



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación dinámica para el dimensionado de una
instalación basada en energías renovables que
abastece energéticamente a una construcción
Pasivhaus de emisiones cero*

Autor/es

Jose Luis Díaz del Río

Tutor/es

Begoña Peña Pellicer (UNIZAR)

Jesús Montero Escuder (ARPA)

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

Zaragoza, 2021

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Motivación	8
1.2. Alcance.....	8
1.3. Objetivos	9
2. ANTECEDENTES.....	10
2.1. Estado del arte del proyecto	10
2.2. Estandar Pasivhaus.....	11
2.3. Metodología	12
3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	13
3.1. Contexto	13
3.2. Instalación general.....	13
3.3. Detalles de los equipos.....	15
3.4. Recursos climáticos:.....	20
3.4.1. Zaragoza, España	20
3.4.2. Riga, Letonia	22
3.4.3. La Antártida.....	24
3.5. Consumos energéticos:.....	26
3.5.1. Usos generales.....	26
3.5.2. ACS – Agua caliente sanitaria.....	29
3.5.3. Climatización	35
3.5.4. Comparación de los consumos en los tres escenarios	41
3.5.5. Conclusión de los consumos	42
4. DISEÑO DEL MODELO	43
4.1. Hipótesis.....	43
4.2. HOMER: Introducción de datos al programa.....	44
5. RESULTADOS	47
5.1. Resultados de HOMER, Zaragoza	49
5.2. Resultados de HOMER, Riga.....	52
5.3. Resultados de HOMER, Antártida	55
6. CONCLUSIONES	58
7. ANEXOS.....	60
7.1. Anexo 1: Explicación detallada de los cálculos (COPS).....	60

Índice de figuras

Ilustración 1: Esquema del modelo de un sistema energético autónomo con energías renovables y almacenamiento de hidrógeno. Fuente: [1]	10
Ilustración 2: Esquema de la realización de un modelado energético. Fuente: Elaboración propia.	12
Ilustración 3: Estructura AR-20 HC. Fuente: Elaboración propia con [5] – No detallado.....	14
Ilustración 4: Estructura ZEM cuatro contenedores. Fuente: Elaboración con [5] – No detallado.	14
Ilustración 5: Gráfica curva de potencia Aerogenerador. Fuente: Confidencial.	16
Ilustración 6: Gráfica Radiación Global, Zaragoza, España. Fuente: [2].	20
Ilustración 7: Gráfica Temperaturas Zaragoza, España. Fuente: [2].	21
Ilustración 8: Gráfica Velocidad viento, Zaragoza, España. Fuente: [2].	21
Ilustración 9: Gráfica Radiación Global, Riga, Letonia. Fuente: [2].	22
Ilustración 10: Gráfica Temperaturas Riga, Letonia. Fuente: [2].	22
Ilustración 11: Gráfica Velocidad viento, Riga, Letonia. Fuente: [2].	23
Ilustración 12: Gráfica Radiación, La Antártida. Fuente: [2].	24
Ilustración 13 Gráfica Temperaturas, La Antártida. Fuente: [2].	24
Ilustración 14: Gráfica Velocidad viento, La Antártida. Fuente: [2].	25
Ilustración 15: Perfil de Consumo por Usos Generales, sin revisar.	27
Ilustración 16: Perfil de Consumo por Usos Generales, revisado.	28
Ilustración 17: Perfil de consumo térmico de ACS para un día típico, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.	30
Ilustración 18: Curva del COP de la bomba de calor para ACS. Fuente: Elaboración propia.	31
Ilustración 19: Consumos por ACS, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.	32
Ilustración 20: Gráfica Consumos anuales por ACS, Riga, Letonia. Fuente: Elaboración propia.	33

Ilustración 21: Gráfica Consumos anuales por ACS, Riga, Letonia. Fuente: Elaboración propia.	34
Ilustración 22: Curva del COP de la bomba de calor para Climatización. Fuente: Elaboración propia.....	35
Ilustración 23: Consumo Térmico - Eléctrico por Climatización, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.....	37
Ilustración 24: Consumo Térmico - Eléctrico por Climatización, Riga. Fuente: Elaboración propia.....	38
Ilustración 25: Gráfica Consumo Térmico por Climatización, Antártida. Fuente: Elaboración propia.....	40
Ilustración 26: Gráfica de distribución de consumos, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia. ...	41
Ilustración 27: Gráfica de distribución de consumos, Riga. Fuente: Elaboración propia.	41
Ilustración 28: Gráfica de distribución de consumos, Antártida. Fuente: Elaboración propia....	42
Ilustración 29: Gráfico de comparación de Consumos totales en las tres ubicaciones estudiadas.	42
Ilustración 30: Modelo energético ZEM. Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 31: Perfil de consumo medio diario, HOMER. Fuente: Elaboración propia.....	44
Ilustración 32: Perfiles de consumo por mes, HOMER. Fuente: Elaboración propia.....	44
Ilustración 33: Recursos climáticos, HOMER. Fuente: Elaboración propia.	45
Ilustración 34: Gráfico de la Radiación media mensual, HOMER. Fuente: Elaboración propia.	45
Ilustración 35: Gráfico de la Velocidad del viento media mensual, HOMER. Fuente: Elaboración propia.....	45
Ilustración 36: Gráfico de la Temperatura media mensual, HOMER. Fuente: Elaboración propia.	46
Ilustración 37: Equipos energéticos, HOMER. Fuente: Elaboración propia.....	46
Ilustración 38: Modelo energético común para los tres escenarios, HOMER. Fuente: Elaboración propia.....	46

Ilustración 39: Resultados de HOMER para la ubicación de Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.	47
Ilustración 40: Resultados HOMER Zaragoza - Distribución de la producción eléctrica. Fuente: Elaboración propia.	49
Ilustración 41: Resultados HOMER Zaragoza - Producción de H2 del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.	50
Ilustración 42: Resultados HOMER Zaragoza – Consumo pila de H2. Fuente: Elaboración propia.	50
Ilustración 43: Resultados HOMER Zaragoza – Almacenamiento de H2 en los tanques. Fuente: Elaboración propia.	50
Ilustración 44: Resultados de HOMER para la ubicación de Riga. Fuente: Elaboración propia.	52
Ilustración 45: Resultados HOMER Riga - Distribución de la producción eléctrica. Fuente: Elaboración propia.	52
Ilustración 46: Resultados HOMER Riga - Producción de H2 del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.	53
Ilustración 47: Resultados HOMER Riga - Producción pila de H2. Fuente: Elaboración propia.	53
Ilustración 48: Resultados HOMER Riga – Almacenamiento de H2 en los tanques. Fuente: Elaboración propia.	53
Ilustración 49: Resultados de HOMER para la ubicación de la Antártida. Fuente: Elaboración propia.....	55
Ilustración 50: Resultados HOMER Antártida - Distribución de la producción eléctrica. Fuente: Elaboración propia.	55
Ilustración 51: Resultados HOMER Antártida - Producción de H2 del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.	56
Ilustración 52: Resultados HOMER Antártida - Producción pila de H2. Fuente: Elaboración propia.....	56

Ilustración 53: Resultados HOMER Antártida – Almacenamiento de H2 en los tanques. Fuente: Elaboración propia.	56
--	----

Índice de tablas

Tabla 1: Características del Aerogenerador. Fuente: Confidencial.....	15
Tabla 2: Características Placa solar fotovoltaica. Fuente: Confidencial.	16
Tabla 3: Características Electrolizador. Fuente: Confidencial.	17
Tabla 4: Características Secador de H2. Fuente: Confidencial.	17
Tabla 5: Características Tanque de H2 baja presión. Fuente: Confidencial.....	18
Tabla 6: Características Tanque de H2 alta presión. Fuente: Confidencial.....	18
Tabla 7: Características Pila de H2. Fuente: Confidencial.....	18
Tabla 8: Características Compresor. Fuente: Confidencial.	19
Tabla 9: Características Batería. Fuente: Confidencial.	19
Tabla 10: Equipos y potencias en bases militares españolas. Fuente: Elaboración propia con aportación de [3].	26
Tabla 11: Datos iniciales para ACS. Fuente: Elaboración propia.	29
Tabla 12: COPS de ACS de la bomba de calor. Fuente: Confidencial - Fabricante.	31
Tabla 13: COPS de Climatización de la bomba de calor. Fuente: Confidencial - Fabricante.....	35
Tabla 14: Consumos térmicos por Climatización, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de [3].	36
Tabla 15: Consumos térmicos por Climatización, Riga, Letonia. Fuente: Elaboración propia. .	38
Tabla 16: Consumos térmicos por Climatización, Antártida. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 17: Agrupación de resultados de los tres escenarios estudiados. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 18: Cantidad de equipos en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 19: Cantidad de equipos en Riga. Fuente: Elaboración propia.	59

Tabla 20: Cantidad de equipos en la Antártida. Fuente: Elaboración propia.....	59
Tabla 21: COPS de referencia para el cálculo horario, Excel. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 22: Variables creadas para interpolación de los COPS, Excel. Fuente: Elaboración propia.	60
Tabla 23: Ejemplo de cálculo del COP interpolado, Excel. Fuente: Elaboración propia.....	62

Bibliografía

- [1] METEOBLUE, «METEOBLUE,» [En línea]. Available: <https://meteoblue.com>.
- [2] CUD, «CENTRO UNIVERSITARIO DE LA DEFENSA, ZARAGOZA,» [En línea]. Available: <http://cud.unizar.es/>.
- [3] B+Haus, «BAUHAUS ARQUITECTURA EFICIENTE,» [En línea].
- [4] FHA, «FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN,» [En línea]. Available: <https://hidrogenoaragon.org/es/>.
- [5] ARPA, «ARPA Equipos Móviles de Campaña,» [En línea]. Available: <https://arpaemc.com/>.
- [6] U. o. L.-b. S. Faculty of Mechanical Engineering, Energy and Buildings, [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/enbuild.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En la actualidad se está innovando continuamente en la implantación de sistemas de generación de energía por medio de los recursos naturales y renovables; los cuales cada vez son más eficaces y fiables. El aprovechamiento de dichas energías de manera eficiente se ha convertido en uno de los principales objetivos para la humanidad; dicho por la Unión Europea, debido a que por medio de la correcta utilización de ellas se podrían conseguir grandes avances que favorezcan al medio ambiente, una de las necesidades principales actuales en el planeta y la no dependencia de combustibles fósiles.

Con la correcta utilización de estas energías se podría frenar el cambio climático y proteger el futuro de nuestras generaciones. Es por ello que algunas empresas se están introduciendo en el mundo de las energías renovables, para ser capaces de sustituir los medios de generación de energía convencionales que contaminan el planeta utilizando los combustibles fósiles, por los que se bastan de los recursos naturales.

1.2. Alcance

En este trabajo fin de grado se ha realizado el dimensionamiento energético de un módulo habitable de emisiones cero para 8 personas en la Antártida, por medio de la simulación con el software HOMER para el autoabastecimiento por medio de energías renovables en su totalidad y respetando las exigencias del Pasivhaus. Dichas energías renovables serían: solar y eólica, con almacenamiento energético por medio de hidrógeno y baterías.

El módulo denominado **ZEM: Zero Energy Mod** se desarrolla dentro de un proyecto LIFE destinado a medio ambiente y uso eficiente de los recursos por la Unión Europea.

Los socios implicados especializados en diferentes partes claves del proyecto son:

- EQUIPOS MÓVILES DE CAMPAÑA ARPA, S.A.U., en la cual se ha realizado este TFG.
- Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías de hidrógeno en Aragón.
- B+HAUS Arquitectura eficiente.
- Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.

En este proyecto existen dos tipos de edificios; uno destinado a usos de trabajo de investigación y otro a usos de dormitorio, este último sería el ya nombrado ZEM, en el cual se va a centrar la realización de este TFG. En la construcción destinada a dormitorio se contemplan los usos característicos de un hogar donde existen consumos por iluminación, por agua caliente sanitaria y por aparatos eléctricos de uso doméstico. Mientras que en la construcción destinada al trabajo tienen unos consumos diferentes y no van a ser tratados.

1.3. *Objetivos*

El objetivo principal del TFG se centra en conseguir elegir los equipos necesarios para cumplir con un correcto abastecimiento energético del edificio ZEM con uso de dormitorio en diferentes ubicaciones durante un año en cada una.

Los objetivos necesarios para lograrlo son:

- Dimensionar un modelo energético que se base únicamente en energías renovables y que abarque el recurso solar, eólico y almacenamiento de Hidrógeno con sus correspondientes equipos. De esta manera, se quiere comprobar como de útil y eficiente es el uso del Hidrógeno para este tipo de instalación.
- Realizar un sólido 3D en el software SOLIDWORKS de los contenedores que forman el edificio.
- Recopilar datos de recursos climáticos y de demandas energéticas de la instalación ZEM en las distintas ubicaciones estudiadas. Ya sea por fuentes externas o por medio de datos obtenidos por alguna de las empresas implicadas en el proyecto.
- Desarrollar un módulo energético en el software HOMER ENERGY.
- Realizar las simulaciones en HOMER para distintos escenarios y obtener los resultados del módulo energético creado; como son las potencias instaladas necesarias y la producción eléctrica y de Hidrógeno.
- Analizar los resultados obtenidos y llegar a las conclusiones sobre la simulación elegida con el número de equipos necesarios para llevar a cabo el proyecto ZEM.
- Alcanzar las conclusiones sobre la eficiencia del sistema con el uso de Hidrógeno y su proyección a futuro.

