puede verse la evolución de la entalpía conforme la temperatura. En este caso la elegida es $\Delta H = -2.24 \text{ kWh/Nm}^3$, la obtenida aproximadamente a los 400°C dado que los rangos de funcionamiento del metanizador están entre 350-600°C como se ha mencionado anteriormente.

Junto con este dato, se supone un rendimiento del metanizador del 90% dado que en la práctica no se puede utilizar todo el calor generado por las pérdidas que se producen en el sistema durante el intercambio de calor entre los gases calientes y el agua.

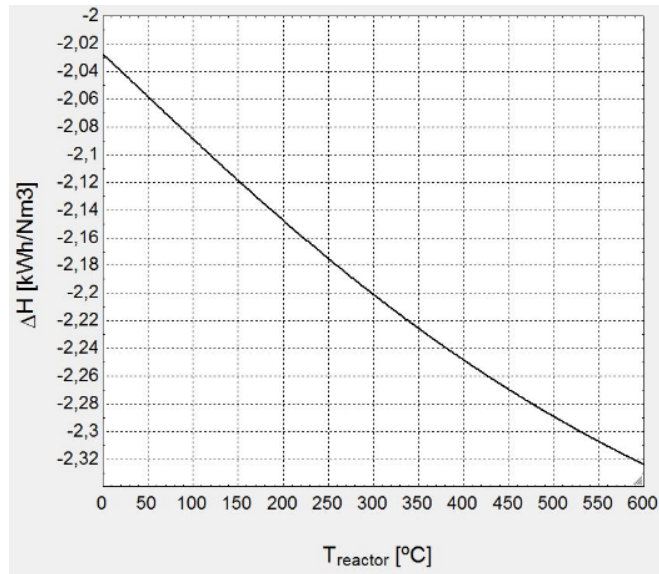


Figura 17. Evolución de la entalpía de la reacción del metanizador frente a la temperatura.

Por lo tanto, el calor obtenido en este proceso se presenta en las *Tablas 12-13*.

| Mes/ Potencias (kW) | Invierno | Primavera | Verano | Otoño |
|------------------------|----------|-----------|--------|-------|
| 141 | 4,16 | 4,90 | 4,80 | 3,38 |

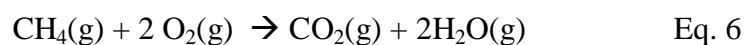
Tabla 12. Calor [kWh] extraído de la reacción en el metanizador de Zaragoza.

| Mes/ Potencias (kW) | Invierno | Primavera | Verano | Otoño |
|------------------------|----------|-----------|--------|-------|
| 141 | 4,53 | 5,08 | 4,94 | 4,17 |

Tabla 13. Calor [kWh] extraído de la reacción en el metanizador de Almería.

6.4. CALDERA

El metano sintético obtenido se quema en una caldera junto con el oxígeno separado en el electrolizador y por lo tanto, como producto resultante se obtiene dióxido de carbono que se capturará y agua, la cual también podrá reutilizarse en el proceso. La reacción que transcurre en la caldera es la siguiente (Eq. (6)):



Normalmente, el rendimiento de estas calderas de gas suele estar en el 90% por lo que es el dato de referencia que se va a tomar para realizar los cálculos.

En la *Figura 18* obtenida mediante EES puede verse la evolución de la entalpía conforme la temperatura. En este caso la elegida es $\Delta H = -9.925 \text{ kWh/Nm}^3$, la obtenida aproximadamente a los 400°C .

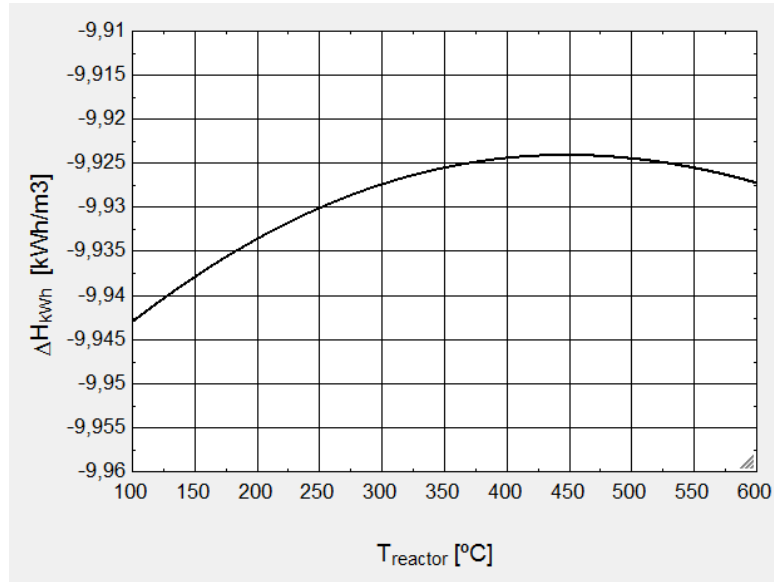


Figura 18. Evolución de la entalpía de la reacción de combustión frente a la temperatura.

Por lo tanto, suponiendo todos estos datos y sabiendo los moles que entran en la caldera, el calor obtenido en el proceso de combustión se muestra en las *Tablas 14-15*.

| Mes/ Potencias (kW) | Invierno | Primavera | Verano | Otoño |
|------------------------|----------|-----------|--------|-------|
| 141 | 18,41 | 21,73 | 21,27 | 15,00 |

Tabla 14. Calor [kWh] extraído de la reacción de combustión en Zaragoza.

| Mes/ Potencias (kW) | Invierno | Primavera | Verano | Otoño |
|------------------------|----------|-----------|--------|-------|
| 141 | 20,07 | 22,52 | 21,88 | 18,50 |

Tabla 15. Calor [kWh] extraído de la reacción de combustión en Almería.

6.5. RESULTADOS

A continuación se representa en las *Figuras 19-22* y *Figuras 23-26* la reducción de consumo que el Power to Gas implica en el sistema global tanto en la localización del complejo residencial en Zaragoza como en Almería respectivamente.