2. ANTECEDENTES

2.1. Estado del arte del proyecto

Las crecientes necesidades de energía y los costes inciertos de los futuros suministros de combustibles fósiles, junto con la mitigación de los efectos del cambio climático y la preservación del entorno natural, son las razones del creciente interés por las fuentes de energía renovables (FER), en contraposición al uso centralizado de energía primaria fósil. Aunque las viviendas totalmente autosuficientes desde el punto de vista energético son todavía escasas, las unidades de energía solar y eólica han sido ampliamente adoptadas para las viviendas familiares privadas. Sin embargo, la introducción de las fuentes de energía renovables en el suministro energético, plantea ciertos problemas a la hora de equilibrar la demanda y el suministro de energía debido a su naturaleza variable y no almacenable. Esto se aplica especialmente a la energía eólica y solar, y (en menor medida) a otras FER, como la energía geotérmica, la hidroeléctrica y la biomasa. Además, un único usuario autónomo es el caso más difícil de la integración de las FER, debido a su incapacidad para importar y exportar el excedente de energía, y para hacer frente al desajuste entre la producción y la demanda de energía, suele ser necesario el uso del almacenamiento de energía. La tecnología de hidro-generación es una solución de almacenamiento técnicamente viable, especialmente en los sistemas energéticos con una elevada proporción de energías renovables. Ya se han realizado varias simulaciones numéricas técnicas y económicas de sistemas energéticos autónomos con almacenamiento de hidrógeno. Aunque se han propuesto y estudiado sistemas energéticos autónomos de FER-hidrógeno, las deficiencias comunes de estos análisis incluyen un diseño predeterminado del sistema, la optimización del rendimiento del sistema sin la optimización preliminar de su configuración o diseño, parámetros de entrada excesivamente generalizados, como el uso de conjuntos de datos típicos de consumo diario, la simulación a corto plazo (día, semana) y, por último, modelos numéricos y resultados de simulación que no se evalúan ni verifican experimentalmente. Los estudios también muestran que los resultados dependen en gran medida de numerosos factores locales, como las condiciones meteorológicas; por lo tanto, es necesario un análisis específico del lugar para obtener resultados creíbles y una posterior evaluación experimental de los resultados numéricos.

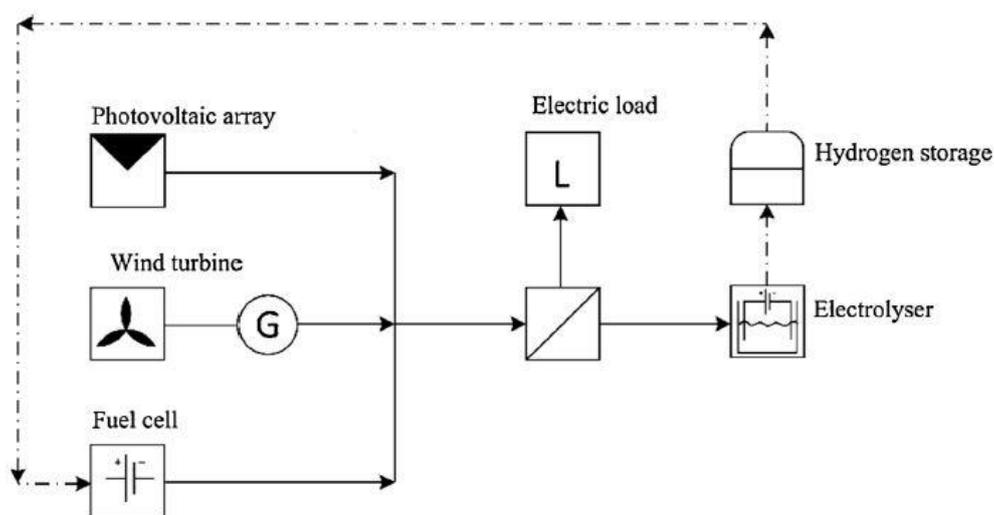


Ilustración 1: Esquema del modelo de un sistema energético autónomo con energías renovables y almacenamiento de hidrógeno. Fuente: [1]

En la *Ilustración 1* se describe y analiza un sistema de energía renovable-hidrógeno para el suministro de energía autosuficiente de una sola vivienda. En este ejemplo, el hidrógeno se produce (y se almacena en un depósito) mediante un electrolizador, que se alimenta de la electricidad excedente de las fuentes de energía renovable, utilizando tecnologías solares y eólicas. Cuando las fuentes de energía renovables son escasas, o la demanda es alta, se necesita energía adicional; por lo tanto, la pila de combustible convierte la energía química del gas Hidrógeno almacenado directamente en electricidad (normalmente por la noche y en invierno).

2.2. *Estandar Pasivhaus*

Como se ha explicado anteriormente, se quiere conseguir que la construcción modular del ZEM, sea certificada por el Estándar de Pasivhaus.

Los edificios Passivhaus se caracterizan por conseguir reducir en un 75% las necesidades de calefacción y refrigeración. La poca energía suplementaria que requieren se puede cubrir con facilidad a partir de energías renovables, convirtiéndose en una construcción con un coste energético muy bajo para el propietario y el planeta.

El Estándar no supone el uso de un tipo de producto, material o estilo arquitectónico específicos sino la optimización de los recursos existentes a través de técnicas pasivas, como por ejemplo un buen factor de forma, que reduzca la superficie en contacto con el exterior para disminuir las necesidades de climatización, una orientación correcta de las ventanas para aprovechar el calor del sol cuando están cerradas y la ventilación natural al abrirlas, o poner protecciones solares que impidan un sobrecalentamiento en verano.

Los cinco principios del Estándar Pasivhaus son los siguientes:

- Excelente aislamiento térmico.
- Ventanas y puertas de altas prestaciones.
- Ausencia de puentes térmicos.
- Hermeticidad del aire.
- Ventilación mecánica con recuperación de calor.

Y para recibir la certificación de Pasivhaus en una edificación, se deben cumplir los siguientes requisitos básicos:

- Demanda energética de calefacción inferior a 15 kWh/m²año.
- Demanda energética de calefacción inferior a 15 kWh/m²año.
- Demanda de energía primaria inferior a 120 kWh/m² año, dedicada a calefacción, agua caliente y electricidad.
- Hermeticidad menor de 0,6 renovaciones de aire por hora.

La tecnología Pasivhaus, es muy útil para este proyecto ya que se especializa en el completo aislamiento y la eliminación de los puentes térmicos. Se ha elegido este método para que el módulo habitable mantenga su temperatura interior constante y confortable para lograr así, la posibilidad de habitar en una zona climática extrema a pesar de las bajas temperaturas y con un consumo que no sea desorbitado, haciendo posible el proyecto ZEM.

2.3. Metodología

En un principio, se va a necesitar de una amplia etapa de recogida de datos. Se deberán tomar toda la información reciente respecto a la radiación global, temperatura y velocidad del viento para los distintos escenarios climáticos estudiados.

Tras ello, se procederá al cálculo de las demandas energéticas para cada zona, y en función de ellas, junto con los datos de los recursos climáticos obtenidos anteriormente, se podrá realizar el dimensionamiento del sistema energético y sus equipos. Cuando se habla de la demanda energética, se deben diferenciar tres tipos diferentes de ellas que conformaran a la demanda total. Por lo tanto, el consumo a cubrir en el ZEM se compondrá de usos generales (luz, electricidad para usos como cargadores), agua caliente sanitaria y climatización.

Una vez se hayan obtenido los datos de recursos climáticos y las demandas energéticas necesarias, se procederá con la fase de diseño del modelo. Dicho diseño será realizado en el software "HOMER", un programa dedicado a la realización de proyectos de energías renovables, en el cual se introducen los datos recopilados en las fases anteriores (recursos climáticos y demandas) y es capaz de modelar distintas distribuciones de los equipos a la vez que representa los consumos divididos para cada equipo y procedentes de cada fuente de energía.

Finalmente, cuando el programa haya calculado las distintas posibilidades en cuanto a distribución de los equipos energéticos se refiere, se analizarán en función de los diferentes criterios que puedan interesar, como son la eficiencia, los costes, la producción de hidrógeno o la seguridad de abastecimiento. Tras elegir el criterio que más interese, se tendrá definido el modelo energético con los equipos definitivos para abastecer al ZEM en cada uno de los tres escenarios climáticos estudiados. Por lo tanto, según la zona climática que se analice, el criterio más restrictivo y necesario puede cambiar debido a que se tendrán diferentes necesidades energéticas y escenarios más o menos extremos.

En resumen, la metodología a seguir para el dimensionamiento energético del módulo quedaría totalmente definida en el esquema mostrado en la **Ilustración 2**:

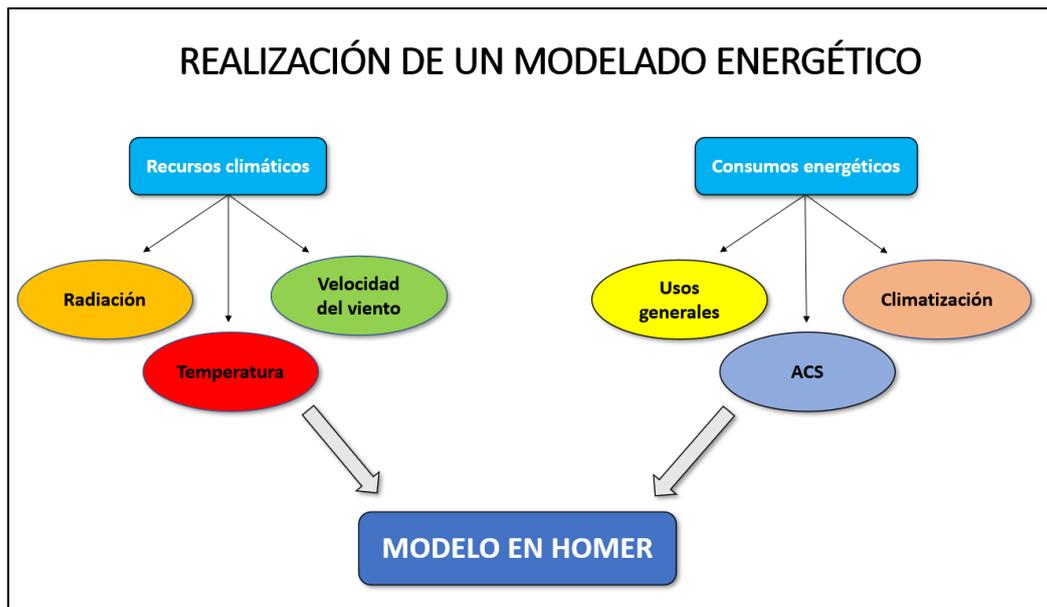


Ilustración 2: Esquema de la realización de un modelado energético. Fuente: Elaboración propia.

3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

3.1. Contexto

Se va a dimensionar el ZEM para que se autoabastezca por medio de energías renovables durante los meses de investigación en la base militar Gabriel de Castilla (Isla Decepción, La Antártida), pero previamente se quiere comprobar el comportamiento de la construcción en diferentes zonas climáticas, donde se van a tener diferentes recursos y tipos de demandas.

Por lo tanto, se desea llevar el ZEM a la base militar de San Gregorio (Zaragoza, España) durante un año y posteriormente a la base militar de Nato de Adazi (Riga, Letonia) durante otro año. Ambos escenarios climáticos tienen climas que son considerados extremos en diferentes épocas del año y a la vez, son muy diferentes. Es por ello que en los próximos apartados de este proyecto se van a mostrar los datos de los recursos climáticos de las tres zonas estudiadas, para que a partir de ellos y junto con los consumos de cada zona, se pueda realizar el modelo de los equipos necesarios para abastecer el ZEM.

Una vez superadas con éxito las dos fases previas, se llevaría el ZEM a la Antártida para darle uso de dormitorio por los investigadores españoles durante 4 meses del verano antártico, realmente el invierno en España, y de manera que sea abastecido energéticamente únicamente por un módulo cuyas fuentes de energía sean renovables. Tras habitar el módulo dicho periodo, el objetivo es lograr que este se abasteciera durante los 8 meses restantes del año, el invierno antártico, de manera totalmente autosuficiente con los recursos renovables y sin necesidad de supervisión. De esta manera, lo que se pretende es que los investigadores españoles tengan una base en la Antártida a la que pueden acudir los 4 meses que necesitan para trabajar, sin obligación de desmontar las instalaciones para traerlas de vuelta y tener así el ZEM disponible y preparado para su funcionamiento.

3.2. Instalación general

En cuanto a las instalaciones de la construcción modular, se va a necesitar un módulo energético y tres módulos habitacionales, ambos construidos a partir de contenedores de medidas estándar de 20 pies. El contenedor elegido para ser la base de estos módulos será el AR-20 HC (high cube) de 6.058 mm de longitud, 2.438 mm de ancho y 2.896 mm de alto.

Se escogió el AR-20 debido a que es un contenedor fácil de transportar, tiene la ventaja de poder desmontarse para su transporte en un chasis superior, chasis inferior, y por otro lado los pilares y los paneles que forran al contenedor; por lo tanto, es una opción perfecta para el ZEM.

El edificio se va a componer de cuatro contenedores forrados con paneles interiores de 100 mm de espesor rellenos de lana de roca; que son las paredes que forman las propias habitaciones y por fuera se recubrirán con una piel exterior a base de paneles de 200 mm cuyo interior es XPS; un poliestireno extruido muy aislante y de estructura celular cerrada. En total, queda una superficie total de edificio a climatizar de 40 m².

Con ayuda del programa Solidworks, se ha realizado el modelo en 3D del AR-20 para estimar el espacio disponible con los equipos que deberían ir en su interior y poder elegirlos adecuadamente.