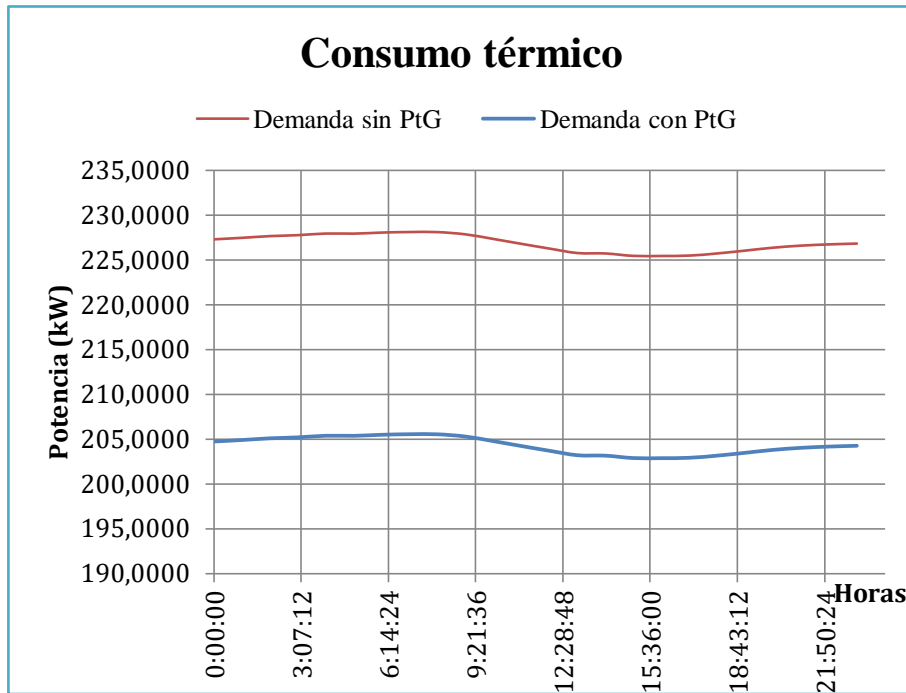


Figura 19. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Febrero en Zaragoza.

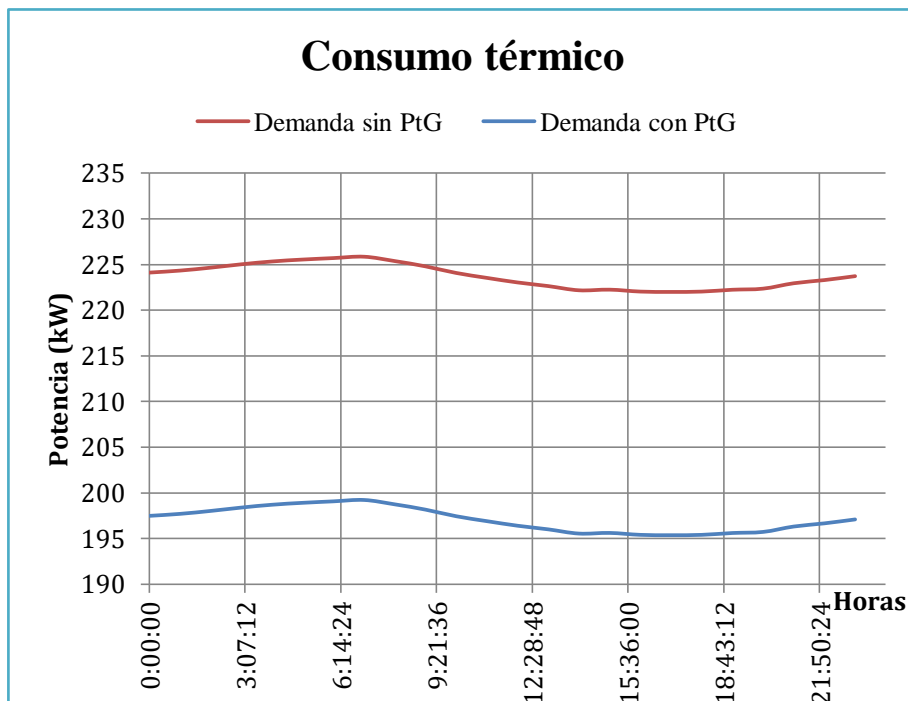


Figura 20. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Mayo en Zaragoza.

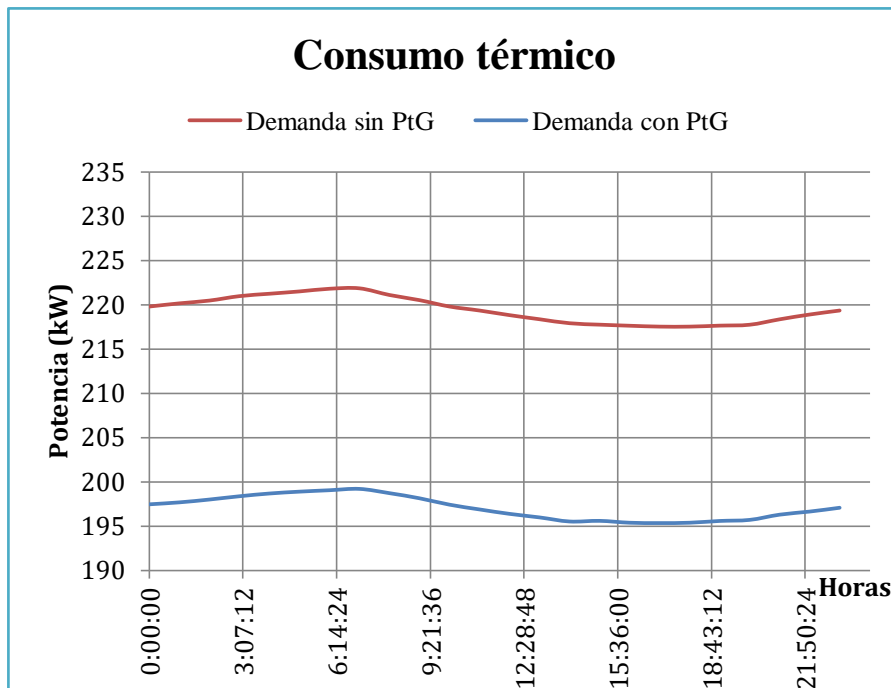


Figura 21. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Junio en Zaragoza.

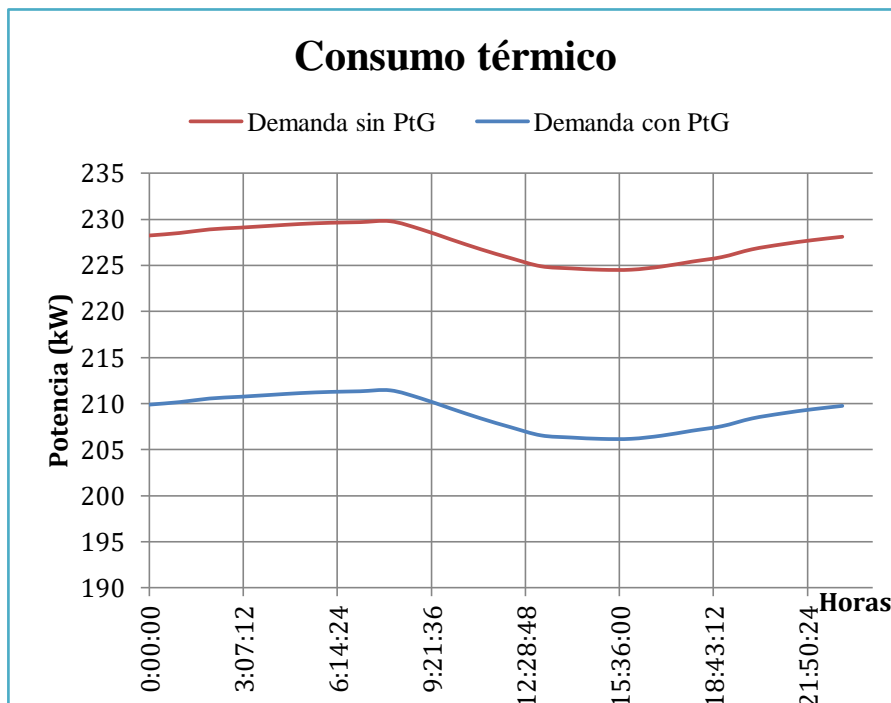


Figura 22. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Noviembre en Zaragoza.

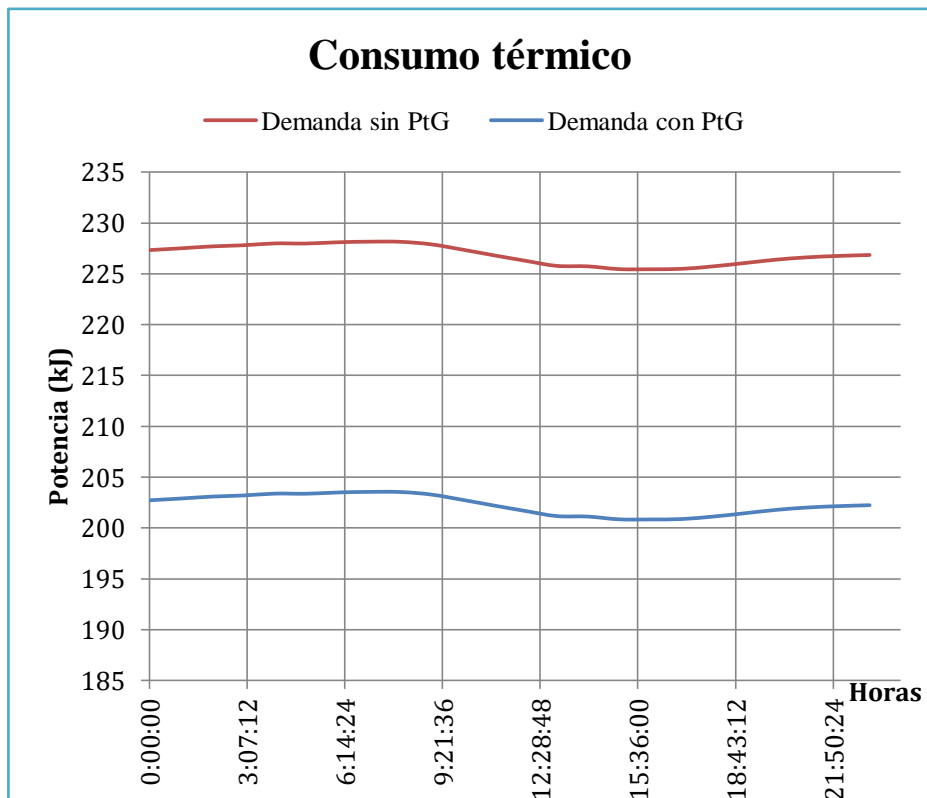


Figura 23. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Febrero en Almería.

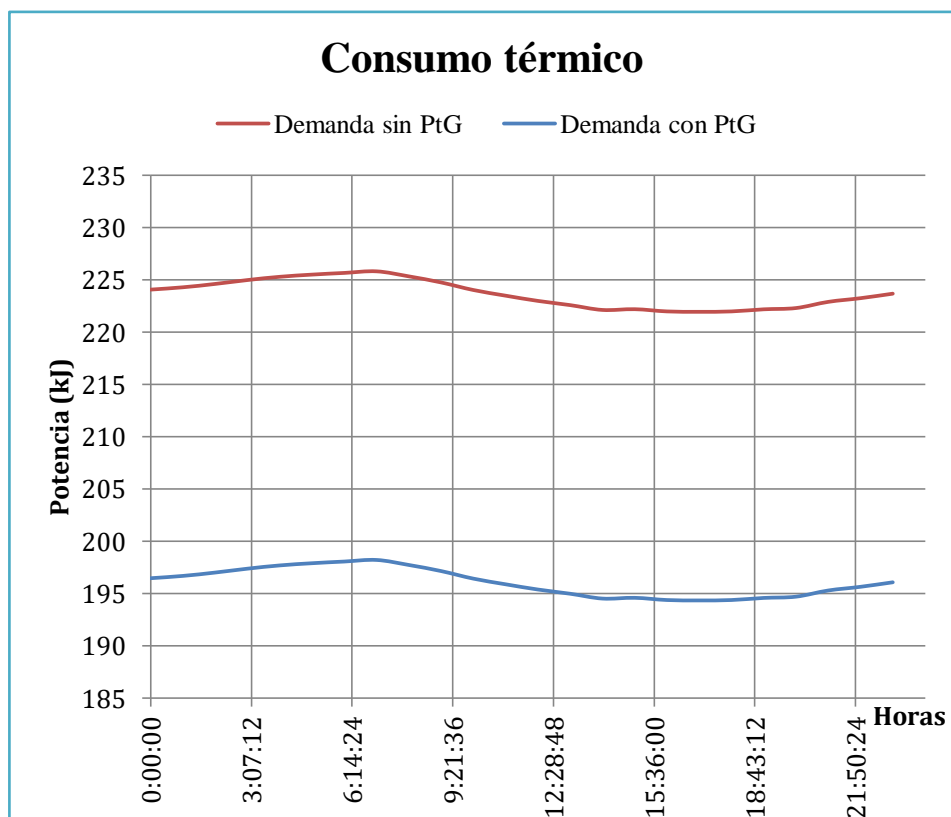


Figura 24. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Mayo en Almería.