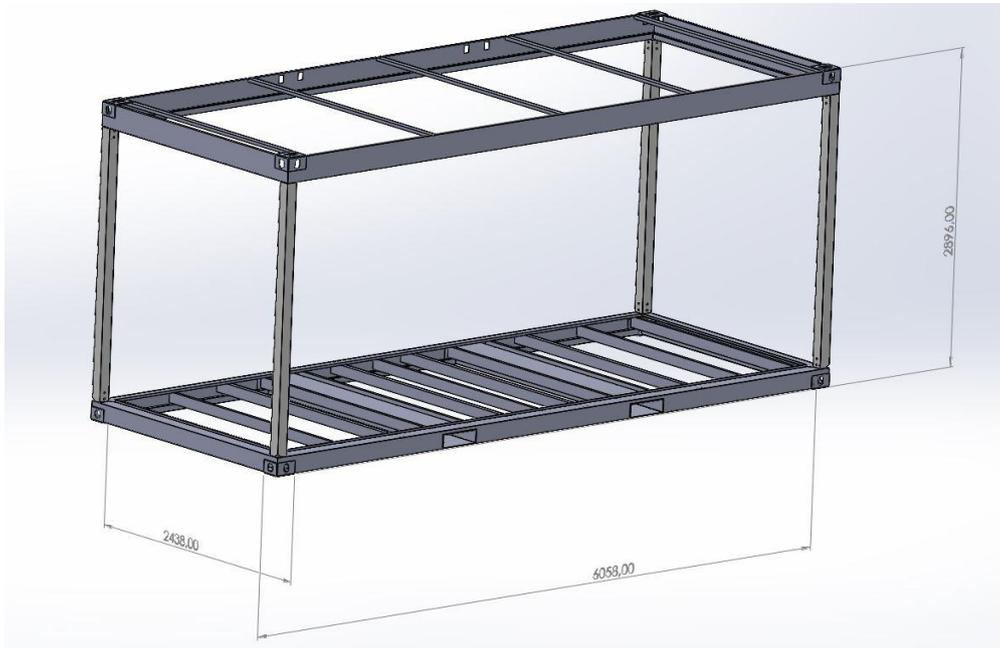


Ilustración 3: Estructura AR-20 HC. Fuente: Elaboración propia con [5] – No detallado

Dichos módulos se colocan formando en un cuadrado entre ellos, para ser lo más compactos posibles y tras un forrado de los contenedores, conseguir el mayor sellado posible, minimizando al máximo cualquier puente térmico y garantizando la temperatura deseada en su interior. Se realizó el ensamblaje de los modelos 3D para poder ver así una aproximación de como quedaría en la realidad dicha distribución.

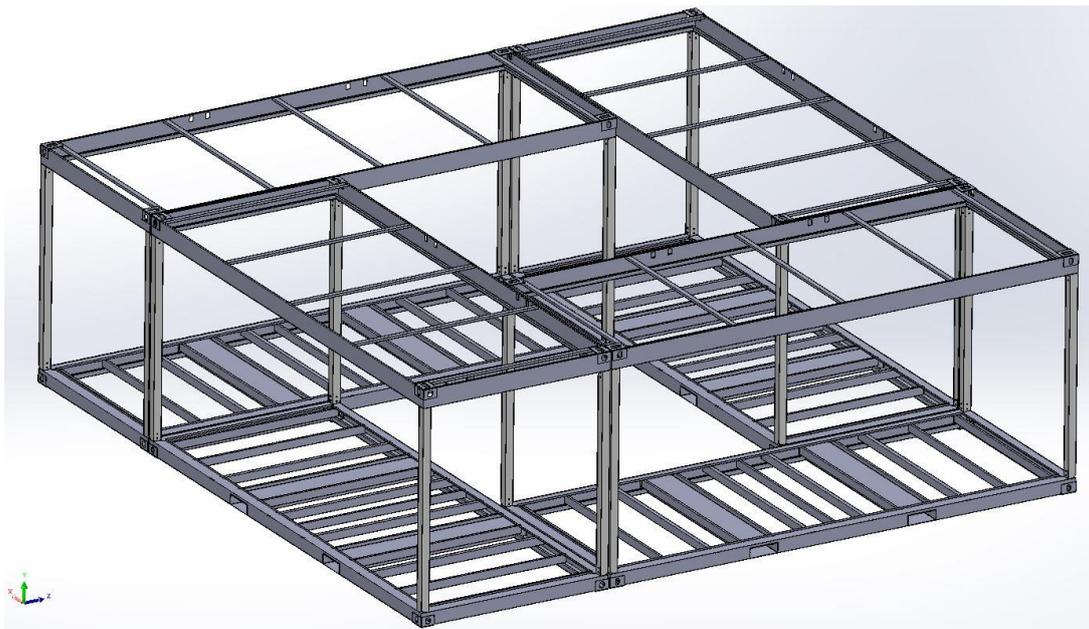


Ilustración 4: Estructura ZEM cuatro contenedores. Fuente: Elaboración con [5] – No detallado.

Por otro lado, respecto a las **instalaciones energéticas** se necesitarán tanto aerogeneradores como placas solares fotovoltaicas, ambas generando electricidad destinada a:

- La red del módulo habitacional para el uso doméstico.
- El almacenamiento en baterías situadas en el módulo energético.

A estas fuentes renovables de energía se añadiría la del hidrógeno por medio de un rack provisto de electrolizadores, tanque de agua y un secador. Para hacer funcionar los electrolizadores, se abastecerán de electricidad proveniente de las baterías, previamente cargadas con energía de los excedentes de las PV y el aerogenerador, todos estos equipos situados en el módulo energético.

Además de estos equipos, se necesitará un compresor para comprimir el Hidrógeno obtenido de los electrolizadores y llevarlo a los tanques de hidrógeno para su almacenamiento. Dichos tanques serán tres de alta presión a 450 bar y uno de baja presión a 60 bar.

Finalmente, se necesitará de una pila de combustible para conseguir la generación de electricidad a partir del hidrógeno. Esta fuente de energía renovable se utilizará en caso de no disponer de las otras dos fuentes que generan electricidad en el ZEM; la eólica y la solar. Por lo tanto, es una manera de asegurarse de que el módulo habitacional estará en todo momento abastecido, incluso en momentos donde el recurso natural sea nulo, ya que se tendrán tanques de Hidrógeno listos para generar electricidad en dichos momentos.

3.3. *Detalles de los equipos*

Desde Arpa se tienen elegidos los equipos energéticos y a continuación se van a ver sus características principales. Sabiendo las potencias de los equipos y una vez obtenido el resultado de la simulación con la potencia total necesaria, se podrá saber que cantidad de cada equipo se necesita para el modelo energético.

- **Aerogenerador**

Para la generación de energía eólica se ha escogido un aerogenerador de 3 kW de potencia, capaz de cubrir la demanda energética de cualquier vivienda habitual. La eficiencia de su generación y diseño permite generar energía con muy bajo viento y a su vez soportar fuertes vientos, manteniendo siempre una producción eficiente. Tiene una producción media de 30 kWh/día, con vientos de entre 8 y 12 m/s de media.

Tabla 1: Características del Aerogenerador. Fuente: Confidencial.

Generador	250 rpm nominales
Potencia	3000 W
Potencia Nominal	1900 W (IEC 61400-2)
Tensión	24/ 48/ 220 V
Diámetro	3,8 m

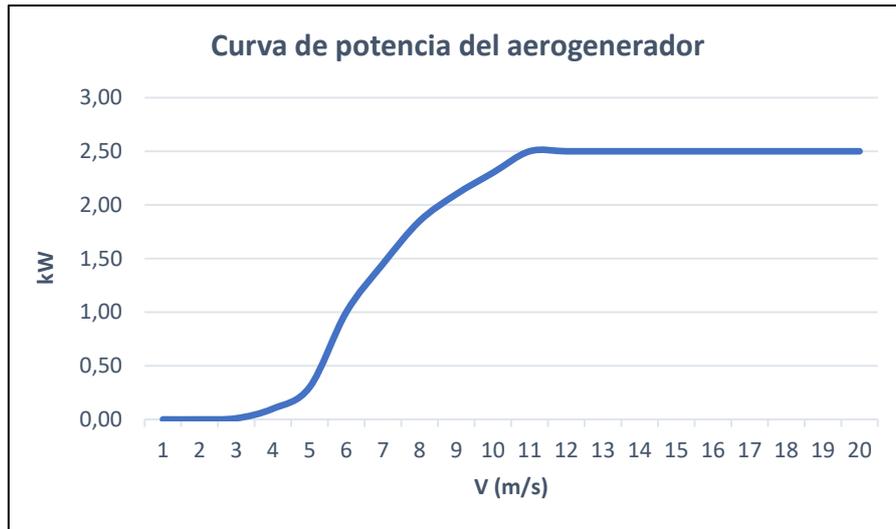


Ilustración 5: Gráfica curva de potencia Aerogenerador. Fuente: Confidencial.

- **Placa solar fotovoltaica (PV)**

Para la generación de energía solar, se han escogido unos paneles solares fotovoltaicos de 335 W. Se tratan de paneles monocristalinos de 144 células y 9 barras colectoras, con tecnología MBB (MultiBusBar); la cual proporciona una forma efectiva de reducir costos y aumentar la eficiencia.

Tabla 2: Características Placa solar fotovoltaica. Fuente: Confidencial.

Potencia máxima	335 W
Tensión a Potencia máxima	42,4 V
Corriente a Potencia máxima	11,46 A
Irradiancia (día - noche)	1000 - 800 W/m ²
Eficiencia	21,05 %
Temperatura de operación	-40 a 85 °C
Células	144
Peso	24 kg
Dimensiones	2108 x 1048 x 40 mm

- **Electrolizador**

Para la generación de Hidrógeno, se ha escogido un electrolizador con tecnología PEM (membrana de intercambio protónico). Utiliza un sistema estandarizado, apilable y tiene un diseño modular, junto con la integración de un software que permite la configuración, control y gestión por remoto.

Tabla 3: Características Electrolizador. Fuente: Confidencial.

Ratio de producción	500 NL/h
Pureza de Hidrógeno a la salida	35 bar: 99,9% (impurezas 1000 ppm H2O)
Presión de salida	35 bar
Consumo de potencia nominal por Nm ³ de H2 producido	4,8 kWh/Nm ³
Consumo de potencia operativo	2.400 W
Consumo de potencia en stand-by (en espera)	15 W
Fuente de alimentación	200-240 V, 50/60 Hz
Rango de temperatura en ambiente operativo	5°C a 45°C
Producción por hora a potencia nominal	0,04495 kg/hora
Rendimiento sobre PCS	0,7381
Consumo de agua	40 ml/h
Dimensiones	482 x 634 x 307 mm

Cálculo del rendimiento sobre PCS:

$$\begin{aligned}
 \text{(Ec. 1)} \quad \eta &= \frac{\text{Poder calorífico del Hidrógeno producido (según PCI)}}{\text{Cantidad de electricidad consumida}} \\
 &= \frac{\left(141,88 \text{ MJ/kg} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3,6 \text{ MJ}}\right) \cdot 0,04495 \text{ kg/hora}}{2,4 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h}} = 0,738
 \end{aligned}$$

- **Secador de Hidrógeno - Dryer**

Se va a utilizar un secador de hidrógeno para evitar que condense, ya que así se consigue la mayor pureza de Hidrógeno posible. Además, es necesario monitorizar la humedad del Hidrógeno y mantenerla por debajo de zonas peligrosas.

Tabla 4: Características Secador de H2. Fuente: Confidencial.

Tasa de flujo de H2	1000 NI/h
Pureza de H2	99%
Potencia consumida operativa	0,2 kW
Máxima potencia consumida	0,45 kW
Fuente de alimentación	110-240 V AC/ 50-60 Hz
Rango de temperatura	5 - 45 °C
Humedad relativa	20 - 95 % sin condensación
Peso	25 kg
Dimensiones	483 x 494 x 171 mm

- **Tanques de almacenamiento de Hidrógeno**

Para el almacenamiento de hidrógeno se han elegido unos tanques tipo IV, que se caracterizan por soportar grandes cargas y tener un excelente aislamiento para garantizar la seguridad. Tienen la ventaja de ser ligeros, por lo tanto, son perfectos para aplicaciones móviles como las de este proyecto y además son capaces de almacenar un gran volumen. El tanque está compuesto por un revestimiento de polímero y una estructura compuesta que permite a la carcasa resistir altas presiones. Se van a necesitar un tanque de baja presión donde se almacena en un primer momento el Hidrógeno producido y tras ello se necesita uno o varios tanques de alta presión donde se almacena el Hidrógeno tras pasar por el compresor, donde cabe más cantidad del combustible por estar más comprimido.

Tabla 5: Características Tanque de H2 baja presión. Fuente: Confidencial.

Presión de almacenamiento	60 bar
Volumen interior	850 L
Masa total	215 kg
Dimensiones externas	Ø 840 mm x 1.870 mm
H2 almacenado a 60 bar	4,2 kg

Tabla 6: Características Tanque de H2 alta presión. Fuente: Confidencial.

Presión de almacenamiento	450 bar
Volumen interior	200 L
Masa total	188 kg
Dimensiones externas	Ø 490 mm x 2.230 mm
H2 almacenado a 450 bar	10 kg

- **Pila de Hidrógeno**

Se ha escogido una pila de celdas de combustible de placa de grafito, que consta de 30 celdas con carcasa protectora, colector oxidante y campana de flujo de aire de enfriamiento. Consta de un sistema de gestión de calor y sistema de suministro de combustible y purga, el cual se compone de electroválvulas con sensor de presión integrado.

Tabla 7: Características Pila de H2. Fuente: Confidencial.

Ratio/ potencia bruta	1000/ 1200 W
Ratio/ corriente bruta	55,5/ 66,6 A
Tensión de salida	18 – 27 V DC
Temperatura funcionamiento	-10°C a 45 °C
Dimensiones	352 x 154 x 290 mm
Presión de entrega	0,7 bar

- **Compresor**

Para la compresión se ha escogido una bomba de refuerzo de gas. Se necesita la utilización de este compresor para poder almacenar más cantidad de hidrógeno, ya que en el tanque de baja presión el hidrógeno ocupa demasiado espacio para los pocos kg que acumula. Es por ello que se llevará el Hidrógeno del tanque de baja al de alta presión, pasando de 35 a 450 bares, garantizando así que se pueda almacenar una mayor cantidad de Hidrógeno.

Tabla 8: Características Compresor. Fuente: Confidencial.

Presión mínima de entrada	30 bar
Presión máxima de salida	350 bar
Tasa de flujo	120 l/min
Requerimientos potencia	220 V AC, 50 Hz, 1,5 kW
Dimensiones	940 x 292 x 559 mm

- **Baterías**

Para el almacenamiento de energía proveniente de los excesos producidos por las placas fotovoltaicas y el aerogenerador, se han escogido unas baterías con tecnología Litio-LFP. Es una solución modular y escalable, que se adapta a las necesidades gracias a los módulos de los que dispone, los cuales suman desde 9 kWh hasta los 206 kWh.

Tabla 9: Características Batería. Fuente: Confidencial.

Electroquímica	Litio
Voltaje nominal módulo	48 V DC
Capacidad nominal	180 Ah
Corriente nominal de carga continua	90 A
Corriente recomendada descarga continua	180 A
Ciclos de vida	5.000 ciclos
Energía instalada	8,6 kWh
Dimensiones (ancho x profundo x alto)	760 x 405 x 450 mm
Peso	100 kg
Temperatura de trabajo	De 0°C a 60°C

3.4. Recursos climáticos:

En este apartado, se van a mostrar los recursos disponibles debidos a las condiciones climáticas en cada uno de los tres escenarios que se van a estudiar. Concretamente, dichos datos climáticos serán: radiación global, temperatura y velocidad del viento.

Para la obtención de los recursos se utilizaron las bases de datos de Meteoblue [2], para cada ubicación correspondiente a cada escenario climático se han tomado datos climáticos horarios del año más reciente disponible, correspondiente al 2019.

A partir de los recursos climáticos se comienza el dimensionamiento energético, puesto que van a ser nuestra única fuente de energía para abastecer la demanda del ZEM. Al disponer de datos horarios de un año entero, se han analizado los recursos máximos y mínimos que van a ayudar a prever situaciones realmente adversas que puedan provocar momentos e incluso días completos donde los recursos principales, solar y eólico, sean tan bajos que no puedan abastecer al módulo. Es por ello que se deben prever esas situaciones para que los equipos seleccionados en el modelo sean capaces de solucionar dicho problema. En el caso del ZEM, se opta por utilizar la fuente de energía proveniente del gas hidrógeno en casos de emergencia, para conseguir electricidad suficiente para superar la demanda necesaria en situaciones adversas.

A continuación, se expondrán gráficamente los valores de los recursos climáticos que se introducirán más adelante en el modelo energético para el dimensionamiento.

3.4.1. Zaragoza, España

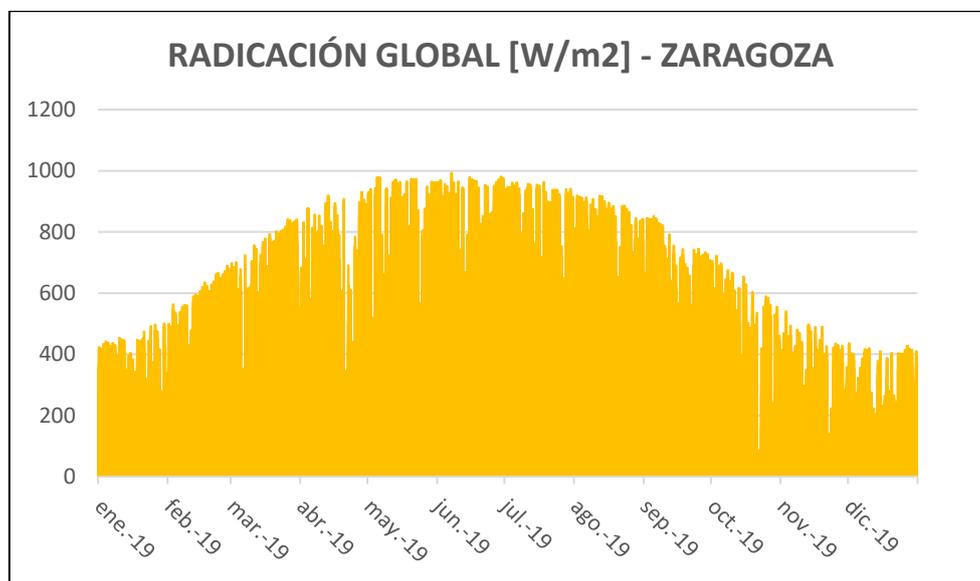


Ilustración 6: Gráfica Radiación Global, Zaragoza, España. Fuente: [2].

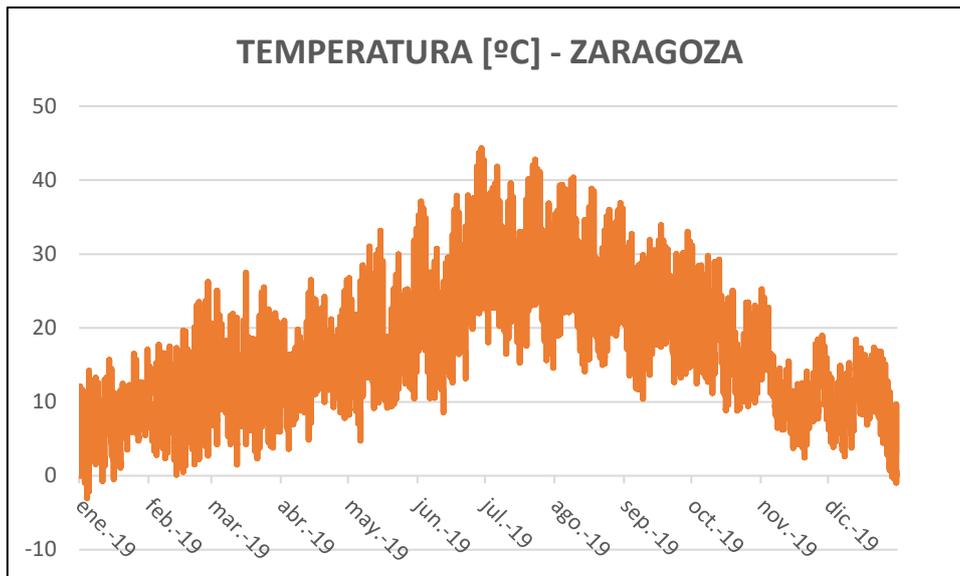


Ilustración 7: Gráfica Temperaturas Zaragoza, España. Fuente: [2].

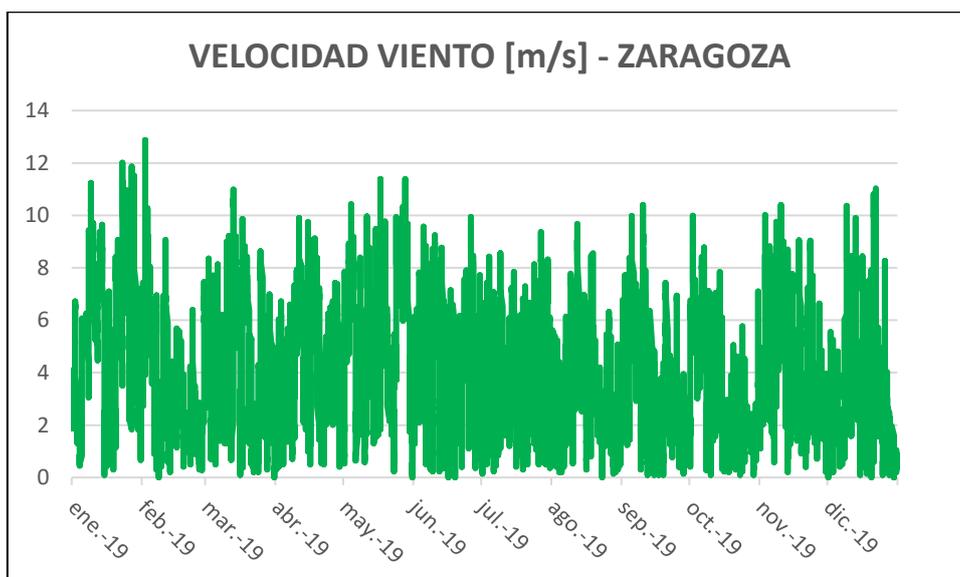


Ilustración 8: Gráfica Velocidad viento, Zaragoza, España. Fuente: [2].

De los perfiles de los recursos climáticos, se deben destacar los valores máximos y mínimos registrados por la fuente, ya que van a ser determinantes a la hora de realizar el dimensionamiento energético:

- Por un lado; la radiación máxima registrada es de 993 Wh/m² y la radiación total a lo largo del año es de 1768,15 Wh/m².
- Respecto a las temperaturas; las máximas registradas según la fuente son de 44,3°C, mientras que las mínimas son de -3,02°C y con una media anual de 17,2°C.
- Por último, la máxima velocidad del viento es de 12,87 m/s y con una media de 4,1 m/s.

3.4.2. Riga, Letonia

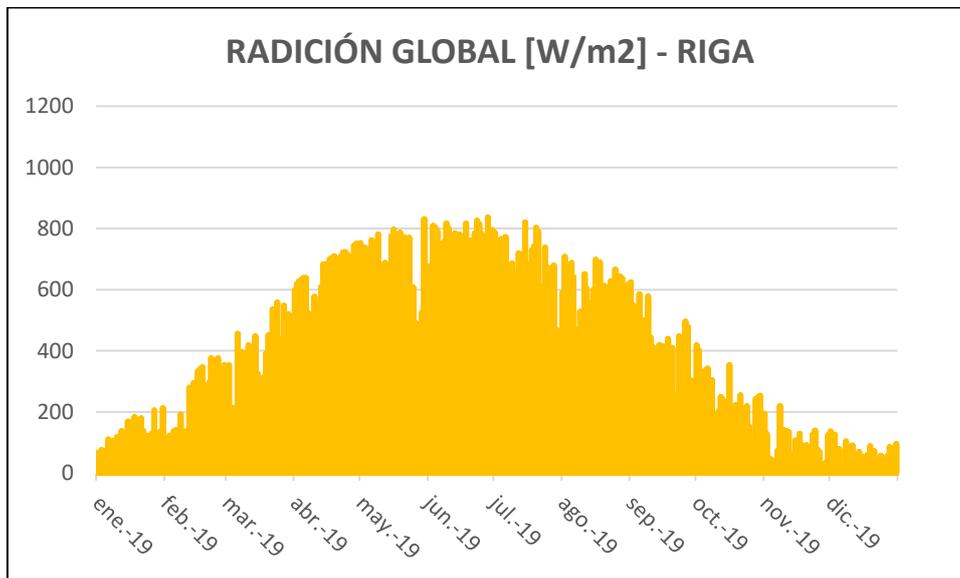


Ilustración 9: Gráfica Radiación Global, Riga, Letonia. Fuente: [2].

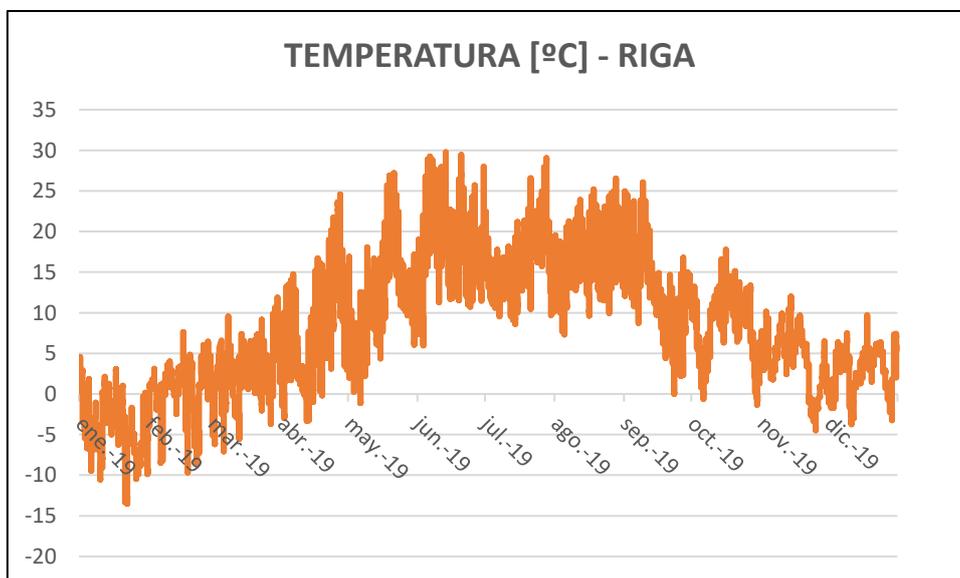


Ilustración 10: Gráfica Temperaturas Riga, Letonia. Fuente: [2].

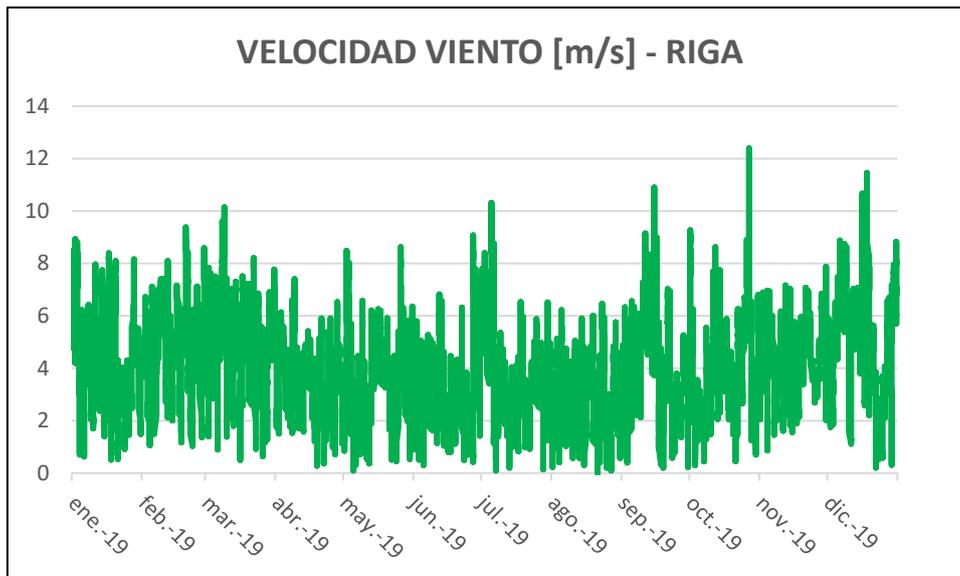


Ilustración 11: Gráfica Velocidad viento, Riga, Letonia. Fuente: [2].