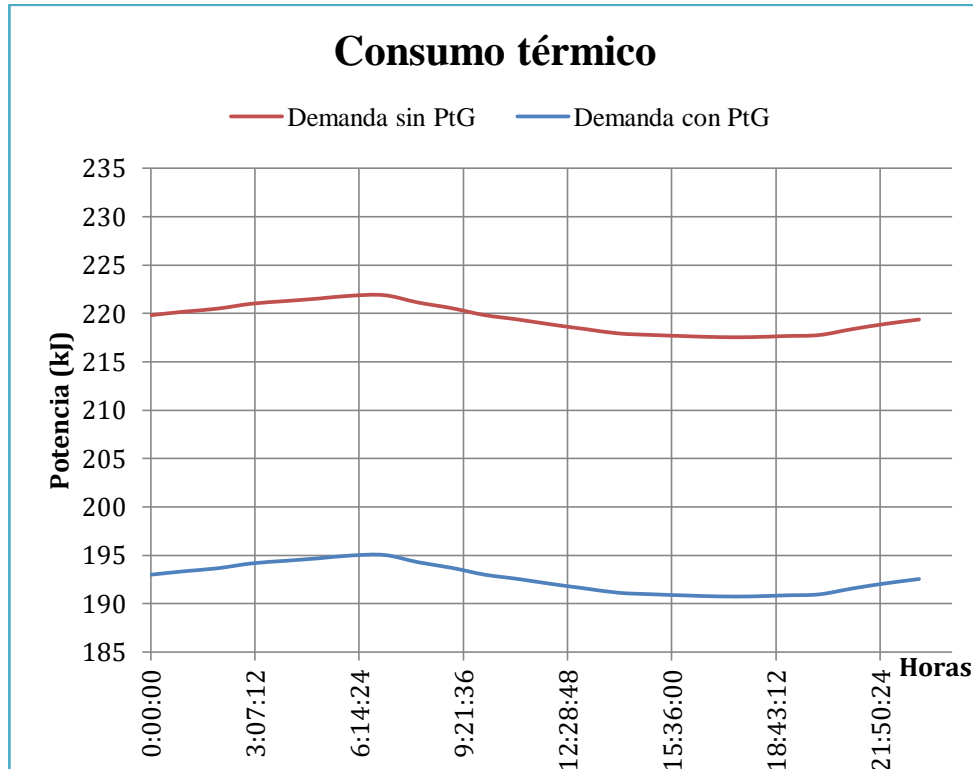


Figura 25. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Junio en Almería.

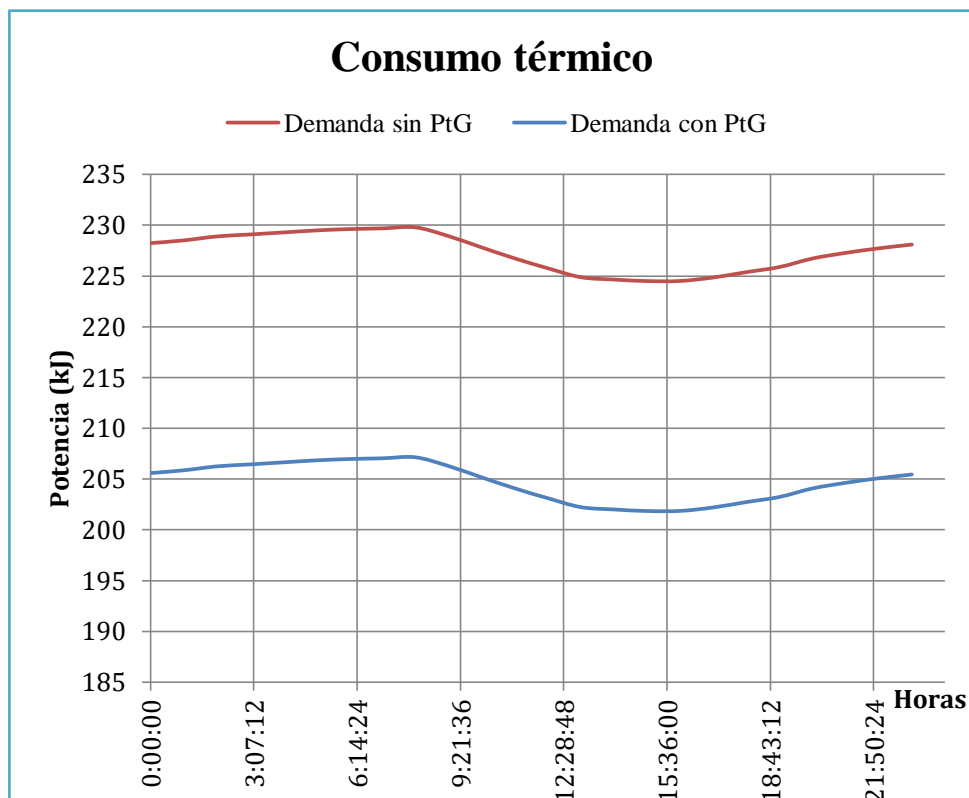


Figura 26. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Noviembre en Almería.

Todas estas gráficas muestran la misma tendencia de reducción del consumo térmico, en el rango de 20-22 kWh los meses de invierno-otoño y de 26-27 kWh los meses de primavera-verano. Esta tendencia es importante si se mira en el horizonte temporal de un año ya que el ahorro que supone esta reducción alcanza el valor de 148.500 kWh/año en el caso de Zaragoza y de 183.000 kWh/año en el de Almería.

También puede comprobarse que esta reducción no está apenas influenciada por la localización dado que al coger una potencia de electrolizador comercial, se ha limitado mucho el potencial del exceso renovable que tenía Almería.

Por otra parte, representado en las *Tablas 16-17* puede observarse la reducción de CO₂ que ha supuesto la integración del Power to Gas en el complejo residencial, calculada a partir del dato 13,89 kWh/kg como PCI del metano [30].

| CO ₂ generado con la ausencia de PtG (kg/año) | CO ₂ generado con la presencia de PtG (kg/año) |
|---|--|
| 118.845,76 | 106.965,98 |

Tabla 16. Comparación de la generación de dióxido de carbono con y sin sistema PtG en Zaragoza.

| CO ₂ generado con la ausencia de PtG (kg/año) | CO ₂ generado con la presencia de PtG (kg/año) |
|---|--|
| 131.063,42 | 116.422,06 |

Tabla 17. Comparación de la generación de dióxido de carbono con y sin sistema PtG en Almería.

Es claro comprobar cómo las emisiones de CO₂ no se reducen al completo dado que la demanda térmica es mucho mayor al exceso de energía eléctrica. Sin embargo, el efecto que el Power to Gas tiene en la reducción de estos gases en el horizonte temporal de un año es notable. Casi 12 Tn CO₂/año se lograría reducir en el caso propuesto gracias a la integración del sistema Power to Gas en este complejo.

Suponiendo que este sistema se implantase en todas las piscinas climatizadas de España, la reducción del CO₂ sería muy notable. Las toneladas de CO₂ evitadas gracias a la generación renovable más las toneladas evitadas gracias a la aportación del Power to gas, generarían una reducción de alrededor de 140.000 Tn CO₂/año, cifra muy significativa en la lucha contra el cambio climático.

7. VALORACIÓN ECONÓMICA

Para conocer si el sistema propuesto resulta rentable en un cierto plazo o no, es necesario en primer lugar conocer la inversión (*Apartado 7.1.*) que hay que realizar en la instalación. En el caso de esta valoración solo se van a tener en cuenta los desembolsos más importantes y costosos dado que por ejemplo, los gastos que suponen la mano de obra o el mantenimiento no se van a considerar.

En segundo lugar, es necesario tener presente los ahorros a largo plazo que el sistema implantado generará. Los aspectos que hay que tener en cuenta son los ahorros eléctricos, la contribución del metano, los beneficios potenciales del CO₂, así como la posible reutilización del calor y del oxígeno.

Los aspectos eléctricos y térmicos se van a analizar en los *Apartados 7.2.-7.3.* de la presente memoria. Los costos potenciales del CO₂ serán prácticamente nulos en este caso ya que el gas de salida se reutiliza en el proceso, capturándolo directamente de la caldera. Sin embargo, esta reutilización evitará generar gastos adicionales de captura de carbono. Por último, el gas del cual sí podría obtenerse beneficio económico es del oxígeno. La venta de este gas reduciría los costos del proceso 1,3 ct/kWh [21].