- Radiación máxima de 836 W/m² y un total de 1076,6 W/m²; lo cual es una reducción muy considerable del recurso solar respecto al escenario anterior (Zaragoza) y se traduce en una disminución de la producción energética del ZEM para cubrir sus consumos.
- Temperaturas máximas de 29,78°C y mínimas de -13,5°C. Viendo estos datos se deduce que el consumo por climatización va a aumentar considerablemente en cuanto a calefacción, puesto hay mucha diferencia con las temperaturas mínimas del escenario anterior. Aunque, por otro lado, las temperaturas máximas de Riga son menores a las de Zaragoza y en ese aspecto se reducirá el consumo por refrigeración. La temperatura media es de 8,7°C, por lo que en general se considera un clima mucho más frío que Zaragoza.
- Velocidad del viento máxima registrada de 12,4 m/s. En este aspecto, es prácticamente igual al escenario de Zaragoza y respecto a la velocidad media se encuentra en 4 m/s; por lo tanto, el recurso eólico en Riga se podría considerar que va a aportar cantidades de energía similares.

3.4.3. La Antártida

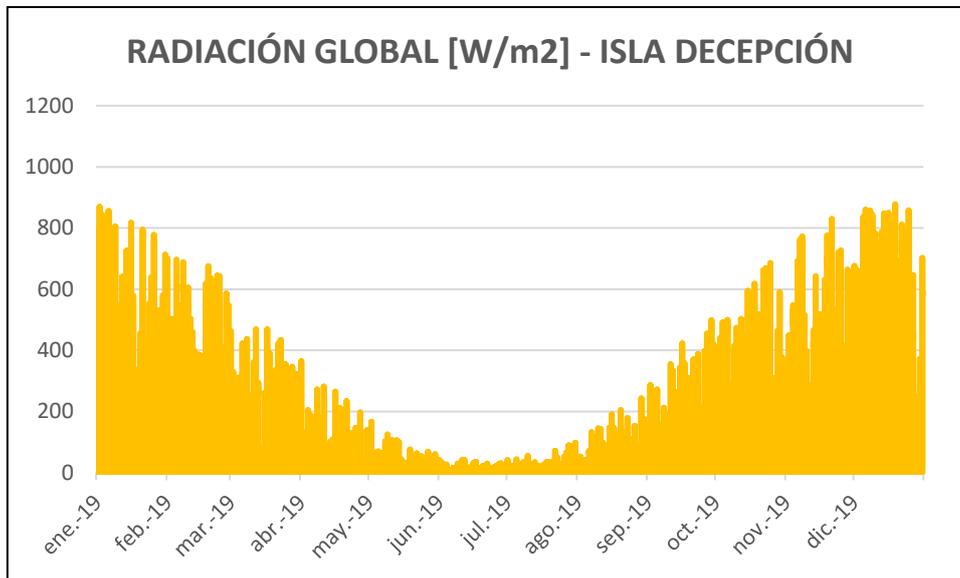


Ilustración 12: Gráfica Radiación, La Antártida. Fuente: [2].

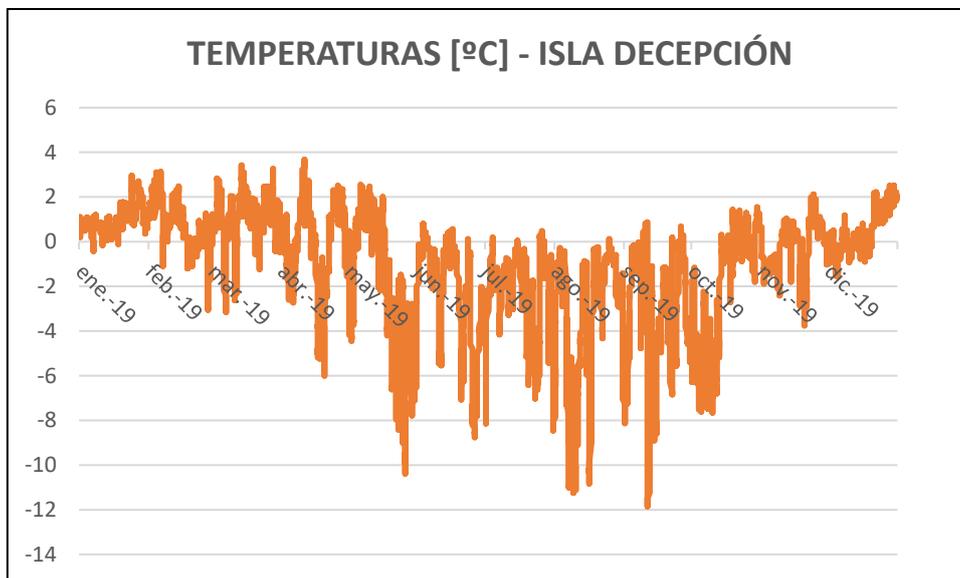


Ilustración 13 Gráfica Temperaturas, La Antártida. Fuente: [2].

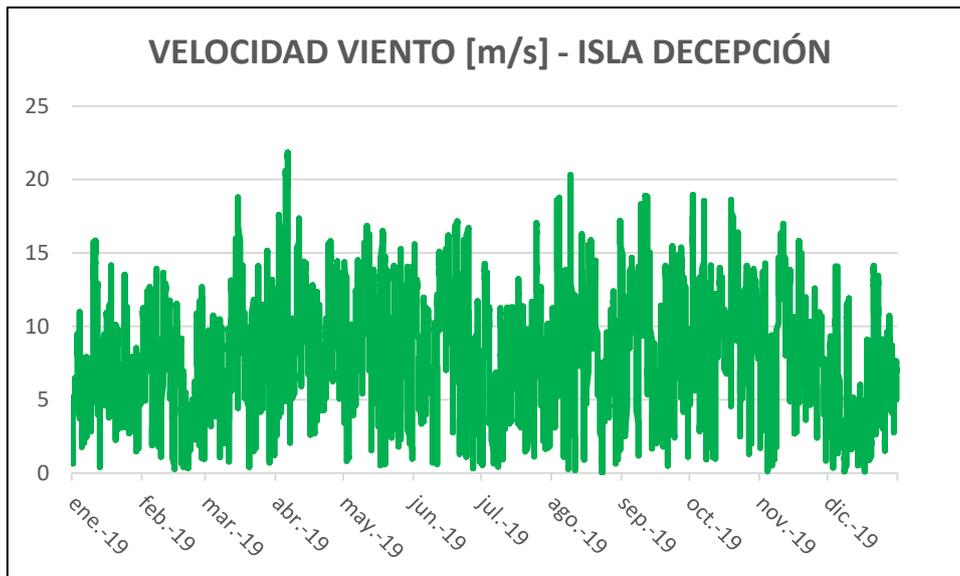


Ilustración 14: Gráfica Velocidad viento, La Antártida. Fuente: [2].

- Radiación máxima de 877 Wh/m² y un total de 861 Wh/m². Según estos valores, se puede considerar que en cuanto a recurso solar en la Antártida se va a disponer de una cantidad de energía similar a Riga
- Temperaturas máximas de 3,67°C y mínimas de -11.85°C. En comparación al primer escenario (Zaragoza), se observa como el consumo por climatización va a ser extremadamente superior, puesto que según la fuente no se superan los 4°C en todo el año. Si se compara con el segundo escenario (Riga), se puede observar como las temperaturas mínimas son similares; sin embargo, las máximas de la Antártida son muy inferiores todavía y esto va a suponer también; como en Zaragoza, un aumento del consumo por climatización. Esta última observación, se puede deducir también sabiendo que la temperatura media en la Antártida registrada es de -1,1°C, mucho menor a la de los otros escenarios estudiados.
- Velocidad del viento máxima registrada de 21,8 m/s y una media de 8,3 m/s. Según estos valores, el recurso eólico en este escenario va a ser considerablemente superior al del resto de escenarios; por lo tanto, se va a tener mayor cantidad de energía disponible proveniente de esta fuente respecto al resto de ubicaciones y va a ser muy positivo para el abastecimiento energético.

3.5. Consumos energéticos:

Se parte del caso en el cual se va a utilizar el ZEM como base militar destinada a dormitorio durante 6 meses en cada una de las tres zonas climáticas, con sus diferentes demandas energéticas:

- **Demanda eléctrica para usos generales.**
- **Demanda para ACS (agua caliente sanitaria).**
- **Demanda para climatización; tanto calefacción como refrigeración.**

3.5.1. Usos generales

Se entiende por usos generales, los consumos por iluminación y por aparatos de uso doméstico.

Se va a realizar una aproximación de los consumos en el módulo dormitorio, teniendo en cuenta los datos aportados por el ejército español [2] a Arpa; como serían:

- Horarios de trabajo de los investigadores, tanto en el exterior como dentro del ZEM, para saber a que horas se le va a dar uso a la potencia instalada.
- Horarios de las comidas, de despertarse e irse a dormir.
- Equipos habituales que se suelen utilizar en una base militar española dedicados a uso doméstico y sus horas de uso.

La distribución de los equipos utilizados y sus potencias serían la siguientes:

Tabla 10: Equipos y potencias en bases militares españolas. Fuente: Elaboración propia con aportación de [3].

Estancia	Equipo	Uso	Pot. Unidad [W]	Núm. Equipos	Pot. Total [W]	Pot. usada/ hora [W]
Dormitorio 1	Bombillas	Iluminación	18	3	54	54
Dormitorio 2	Bombillas	Iluminación	18	3	54	54
Baño	Bombillas	Iluminación	18	1	18	18
Vestíbulo	Bombillas	Iluminación	18	2	36	36
-	Ordenador	Cargador	90	8	720	180
-	Móvil	Cargador	10	8	80	20
Baño	Secador	Otro	1500	1	1500	300

Según se vio en los consumos que proporcionó el ejército español a Arpa [2], había un pico muy grande de demanda energética a últimas horas de la noche. Esto se debía a la utilización de todos los enchufes para tareas como cargar todos los móviles y portátiles a la vez a últimas horas de la tarde-noche simultáneamente, lo que sumaba un total de 16 aparatos eléctricos consumiendo al mismo tiempo y que elevaban en gran medida la potencia pico, a la vez que el consumo por la iluminación de los dormitorios, el vestíbulo y el baño.

Para poder comprobar cómo era el consumo en un día típico en una base militar española, sirviendo estos datos tanto para Zaragoza, Riga o la Antártida, se realizó un perfil de consumo como se muestra en la **Ilustración 15**, para representarlo gráficamente y observar donde podía mejorar la gráfica.

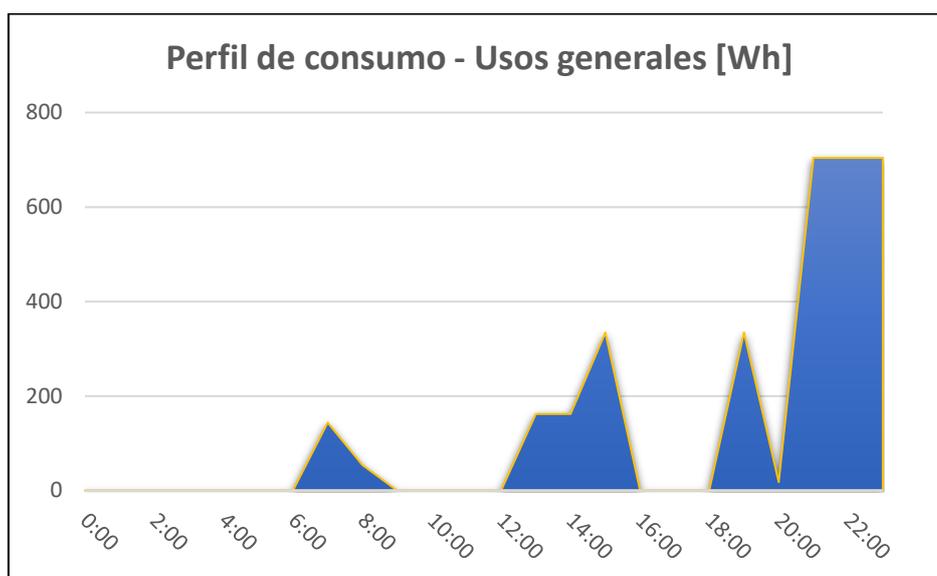


Ilustración 15: Perfil de Consumo por Usos Generales, sin revisar.

Fuente: Elaboración propia con datos de [3]

Como se puede observar, hay un pico entre las 20:00 y las 00:00 de la noche, lo que suponía un aumento innecesario de la demanda que afectaba directamente al dimensionamiento de los equipos, provocando un sobredimensionamiento de la potencia instalada. Para solucionar este problema, desde este TFG se propone tomar unas medidas de ahorro energético por medio de una simple mejora de la distribución horaria para la carga de los aparatos eléctricos.

Empezando por realizar la carga de los aparatos; móviles y ordenadores, a partir de las 19:00 y no a últimas horas del día. Por medio de enchufes programables, se podrían programar las horas de carga sin estar pendiente de enchufar o desenchufar los aparatos y se distribuiría el consumo durante media tarde y el resto de la noche. De este modo, se podrían enchufar todos los aparatos a la vez; programando los enchufes para cargar únicamente dos ordenadores junto con dos móviles al mismo tiempo durante las dos horas que tardan en cargarse aproximadamente, es por ello que en la **Tabla 13** se ven los consumos por hora de los cargadores; 180 W y 20 W. Tras ello, los enchufes programables dejarían de cargar a los dos primeros pares de aparatos y empezarían a suministrar a otro par durante las próximas dos horas. Siguiendo este procedimiento, se acabarían cargando todos los aparatos en las horas de madrugada sin la necesidad de tener a alguien pendiente de ellos y consiguiendo así que el consumo por carga de las baterías se distribuya a lo largo del día y no se concentre en las últimas dos horas de la noche, lo que producía un pico totalmente innecesario.

Tras estas modificaciones para reducir los consumos, se ha elaborado un nuevo perfil de consumo mejorado para un día típico, para mostrar gráficamente como disminuye el pico de consumo como se muestra en la **Ilustración 16**.

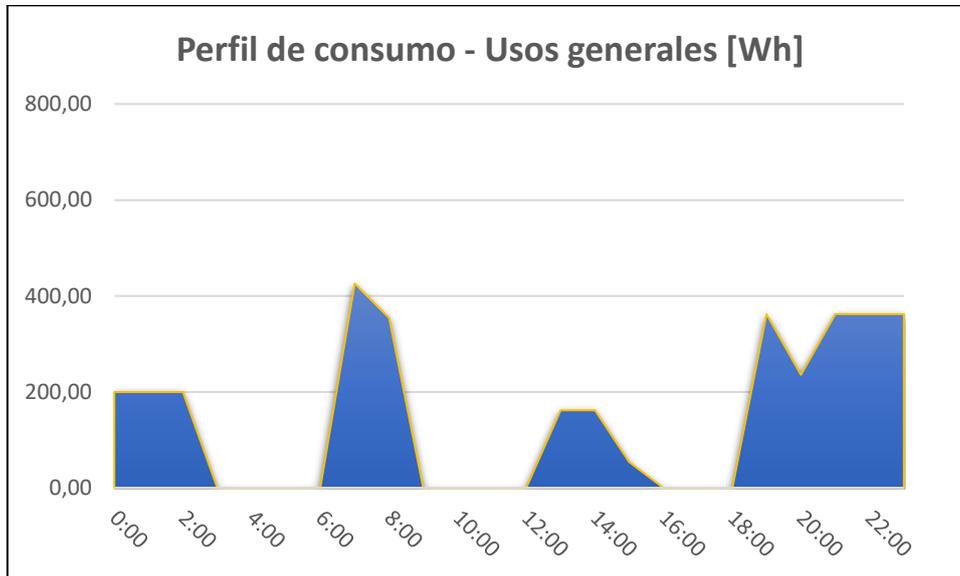


Ilustración 16: Perfil de Consumo por Usos Generales, revisado.

Fuente: Elaboración propia con datos de [3].

Se puede observar cómo en comparación con el perfil de la **Ilustración 15**, se reduce la potencia pico desde 722W hasta 426W. Esta es una mejora significativa ya que va a reducir considerablemente la necesidad energética de los equipos en las horas más demandantes del día.

Por lo tanto, los valores definitivos de consumos por usos generales que se van a utilizar para el dimensionamiento energético de los equipos y cubrir la demanda son los siguientes:

- **Consumo diario:** 3.442 Wh/día.
- **Consumo anual:** 1.256 kWh/año.
- **Potencia pico:** 426 Wh/día.

Para una superficie total de ZEM de 40 m²:

- **Consumo anual:** 31,41 kWh/m² año.
- **Potencia pico:** 10,65 Wh/m².

3.5.2. ACS – Agua caliente sanitaria

Para calcular la demanda térmica de ACS, se fija una temperatura de consigna llamada T^a de ducha y se estima un caudal de consumo por persona y día. Las temperaturas de red de Zaragoza y Riga han sido proporcionadas por Arpa, mientras el agua de red en la Antártida, según los investigadores de la base española de San Gabriel, viene de un conducto a 3°C y es almacenada en depósitos en la propia base, para su posterior uso.

Tabla 11: Datos iniciales para ACS. Fuente: Elaboración propia.

T^a ducha [$^{\circ}\text{C}$]	60
Calor específico [$\text{Wh}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$] - C_e	1,16
Nº personas	8
l/día persona	11,2
Densidad [kg/l] - D	1

El equipo que va a proporcionar el agua caliente sanitaria a la temperatura deseada va a ser la bomba de calor. Se trata de una bomba que puede realizar funciones de calefacción, refrigeración y de ACS, ya que en su interior posee un depósito de agua para ello.

Para el realizar el cálculo de los consumos térmicos por ACS, se van a utilizar las siguientes ecuaciones:

- Consumo térmico, en forma de calor para ACS:

$$Q (ACS) \frac{\text{Consumo}}{\text{día}} = N^{\circ} \text{ personas} * \frac{l}{\text{día} * \text{persona}} * C_e * D * \Delta T \quad [\text{Wh}/\text{día}] \quad (\text{Ec. 2})$$

- Variación de temperatura entre el depósito de ACS en la bomba de calor, y la temperatura fija de uso doméstico:

$$\Delta T = T^a \text{ fija ducha} - T^{\circ} \text{ red } [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Ec. 3})$$

- Coeficiente de operación para ACS:

$$\text{COP} (ACS) = \frac{Q (ACS)}{W (ACS)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Despejando de la **Ecuación 4**, se obtendrá la demanda eléctrica W (ACS), lo que significa que previamente se necesitará realizar los cálculos necesarios para hallar el COP y la demanda térmica Q (ACS). Los cálculos comentados deben realizarse para cubrir cualquier hora del año; por lo tanto, se deben calcular para cada hora del día durante un año entero.

Se han obtenido valores horarios de temperatura ambiente del año 2019 en los tres escenarios estudiados, provenientes de la fuente [1], ya que son los datos más recientes posibles y que se asemejan a al año actual.

Para realizar el cálculo de las demandas eléctricas por consumos de climatización, se va a seguir el siguiente procedimiento:

- En una tabla de Excel, se introducen los datos de temperaturas diarias durante un año completo.
- Se comienza por hallar los consumos térmicos horarios. Para ello, se ha decidido que los habitantes del ZEM dividan sus horarios de ducha en dos turnos; unos a las 8:00 am, y otros a las 21:00 pm, para repartir el consumo y no agruparlo en las mismas horas. De esto modo, se ha establecido que cuatro personas se duchen en la primera hora; aproximadamente 15 minutos cada uno y en la segunda hora de ducha se ducharían los otros cuatro. Al tener un caudal de 11,2 litros por persona y duchándose en turnos de cuatro personas, el resultado es un caudal fijo para cada turno de 44,8 l. Teniendo el caudal utilizado en cada hora, se aplica la **Ecuación 2** para obtener el consumo térmico por ACS que es constante para cada mes, solo varía cuando se cambia de mes por que la temperatura del agua de red es distinta. Se ha realizado un gráfico del perfil de consumo en Zaragoza a modo de ejemplo:

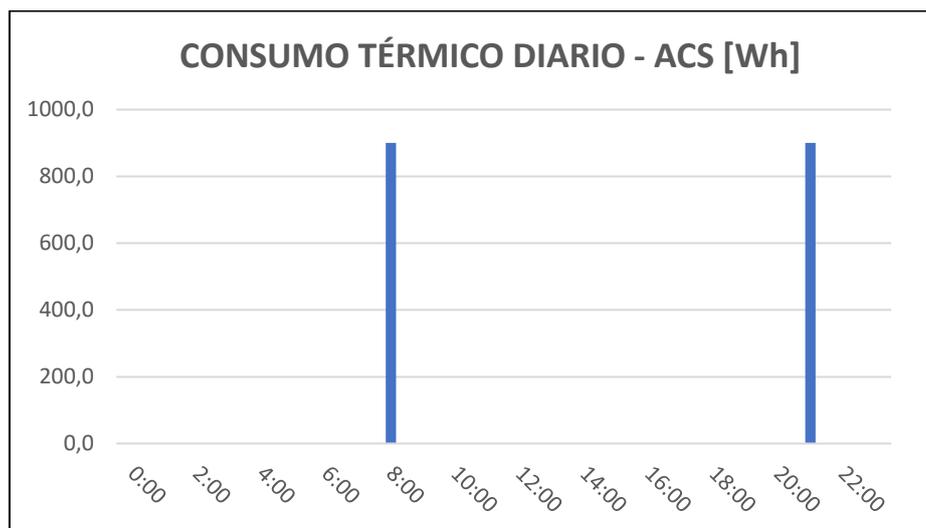


Ilustración 17: Perfil de consumo térmico de ACS para un día típico, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.

Además, se ha decidido agrupar en el caudal por ACS los caudales restantes por usos domésticos, ya que los cambios respecto a consumos apenas variaban y complicaban el procedimiento innecesariamente. Va a ser el mismo perfil para las tres ubicaciones estudiadas, ya que los horarios de trabajo y de vida doméstica han sido definidos igual.

- Para calcular los consumos eléctricos se necesita obtener el COP de la bomba de calor. Como se ha comentado previamente, todos los cálculos son horarios; porque la temperatura ambiente varía a lo largo de cada hora, así que el COP también se ve afectado constantemente y produce cambios en las demandas eléctricas en función de cada hora. Se observa en la **Ilustración 18**, que en la ficha técnica de la bomba de calor hay cuatro valores fijos de COP para ACS según la temperatura ambiente.

Tabla 12: COPS de ACS de la bomba de calor. Fuente: Confidencial - Fabricante.

Tª ambiente [°C]	-15	-7	2	20
COP ACS	2,28	2,97	3,34	3,94

Introduciendo en el Excel los cuatro datos de temperatura y COP, se realizan interpolaciones lineales para cada temperatura en cada hora durante el año completo, y de esta manera se obtienen los COPS horarios. Para las temperaturas que están fuera del rango que disponemos; -7 y 20°C, no se tienen más valores con los que operar. Por lo tanto, se decide calcular dichos valores por medio de extrapolaciones dibujando la curva del COP (**Ilustración 19**) y sacando la ecuación de la recta correspondiente, lo que nos permite hallar el resto de COPS que no pertenecen a las cuatro temperaturas dadas por el fabricante de la bomba de calor.

Para más detalle, acudir a la explicación de los cálculos en el Anexo 1 (Apartado 7.1).

Además, se tiene en cuenta que al querer tener una temperatura interior del ZEM de unos 20°C, el valor del COP disminuirá conforme dicha temperatura aumenta por encima de ese valor, ya que la bomba de calor entra en modo refrigeración y empieza a ser menos eficiente. Por lo tanto, el COP comienza a descender linealmente de la misma forma que anteriormente aumentaba conforme la temperatura era mayor, en modo calefacción.

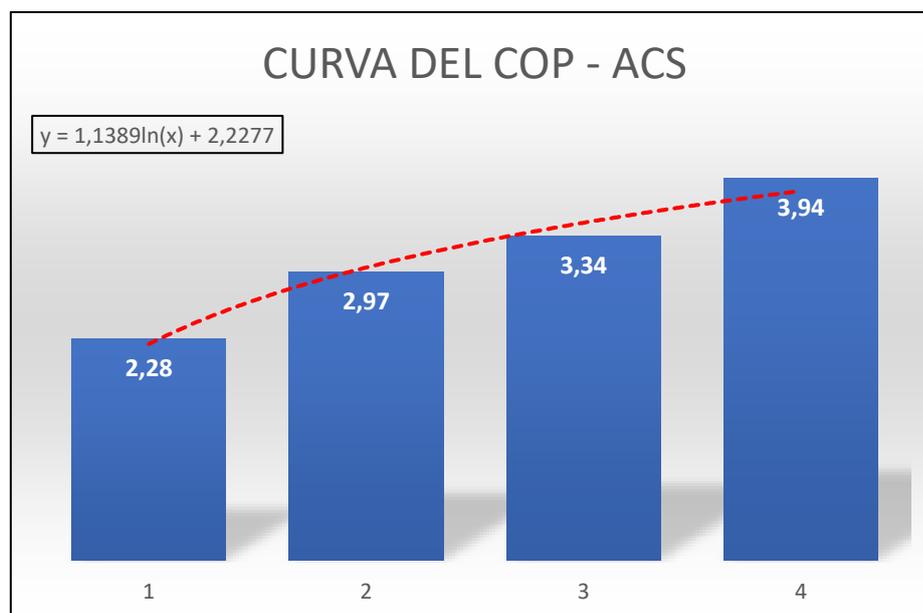


Ilustración 18: Curva del COP de la bomba de calor para ACS. Fuente: Elaboración propia.

- Finalmente; al tener halladas las demandas térmicas de ACS y los COPS de la bomba, solo queda aplicar la **Ecuación 4**, despejando la demanda eléctrica W (ACS).

Una vez realizados todos los cálculos comentados anteriormente, se puede representar gráficamente como se reparten los consumos para ACS en cada uno de los escenarios estudiados.

3.5.2.1. Base militar de Zaragoza, España

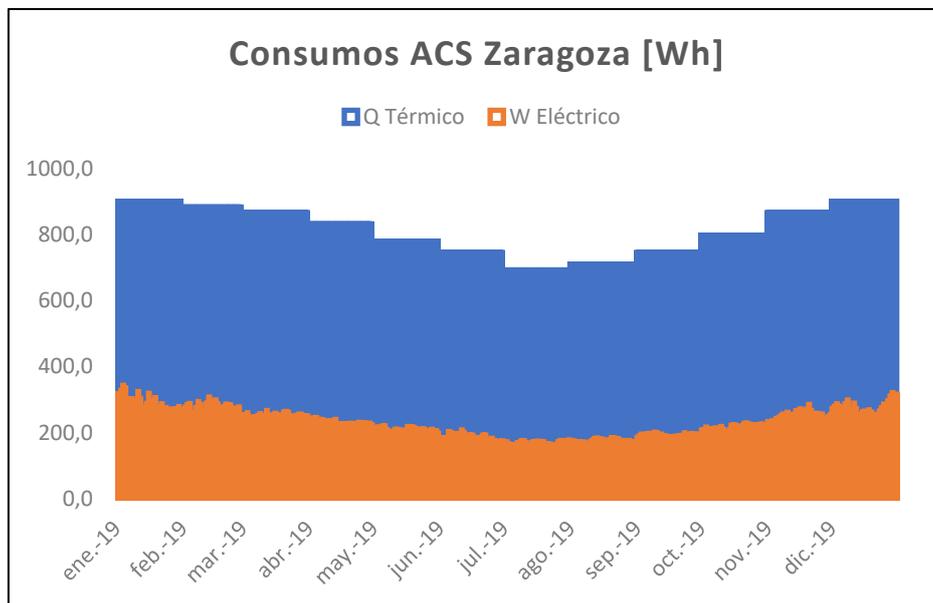


Ilustración 19: Consumos por ACS, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.