7.1. ANÁLISIS DE LA INVERSIÓN

La inversión de esta instalación puede dividirse en dos partes. En primer lugar la instalación fotovoltaica y en segundo lugar los componentes que forman parte del proceso Power to Gas, es decir, el electrolizador, el buffer de hidrógeno y el metanizador dado que la caldera del complejo será exactamente la misma.

El campo fotovoltaico conlleva una gran inversión, sobre todo en estos proyectos donde la instalación debe ser de gran tamaño para poder satisfacer los consumos tan altos del complejo. Actualmente el precio de una instalación fotovoltaica oscila entre los 600-800 €/m² [31]. Sin embargo, este precio se reduce proporcionalmente a medida que aumenta el tamaño de la misma.

En lo referente a los componentes del Power to gas, el electrolizador es el que mayor inversión requiere [22] [32] [33]. La inversión para un electrolizador AEL ronda los 1.000€/kW (equivalente a 5.060 €/m³H₂) [22] [34].

La segunda de las inversiones que requiere más capital es el buffer de hidrógeno. Además, este coste está asociado al del metanizador ya que buffers más pequeños de hidrógeno, requieren una inversión en el metanizador más elevada. Sin embargo, en el

caso de este proyecto, esta inversión no va a ser muy grande debido a que los rangos de producción de hidrógeno en los que se mueve son bajos. El coste total de almacenamiento se espera que sea de 3,76 €/GJ [35].

Por otro lado, la inversión a realizar en el metanizador genera una fuerte incertidumbre dado que hay muy pocas referencias. Algunos de los datos más realistas que se han encontrado, por basarse en cálculos específicos del tamaño de una empresa, sitúan la inversión del Power to Gas en los 400 €/kW [22]. Sin embargo, hay otros datos que localizan la inversión en unos 1.000€/kW, considerándose estos, costos sobrestimados [21].

Es destacable que toda esta información de precios se asume para plantas pequeñas de Power to Gas (unos 5 MW). En el caso de estudio los precios diferirían ya que las dimensiones con las que se trabaja son mucho menores. Sin embargo, no se encuentran referencias de la inversión que este proyecto podría requerir.

Por lo tanto, considerando los datos mencionados en este apartado y escogiendo las dimensiones calculadas de cada uno de los componentes del sistema Power to Gas, la inversión que habría que realizar para la inserción del sistema Power to Gas en este complejo residencial sería de 1.600.000 €.

7.2. VALORACIÓN ECONÓMICA DEMANDA ELÉCTRICA

A continuación se muestra en detalle la información referente a la valoración económica de la demanda eléctrica. En primera instancia se calcula la factura eléctrica que tendría la instalación sin generación renovable ni Power to Gas para después calcular estos términos cuando se le añade la instalación fotovoltaica y el sistema Power to Gas y ver de este modo el ahorro que se produce.

La factura eléctrica en España consta principalmente de dos conceptos, el término de potencia y el término de consumo. Además de ello hay que añadir los conceptos del impuesto especial sobre la electricidad (5,1127% [36] aplicable sobre los dos términos anteriores), el alquiler del equipo de medida y el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) (21%).

En el caso de la piscina climatizada tipo, tanto en el caso de no utilizar Power to Gas como utilizándolo, la tarifa considerada es la 3.0A [37] ya que necesita una potencia contratada elevada, superior a 15 kW. Al tratarse por lo tanto de una tarifa con discriminación horaria, cada uno de los periodos (punta, llano y valle) tiene un coste diferente del término de potencia y energía.

Los rangos de potencia aconsejables a contratar en los distintos periodos son los mostrados en la *Tabla 18*.

| Periodos | Sin generación renovable | Utilizando generación renovable |
|----------|--------------------------|---------------------------------|
| PP | 110 kW | 70 kW |
| PLL | 110 kW | 95 kW |
| PV | 100 kW | 100 kW |

Tabla 18. Potencias a contratar generación renovable vs. generación no renovable.

Como puede comprobarse, la aportación del campo solar contribuye beneficiosamente en el término de potencia al reducirlo. Esto se reflejará posteriormente en la factura.

En lo respectivo al término de la energía, los peajes en el caso de considerar generación renovable serán más caros que si no se considerase debido al reciente Real Decreto de Autoconsumo 900/2015 [38] el cual regula un impuesto solar.

Por lo tanto, utilizando datos de peaje de acceso [39] y costes de producción de energía eléctrica se ha obtenido que la factura eléctrica con Power to Gas y generación renovable se reduce alrededor de 35.000 €/año en el caso de las dos localizaciones, esto es casi el 40% de la factura. Claro está que estos valores son orientativos dado que el precio que se paga por la electricidad varía en función de la tarifa de luz que se tenga contratada así como por los impuestos del Gobierno.

7.3. VALORACIÓN ECONÓMICA DEMANDA TÉRMICA

En este apartado van a presentarse las conclusiones alcanzadas tras la valoración económica de la demanda térmica de la piscina climatizada en estudio. Tal y como se ha mostrado en puntos anteriores de la presente memoria, la implantación del Power to Gas en dicho complejo supone una reducción del consumo térmico. Sin embargo, esta reducción es leve, lo que lleva a suponer que la reducción en la factura también lo será.

Las tarifas de gas natural para grandes clientes se estructuran en el término fijo de gas natural y en el término de consumo o de energía que es un término variable. Además, a estos dos conceptos hay que añadirles otros conceptos regulados por el Gobierno como pueden ser el Impuesto sobre Hidrocarburos, el alquiler del contador y el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA).

En el caso de la piscina climatizada considerada, el peaje empleado es el 3.4. [40] al tener un consumo de gas superior a 100.000 kWh/año (1.500.000-1.470.000 kWh/año), tanto en el caso de no utilizar Power to Gas como utilizándolo. Por lo tanto, el término fijo (TF) en este caso son 80,97 €/mes y el Término Variable (TV) 0,013012 €/kWh

[40]. Además, el Impuesto profesional sobre Hidrocarburos tiene un valor de 0,00054 €/kWh [41].

Con estos datos, se ha obtenido que la factura térmica con Power to Gas se reduce alrededor de 10.000 €/año en el caso de las dos localizaciones, es decir, el 10% de la factura. Claro está que estos valores son orientativos dado que estos precios dependerán tanto del Gobierno como de la compañía contratada y los descuentos que puedan ofrecer.

7.4. BALANCE ECONÓMICO

En resumen, los beneficios obtenidos gracias a la aportación de los ahorros térmicos y eléctricos es de 45.000 €/año. Por lo tanto, si se quisiese tener un *Pay-back* de 15 años en la inversión inicial de 1.600.000 €, el precio al que saldría el Power to Gas estaría alrededor de 37 ct/kWh. Este valor queda respaldado por los datos aportados en [21], donde se estudia que el coste del Power to Gas va desde 16,5-39,2 ct/kWh.