En la **Ilustración 19** se muestra como es el perfil de consumo eléctrico en comparación con el térmico y se puede apreciar fácilmente que el ahorro energético con respecto a un calefactor eléctrico es considerable, todo ello debido a la reducción que realiza el COP de la bomba de calor en dicho consumo.

Una vez se tienen todos los valores significativos de consumos por ACS en Zaragoza, se pueden calcular los valores anuales totales con los que se realizará el dimensionamiento energético de los equipos:

- **Consumo anual (Térmico):** 591 kWh/año.
- **Consumo anual (Eléctrico):** 162 kWh/año.
- **Consumo máximo (Eléctrico):** 361 Wh/día.

Lo que supone una reducción del consumo real por la demanda de ACS del 73 %, en comparación con un calefactor eléctrico.

3.5.2.2. Base militar de Riga, Letonia

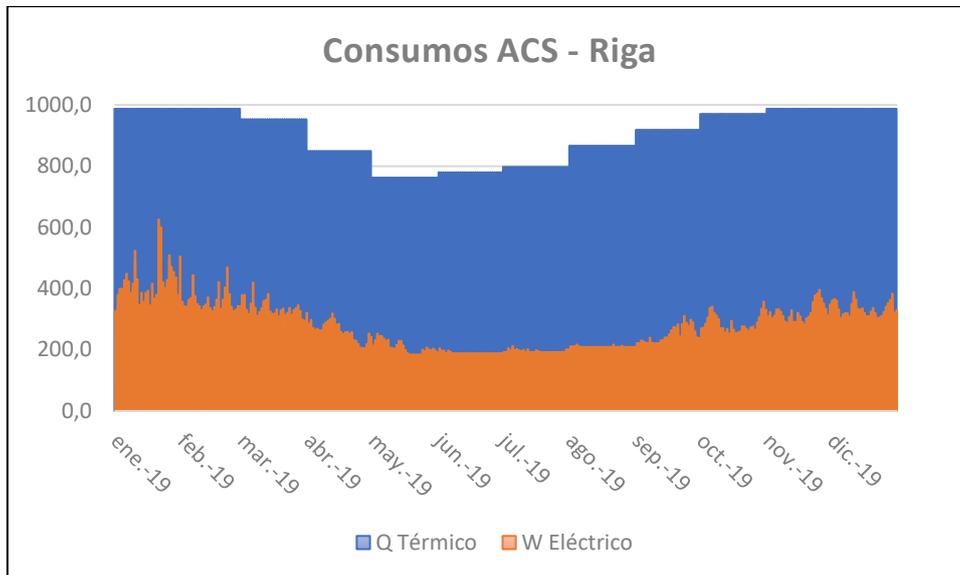


Ilustración 20: Gráfica Consumos anuales por ACS, Riga, Letonia. Fuente: Elaboración propia.

- **Consumo anual (Térmico):** 660 kWh/año.
- **Consumo anual (Eléctrico):** 200 kWh/año.
- **Consumo máximo (Eléctrico):** 626 Wh/día.

Lo que supone una reducción de consumo real por la demanda de ACS del 70 %, en comparación con un calefactor eléctrico.

3.5.2.3. Base militar de La Antártida

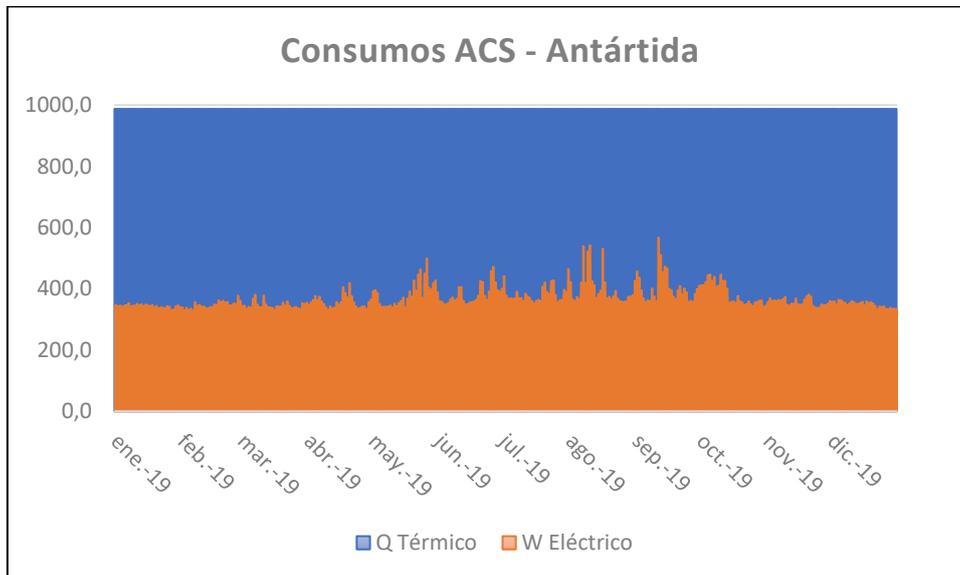


Ilustración 21: Gráfica Consumos anuales por ACS, Riga, Letonia. Fuente: Elaboración propia.

- **Consumo anual (Térmico):** 721 kWh/año.
- **Consumo anual (Eléctrico):** 266 kWh/año.
- **Consumo máximo (Eléctrico):** 567 Wh/día.

Lo que supone una reducción de consumo real por la demanda de ACS del 63 %, en comparación con un calefactor eléctrico.

3.5.3. Climatización

En este apartado se van a exponer los diferentes datos y cálculos referentes a las demandas de climatización; divididas en calefacción y refrigeración. Para ello, se va a partir de los valores de climatización necesarios en el ZEM, aportados por uno de los socios implicados en el proyecto: B+HAUS ARQUITECTURA EFICIENTE [3]. Dicho socio, realizó los cálculos de las cargas térmicas en los 40 m² del ZEM, teniendo en cuenta los paneles aislantes que envuelven al edificio y obtuvo los kWh/m² necesarios para un día típico de cada mes (consumos térmicos).

Los **consumos térmicos** horarios de cada mes se calcularán suponiendo que la demanda energética va a ser constante durante todas las horas del día; es decir, para un día típico por cada mes. Se debe conseguir que los consumos por calefacción y por refrigeración, sean menores a 15 kWh/m² para que sean aprobados por el Estándar de Pasivhaus.

Los **consumos eléctricos**, se obtendrán dividiendo por los COP horarios de climatización, que se obtienen interpolando y extrapolando de la misma manera que anteriormente para los COPS de ACS. La diferencia en este caso es que los valores de COP para climatización que aparecen en la ficha técnica de la bomba de calor son distintos:

Tabla 13: COPS de Climatización de la bomba de calor. Fuente: Confidencial - Fabricante.

Tª ambiente [°C]	-15	-7	2	7
COP Climatización	1,53	2,61	3,15	3,86

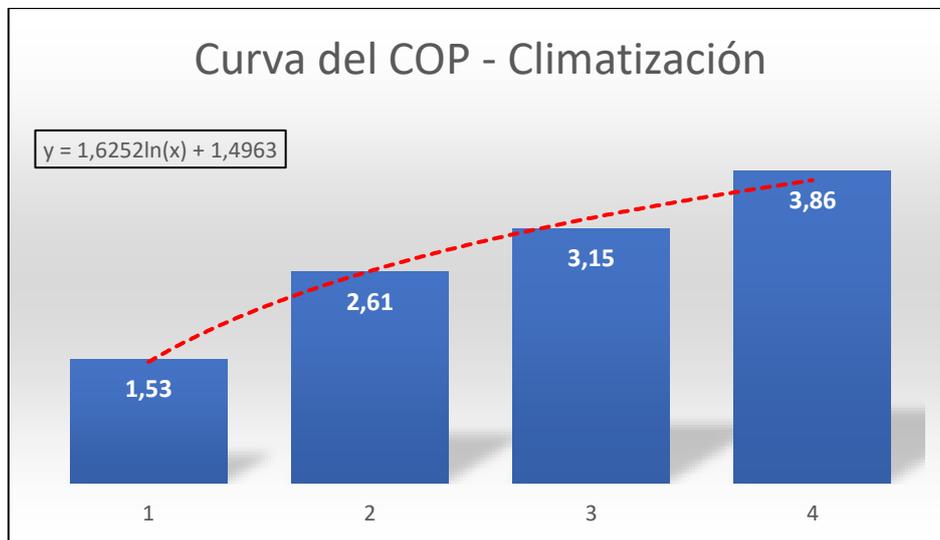


Ilustración 22: Curva del COP de la bomba de calor para Climatización. Fuente: Elaboración propia.

3.5.3.1. Base militar de Zaragoza, España

Tabla 14: Consumos térmicos por Climatización, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de [3].

	CALEFACCIÓN [kWh/m2]	REFRIGERACIÓN [kWh/m2]	CALEFACCIÓN [kWh]	REFRIGERACIÓN [kWh]	TOTAL [kWh]	TOTAL [kWh/día]	Consumo [Wh]
Ene	3,5	0	210	0	210	6,8	282,3
Feb	2,1	0	126	0	126	5	187,5
Mar	0,7	0	42	0	42	1,4	56,5
Abr	0,1	0,1	6	6	12	0,4	16,7
May	0	0,5	0	30	30	1,0	40,3
Jun	0	2,4	0	144	144	4,8	200,0
Jul	0	5,5	0	330	330	10,6	443,5
Ago	0	5,0	0	300	300	9,7	403,2
Sep	0	1,0	0	60	60	2,0	83,3
Oct	0	0,1	0	6	6	0,2	8,1
Nov	1,1	0	66	0	66	2,2	91,7
Dic	3,3	0	198	0	198	6,4	266,1
	10,80	14,60					

Las dos primeras columnas son los datos de consumos térmicos [kWh/m2] aportados la fuente de B+HAUS [3]. A continuación, se va a explicar cómo se han obtenido el resto de las columnas:

- La tercera y cuarta columna se obtienen multiplicando respectivamente la primera y segunda por 40 m2 que tiene de superficie el edificio ZEM, obteniendo los kWh por mes.
- La quinta columna es la suma de las dos anteriores.
- La sexta columna se obtiene dividiendo la anterior por el número de días que tiene su mes correspondiente, obteniendo los kWh por día.
- La séptima y última columna se obtiene dividiendo para 24 horas de un día y multiplicando por 1000, para hacer la conversión a Watios, obteniendo finalmente el consumo térmico de un día típico de cada mes en Wh.

En las dos primeras columnas se puede comprobar como la suma de los consumos térmicos por refrigeración y calefacción no superan los 15 kWh/m2 individualmente, de forma que cumplen con el Estándar de Pasivhaus.

Finalmente, tras obtener los consumos térmicos, se procede a calcular los consumos eléctricos despejando el consumo $W(ACS)$ de la **Ecuación 5**.

- Consumo térmico, en forma de calor para Climatización:

$$COP (Climatización) = \frac{Q (ACS)}{W (ACS)} \quad (\text{Ec. 5})$$

Una vez hallados todos los consumos horarios; tanto eléctricos como térmicos, se puede representar gráficamente el ahorro energético que supone el uso de esta bomba de calor y como estos varían a lo largo del año, debido a los cambios de temperatura en las diferentes estaciones.

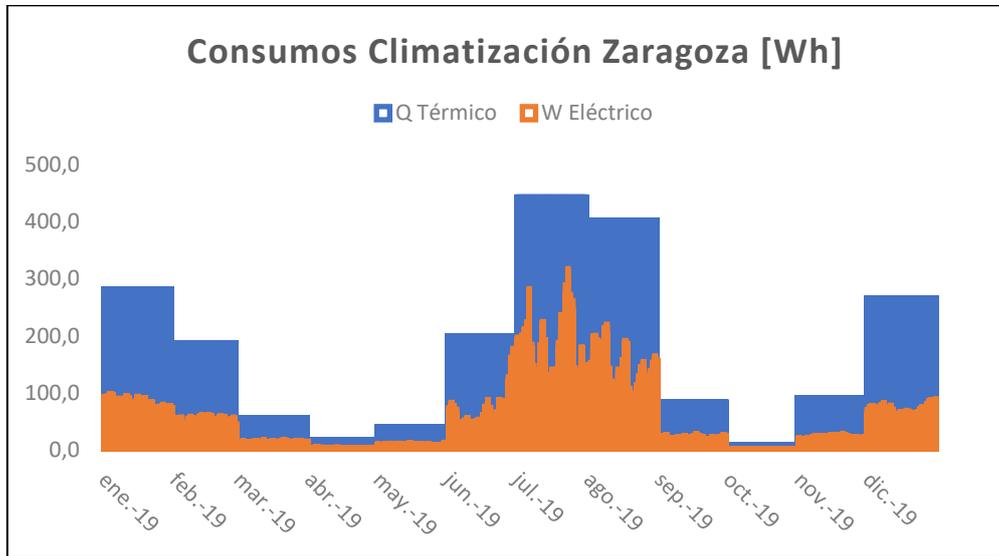


Ilustración 23: Consumo Térmico - Eléctrico por Climatización, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.

Resultados finales de consumos por climatización en Zaragoza, España:

- **Consumo anual Climatización (Térmico):** 1524 kWh/año.
- **Consumo anual Climatización (Eléctrico):** 400 kWh/año.
- **Consumo máximo (Eléctrico):** 318 Wh/día

Lo que significa que la bomba de calor consigue ahorrar un consumo energético para climatización de un 73,75 % respecto a un calefactor eléctrico.