Como consecuencia, este precio está lejos de alcanzar los valores de los combustibles fósiles convencionales (2-0,89 ct/kWh) y en la actualidad, la instalación el sistema Power to Gas no resultaría rentable.

Sin embargo, se estima que los precios de esta tecnología mejoren, sobre todo el coste del metanizador. Por lo tanto, suponiendo que el precio del mismo va a reducirse hasta los 130 €/kW [22], que el electrolizador va a descender hasta los 600 € en los próximos años, que habrá un progreso notable en la mejora de las eficiencias de las tecnologías utilizadas y que además de ello, se considera una localización óptima como es el caso de Almería reduciendo de este modo la superficie de paneles necesarios a instalar, 2.600 m² tal y como se han mencionado en el *Apartado 4.5.*, la inversión disminuiría hasta los 1.200.000 €.

Con este valor, el coste del Power to Gas podría reducirse hasta 7,2-10,2 ct/kWh, valores mucho más cercanos a los precios de los combustibles fósiles, cuya tendencia es la de ir incrementando paulatinamente debido al agotamiento de los recursos.

8. CONCLUSIONES

Tras plasmar en la presente memoria la importancia de luchar contra el cambio climático, proponer la aplicación Power to Gas junto con la generación renovable para ayudar en esta lucha mediante su integración en el sector residencial de las piscinas climatizadas, dimensionar dicha tecnología para dos emplazamientos diferentes y estudiar la viabilidad económica del proyecto, se han llegado a las siguientes conclusiones.

La aplicación Power to Gas es una tecnología que todavía está en fase de desarrollo y mejora. Además, los estudios realizados para su aplicación al sector residencial son muy escasos.

Puesto que la tecnología necesaria para llevarlo a cabo no está madura comercialmente, tras el estudio de viabilidad económica, el diseño de este sistema arroja las conclusiones de que los costos del Power to Gas van desde 16,5 ct/kWh hasta 39,2 ct/kWh [34] incluyendo tanto la reutilización del calor como la venta del oxígeno. Con estos precios, comparados con los combustibles fósiles más convencionales como el gas natural (2-3 ct/kWh) o incluso con el biometano, la aplicación Power to Gas no es competitiva hoy en día.

Para que esta tecnología pudiese alcanzar valores competitivos frente a los combustibles fósiles convencionales se tendrían que mejorar los siguientes aspectos tecnológicos.

El electrolizador debería incrementar su eficiencia. Una de las tecnologías que podría mejorar este proceso sería sustituir la actual tecnología de electrolisis alcalina por la electrolisis PEM o por la de óxido sólido, aun en fase de desarrollo, las cuales podrían aportar una eficiencia mucho mayor. Sin embargo, para ello hay que mejorar tecnológicamente ambas opciones. De todos modos, está claro que los costos de producción del hidrógeno son los que dominan los costes totales del proceso y además de ello, el almacenamiento de hidrógeno también puede ser otro de los factores de coste significativo.

Las tecnologías de metanización están progresando rápidamente dado que en la actualidad hay casi 30 empresas [21] trabajando en ellas. Las nuevas investigaciones como los reactores de tres fases mencionados en el *Apartado 6.3.1.1*, podrían dar un vuelco a esta tecnología al no depender significativamente de la temperatura del reactor, problema principal de los metanizadores convencionales.

En conclusión, para que el Power to Gas se convierta en un proceso competitivo, la eficiencia global del conjunto debe mejorarse mucho ya que como muestra la *Figura 27*, actualmente está en un 58%.

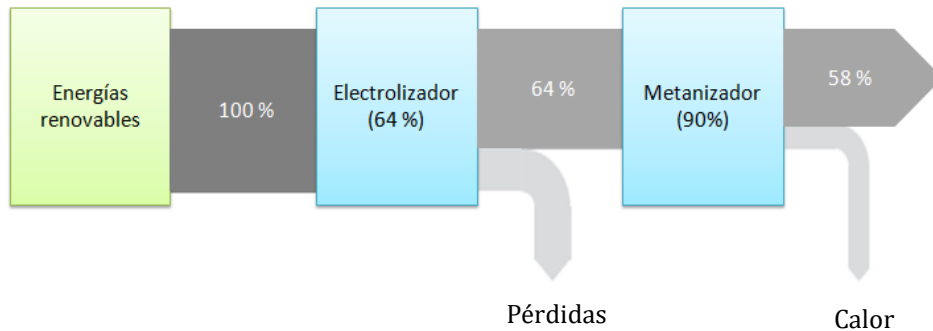


Figura 27. Eficiencia global del sistema Power to Gas.

Otro de los aspectos que ayudaría a rentabilizar el proceso, sería la mejora de la eficiencia de las células fotovoltaicas, dado que tal y como se ha demostrado en el *Apartado 4.3.* este rendimiento es muy bajo y solo se aprovecha una ínfima parte de la energía solar disponible.

Tras la mejora de todos estos componentes, el coste del Power to Gas disminuirá, llegando a 7,2-10,2 ct/kWh en 2050 [34]. Valores más realistas teniendo en cuenta que los costos de los combustibles fósiles van a aumentar en los próximos años debido a su agotamiento.

Sin embargo, pese al inconveniente económico, debe tenerse en cuenta que el Power to Gas presenta aspectos muy positivos y puede desempeñar un papel importante en la transición del sistema energético español. Esta tecnología puede contribuir a la inserción de las energías renovables en los complejos residenciales, minimizar la expansión de la infraestructura de la red eléctrica y valorizar el dióxido de carbono, aspecto muy importante a tener en cuenta si se quiere conseguir un futuro energético de bajo carbono.

La instalación propuesta supondría grandes ventajas medioambientales debidas tanto a la reducción de consumo energético y térmico como a la reducción de las emisiones de CO₂. La considerable cifra de 140 Tn CO₂/año serían evitadas en una piscina climatizada.

También como conclusión puede extraerse que la localización de la piscina jugará un papel importante cuando se resuelvan las barreras tecnológicas, hasta entonces, la diferencia de ahorro que se produce es leve. Esto es así debido a que con la tecnología actual, las potencias de los electrolizadores están muy limitadas y como

consecuencia, el aprovechamiento de la energía solar que se ha extraído en la localización de Almería (mucho mayor que en Zaragoza) queda invalidado.

Por tanto, con todo lo mencionado anteriormente, el Power to Gas podría desempeñar un papel muy importante en el futuro y podría contribuir notablemente en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, para que esta tecnología tenga éxito en el mercado tienen que resolverse distintas barreras tecnológicas y económicas.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- [1] International Energy Agency (IEA), «Key world energy statistics,» 2016.
- [2] Red Eléctrica de España, «El sistema eléctrico español, avance 2016,» 2016.
- [3] Club español de la energía (ENERCLUB), «Balance energético 2016 y perspectivas para 2017,» 2016.
- [4] U.S. Energy Information Administration (EIA), [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/>.
- [5] «Greenpeace research laboratories,» [En línea]. Available: <http://www.greenpeace.to/publications.htm>.
- [6] P. Johnston, D. Santillo, «Carbon Capture and Sequestration: Potential Environmental Impacts,» 2003.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «Carbon Dioxide Capture and Storage,» 2005.
- [8] Jiajian Gao, Yingli Wang, Yuan Ping, Dacheng Hu, Guangwen Xu, Fangna Gu, Fabing Su, «A thermodynamic analysis of methanation reactions of carbon oxides for the production of synthetic natural gas,» *RSC Advances*, vol. 6, 2012.
- [9] Manuel Bailera, Pilar Lisbona, Luis M. Romeo, «Power to gas-oxyfuel boiler hybrid systems,» *International journal of hydrogen energy*, vol. 40, pp. 10168-10175, 2015.
- [10] Manuel Bailera, Pilar Lisbona, Luis M. Romeo, Sergio Espatolero, «Power to Gas-biomass oxycombustion hybrid system: Energy integration and potential applications,» *Applied Energy*, vol. 167, pp. 221-229, 2016.
- [11] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM), Guía sobre Energía Solar Térmica, 2016.
- [12] ZEMedS, Estado del arte de los edificios de consumo de energía casi nulo (nZEB) en la zona mediterránea, 2014.
- [13] L. Merino, «Energías Renovables, El periodismo de las energías limpias,» 21 3 2017. [En línea]. Available: <http://new.energias-renovables.com/articulo/la-mayor-instalacion-de-autoconsumo-de-cordoba-20170321>.
- [14] Boletín Oficial del Estado (B.O.E.), «Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación,» España, 2006.
- [15] A. Gayo Píriz, «Auditoría energética en un apiscina climatizada,» 2009.
- [16] M. B. Mur, «Cálculo de la producción anual de una instalación fotovoltaica en cubierta,» *Técnica Industrial*, nº 293, 2011.
- [17] National Renewable Energy Laboratory (NREL), «National Renewable Energy Laboratory (NREL),» [En línea]. Available: <http://www.nrel.gov/>.
- [18] Centro Natación Helios, «Centro Natación Helios,» [En línea]. Available: <http://www.cnhelios.com/historia-del-club>.
- [19] L.K. Wiginton, H.T. Nguyen, y J.M. Pearce, «Quantifying rooftop solar

- photovoltaic potential for regional renewable energy policy. Computers, Environment and Urban Systems,» vol. 34, pp. 345-357, 2010.
- [20] W. Kreuter, H. Hofmann, «Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 23, pp. 661-666, 1998.
- [21] M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert, T. Kolb, «Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review,» *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371-1390, 2016.
- [22] F. Graf, M. Henel, T. Schaaf, R. Tichler, «Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/>.
- [23] G. Gahleitner, «Hydrogen from renewable electricity: an international review of Power-to-Gas pilot plants for stationary applications,» *International Journal Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 2039-2061, 2013.
- [24] Ø. Ulleberg, T. Nakken, A. Eté, «The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools,» *International Journal Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 1841-1852, 2010.
- [25] M. Carmo, D.L. Fritz, J. Mergel, D. Stolten, «A comprehensive review on PEM water electrolysis,» *International Journal Hydrogen Energy*, vol. 38, p. 2013, 4901-4934.
- [26] R. Mayén-Mondragón, «Celdas de combustible de Óxido Sólido.....¿Una de las soluciones al problema energético?,» *Ide@s CONCYTEG*, vol. 72, nº 6, pp. 647-661, 2011.
- [27] T. Kato, M. Kubota, N. Kobayashi, Y. Suzuoki, «Effective utilization of by-product oxygen from electrolysis hydrogen production,» *Energy*, vol. 30, pp. 2580-2595, 2005.
- [28] J. Lefebvre, M. Götz, S. Bajohr, R. Reimert, T. Kolb, «Improvement of three-phase methanation reactor performance for steady-state and transient operation,» *Fuel Processing Technology*, vol. 132, pp. 83-90, 2015.
- [29] S.-I. Fujita, N. Takezawa, «Difference in the selectivity of CO and CO₂ methanation reactions,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 68, pp. 63-68, 1997.
- [30] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), [En línea]. Available: <http://www.idae.es/>.
- [31] «Energy Solar Kit,» [En línea]. Available: <https://kitdeenergiasolar.com/placas-solares/precios>. [Último acceso: 3 Mayo 2017].
- [32] O.S. Buchholz, A.G.J. van der Ham, R. Veneman, D.W.F. Brilman, S.R.A. Kersten, «Power-to-Gas: Storing Surplus Electrical Energy. A Design Study,» *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 7993-8009, 2014.
- [33] M. Lehner, R. Tichler, H. Steinmüller, M. Koppe, Power-to-Gas: Technology and Business Models, 2014.
- [34] E&E Consultant, «Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire,» Francia, 2014.
- [35] I. d. L. Meléndez, «Estudio económico y de la producción y utilización del hidrógeno».
- [36] Gobierno de España, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, «Controlas

- tu Energía,» [En línea]. Available: <http://www.controlastuenergia.gob.es/factura-electrica/factura/Paginas/conceptos-factura.aspx>. [Último acceso: 6 13 2017].
- [37] «tarifasgasluz,» [En línea]. Available: <http://tarifasgasluz.com>. [Último acceso: 11 06 2017].
- [38] Boletín Oficial del Estado (B.O.E.), «Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo,» España, 2015.
- [39] EDP Energía, «EDP Energía,» [En línea]. Available: <http://www.edpenergia.es/recursosedp/doc/portal-clientes/20130827/precios/tarifas-de-gas-empresas.pdf>. [Último acceso: 11 06 2017].
- [40] EDP Energía, «EDP Energía,» [En línea]. Available: <http://www.edpenergia.es/recursosedp/doc/portal-clientes/20130827/precios/tarifas-electricas-para-empresas.pdf>. [Último acceso: 6 13 2017].
- [41] «Endesa,» [En línea]. Available: <https://www.endesaclientes.com/explicacion-factura.html>. [Último acceso: 11 06 2017].

Bibliografía complementaria

- C. M. Rasero, «Agencia Insular de Energía de Tenerife,» [En línea]. Available: http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random498b0f6840e2d/1233852268_Ponencia_CTE_IDAE_HE5.pdf. [Último acceso: 2 Marzo 2017].
- SMA Solar Technology AG, «SMA Ibérica,» [En línea]. Available: <http://files.sma.de/dl/7680/Perfratio-TI-es-11.pdf>. [Último acceso: 5 Marzo 2017].
- P. Garcia, «Construction 21 España,» [En línea]. Available: <http://www.construction21.org/espana/articulos/es/las-energias-renovables-en-edificacion-ventajas-y-viabilidad-en-eolica-solar-y-biomasa.html>. [Último acceso: 2 Marzo 2017].
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «IDAE,» [En línea]. Available: <http://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>. [Último acceso: 2 Marzo 2017].
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), «Solar Power Europe,» [En línea]. Available: <http://www.solarpowereurope.org/home/>. [Último acceso: 5 Marzo 2017].
- Antonio Pino Priego, «Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno,» Sevilla, 2009.
- Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza, «Balances de Energía,» Zaragoza, 2015.

Som energía, «Som energía,» [En línea]. Available:
<http://es.support.somenergia.coop/article/176-que-horarios-tienen-los-periodos-de-la-tarifa-3-0a>. [Último acceso: 25 Marzo 2017].

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Evolución de la generación eléctrica renovable y no renovable [2]. | 9 |
| Figura 2. Evolución de las emisiones de CO ₂ asociadas a la generación eléctrica peninsular [2]. | 9 |
| Figura 3. Principales productores de petróleo en el mundo [1] [4]. | 10 |
| Figura 4. Emisiones de CO ₂ derivadas de los combustibles fósiles en el mundo desde 1971 hasta 2014 en Mt [1]. | 11 |
| Figura 5. Relación entre temperatura, tensión e intensidad eléctrica en los paneles [17]. | 27 |
| Figura 6. Evolución de las eficiencias de conversión logradas en células fotovoltaicas [17]. | 28 |
| Figura 7. Relación producción-consumo piscina climatizada en Febrero en Zaragoza. | 30 |
| Figura 8. Relación producción-consumo piscina climatizada en Mayo en Zaragoza. | 30 |
| Figura 9. Relación producción-consumo piscina climatizada en Junio en Zaragoza. | 31 |
| Figura 10. Relación producción-consumo piscina climatizada en Noviembre en Zaragoza. | 31 |
| Figura 11. Relación producción-consumo piscina climatizada en Febrero-Mayo-Junio-Noviembre en Almería. | 32 |
| Figura 12. Relación exceso eléctrico-demanda térmica Febrero-Mayo-Junio-Noviembre en Zaragoza. | 34 |
| Figura 13. Relación exceso eléctrico-demanda térmica Febrero-Mayo-Junio-Noviembre en Almería. | 35 |
| Figura 14. Proceso global del Power to Gas en el caso de estudio. | 36 |
| Figura 15. Potencias de electrolizador seleccionadas frente al exceso eléctrico de la producción fotovoltaica en Zaragoza. | 39 |
| Figura 16. Potencias de electrolizador seleccionadas frente al exceso eléctrico de la producción fotovoltaica en Almería. | 39 |
| Figura 17. Evolución de la entalpía de la reacción del metanizador frente a la temperatura. | 43 |
| Figura 18. Evolución de la entalpía de la reacción de combustión frente a la temperatura. | 44 |
| Figura 19. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Febrero en Zaragoza. | 45 |
| Figura 20. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Mayo en Zaragoza. | 45 |
| Figura 21. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Junio en Zaragoza. | 46 |
| Figura 22. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Noviembre en Zaragoza. | 46 |
| Figura 23. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Febrero en Almería. | 47 |
| Figura 24. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Mayo en Almería. | 47 |
| Figura 25. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Junio en Almería. | 48 |
| Figura 26. Consumo térmico sin PtG vs. con PtG en el mes de Noviembre en Almería. | 48 |
| Figura 27. Eficiencia global del sistema Power to Gas. | 55 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Edificios con obligación de instalar sistemas solares fotovoltaicos [14] | 18 |
| Tabla 2. Consumos eléctricos Febrero. | 20 |
| Tabla 3. Consumos eléctricos Mayo..... | 21 |
| Tabla 4. Consumos eléctricos Junio. | 21 |
| Tabla 5. Consumos eléctricos Noviembre..... | 22 |
| Tabla 6. Consumos térmicos Febrero. | 23 |
| Tabla 7. Consumos térmicos Mayo. | 23 |
| Tabla 8. Consumos térmicos Junio..... | 24 |
| Tabla 9. Consumos térmicos Noviembre. | 24 |
| Tabla 10. Producción de hidrógeno en Zaragoza. | 38 |
| Tabla 11. Producción de hidrógeno en Almería. | 40 |
| Tabla 12. Calor [kWh] extraído de la reacción en el metanizador de Zaragoza. | 43 |
| Tabla 13. Calor [kWh] extraído de la reacción en el metanizador de Almería. | 43 |
| Tabla 14. Calor [kWh] extraído de la reacción de combustión en Zaragoza. | 44 |
| Tabla 15. Calor [kWh] extraído de la reacción de combustión en Almería. | 44 |
| Tabla 16. Comparación de la generación de dióxido de carbono con y sin sistema PtG en Zaragoza..... | 49 |
| Tabla 17. Comparación de la generación de dióxido de carbono con y sin sistema PtG en Almería. | 49 |
| Tabla 18. Potencias a contratar generación renovable vs. generación no renovable..... | 52 |



Trabajo Fin de Grado

ANEXO A. CATÁLOGOS DE FABRICANTES

Autor

Gladys Sesé Alloza

Director

Luis Miguel Romeo Giménez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)


Universidad de Zaragoza

2017


A.1. CATÁLOGO MÓDULO FOTOVOLTAICO

En el presente anexo se adjunta el módulo fotovoltaico escogido para realizar el dimensionado del campo solar que aparece en el *Apartado 4.3.* de la presente memoria.

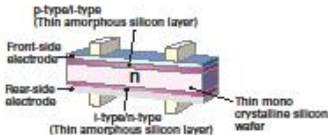
HIT PHOTOVOLTAIC MODULE
HIP-210NHE1



The SANYO HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) solar cell is made of a thin mono crystalline silicon wafer surrounded by ultra-thin amorphous silicon layers. This product provides the industry's leading performance and value using state-of-the-art manufacturing techniques.



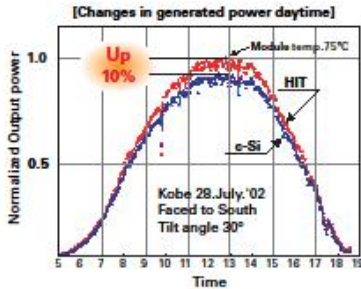
HIT Solar Cell Structure



Development of HIT solar cell was supported in part by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

Benefit in Terms of Performance
High efficiency cell: 18.7%, Module: 16.8%
 The HIT cell and module have the world's highest level of conversion efficiency in mass production.

High performance at high temperatures
 Even at high temperatures, the HIT solar cell can maintain higher efficiency than a conventional crystalline silicon solar cell.



Environmental Friendly Solar Cell
More Clean Energy
 HIT can generate more annual power output per unit area than other conventional crystalline silicon solar cells.

Lead Free
 HIT solar cell modules are lead free. This feature minimizes the impact for environment in the future.

Benefit in Terms of Quality
High quality in accordance with ISO 9001 and 14001 standards
 HIT solar cell and modules are subject to strict inspections and measurements to ensure compliance with electrical, mechanical and visual criteria.