Para una superficie de ZEM de 40 m²:

- **Consumo anual Calefacción:** 10,8 kWh/m² año ≤ 15 kWh/m².
- **Consumo anual Refrigeración:** 14,6 kWh/m² año ≤ 15 kWh/m².

3.5.3.2. Base militar de Riga, Letonia

Se realiza el mismo procedimiento de toma de datos y cálculo de **consumos térmicos** por climatización y eléctricos por climatización.

Tabla 15: Consumos térmicos por Climatización, Riga, Letonia. Fuente: Elaboración propia.

	CALEFACCIÓN [kWh/m2]	REFRIGERACIÓN [kWh/m2]	CALEFACCIÓN [kWh]	REFRIGERACIÓN [kWh]	TOTAL [kWh]	TOTAL [kWh/día]	Consumo [Wh]
Ene	5,1	0	306	0	306	9,9	411,3
Feb	3	0	180	0	180	6	267,9
Mar	0,1	0	6	0	6	0,2	8,1
Abr	0	0	0	0	0	0	0,0
May	0	0	0	0	0	0	0,0
Jun	0	0	0	0	0	0	0,0
Jul	0	0	0	0	0	0	0,0
Ago	0	0	0	0	0	0	0,0
Sep	0	0	0	0	0	0	0,0
Oct	0	0	0	0	0	0	0,0
Nov	1,6	0	96	0	96	3,2	133,3
Dic	4,5	0	270	0	270	8,7	362,9
	14,3	0					

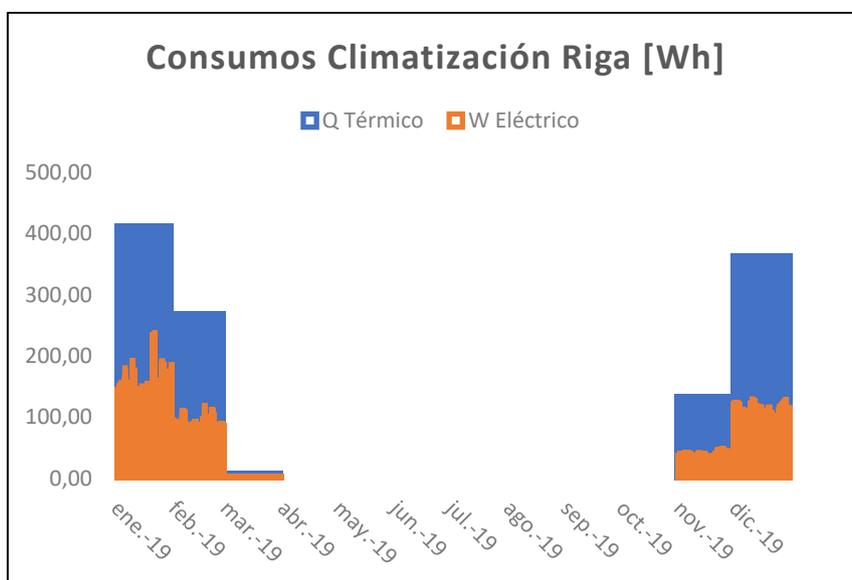


Ilustración 24: Consumo Térmico - Eléctrico por Climatización, Riga. Fuente: Elaboración propia.

Resultados finales de consumos por climatización en Riga, Letonia:

- **Consumo anual Climatización (Térmico):** 858 kWh/año.
- **Consumo anual Climatización (Eléctrico):** 280,2 kWh/año.
- **Consumo máximo (Eléctrico):** 237,9 Wh/día.

Lo que significa que la bomba de calor consigue ahorrar un consumo energético para climatización de un 67,3 % respecto a un calefactor eléctrico.

Para una superficie de ZEM de 40 m2:

- **Consumo anual Calefacción:** 14,3 kWh/m2 año \leq 15 kWh/m2.
- **Consumo anual Refrigeración:** 0 kWh/m2 año \leq 15 kWh/m2.

3.5.3.3. Base militar de La Antártida

En este último caso, se van a exponer los consumos por climatización para cada mes habitando en La Antártida durante cuatro meses, mientras que los otros ocho únicamente se requiere conseguir mantener los equipos. Por lo tanto, se deberá climatizar mínimamente para que dichos equipos no sufran daños por posible congelación y al año siguiente se puedan retomar las investigaciones sin la necesidad de desmontar ni los módulos energéticos ni los habitacionales; lo cual es uno de los objetivos principales desde el inicio de este proyecto.

Tabla 16: Consumos térmicos por Climatización, Antártida. Fuente: Elaboración propia

	CALEFACCIÓN [kWh/m2]	REFRIGERACIÓN [kWh/m2]	CALEFACCIÓN [kWh]	REFRIGERACIÓN [kWh]	TOTAL [kWh]	TOTAL [kWh/día]	Consumo [Wh]
Ene	3,5	0	210	0	210	6,8	282,3
Feb	4,5	0	270	0	270	10	401,8
Mar	5,1	0	306	0	306	9,9	411,3
Abr	0,5	0	29	0	29	1	39,6
May	0,7	0	45	0	45	1	60
Jun	1	0	60	0	60	2	82,8
Jul	0,9	0	54	0	54	1,7	72
Ago	1,2	0	71	0	71	2,3	94,8
Sep	0,9	0	54	0	54	1,8	75,6
Oct	0,7	0	42	0	42	1,4	56,4
Nov	0,4	0	26	0	26	0,9	36
Dic	4,5	0	270	0	270	8,7	362,9
	23,9	0					

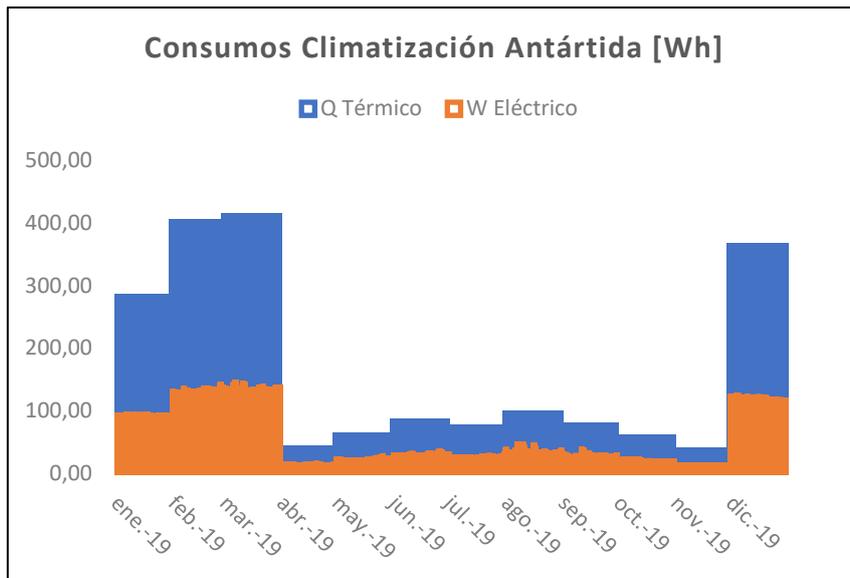


Ilustración 25: Gráfica Consumo Térmico por Climatización, Antártida. Fuente: Elaboración propia.

Resultados finales de consumos por climatización en Isla Decepción, Antártida:

- **Consumo anual Climatización (Térmico):** 1434,9 kWh/año.
- **Consumo anual Climatización (Eléctrico):** 474,8 kWh/año.
- **Consumo máximo (Eléctrico):** 144,8 Wh/día.

Lo que significa que la bomba de calor consigue ahorrar un consumo energético para climatización de un 66,9 % respecto a un calefactor eléctrico.

Para una superficie de ZEM de 40 m²:

- **Consumo anual Calefacción:** 23,92 kWh/m² año \geq 15 kWh/m².
- **Consumo anual Refrigeración:** 0 kWh/m² año \leq 15 kWh/m².

Se obtuvo que el consumo por calefacción en la Antártida no cumpliría con la norma de Pasivhaus, por lo tanto, no se podría considerar un edificio de tales características en dicha ubicación.

3.5.4. Comparación de los consumos en los tres escenarios

A continuación, se van a mostrar las diferentes distribuciones de los consumos por usos generales, climatización y ACS en las diferentes ubicaciones estudiadas, donde se podrá observar cual es el consumo más demandante para cada una de ellas y de esta forma, se puede comprobar si hay algún consumo desorbitado que complique el dimensionamiento de los equipos.

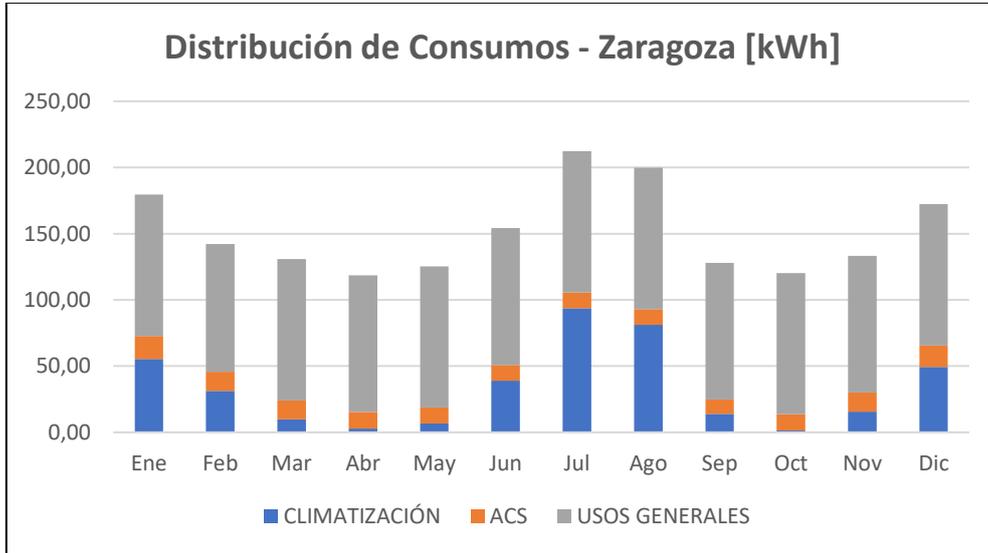


Ilustración 26: Gráfica de distribución de consumos, Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.

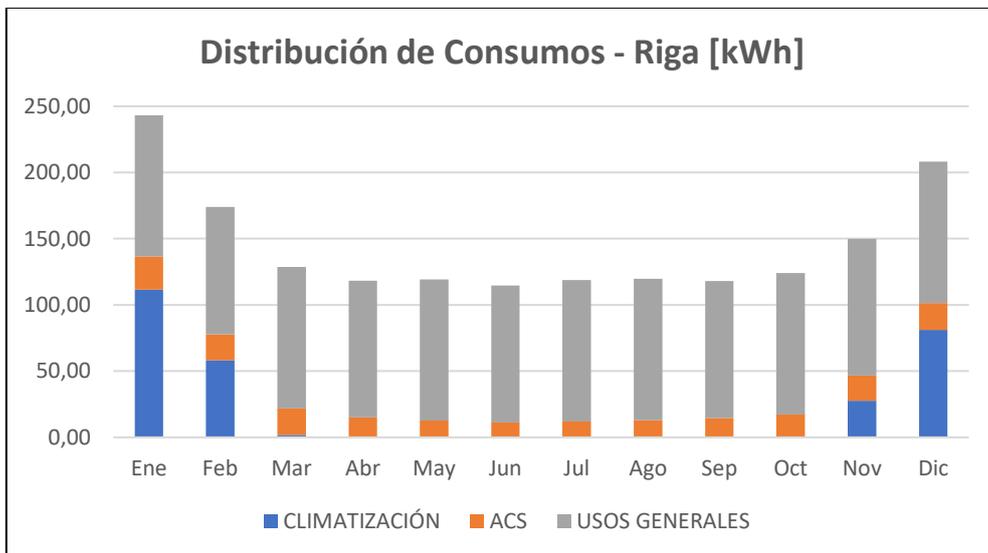


Ilustración 27: Gráfica de distribución de consumos, Riga. Fuente: Elaboración propia.

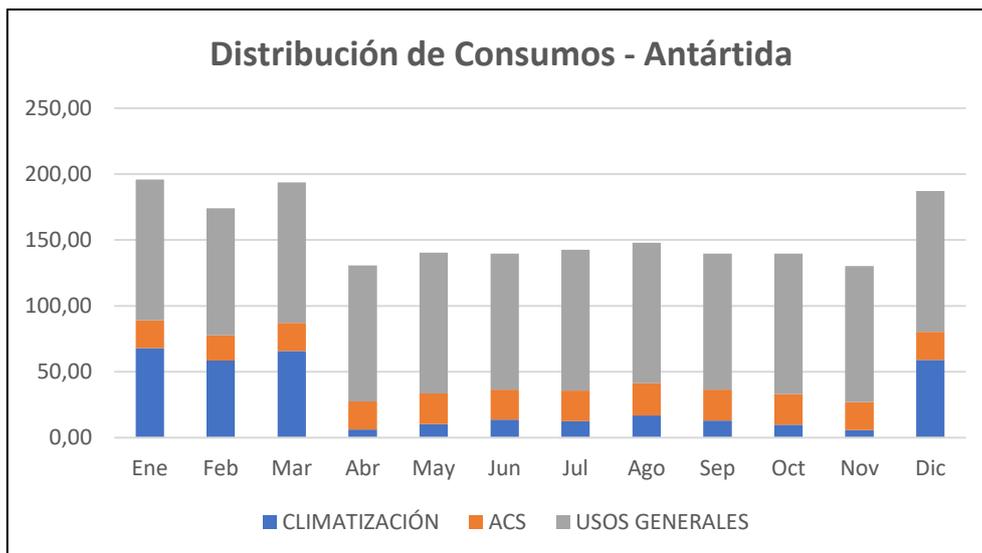


Ilustración 28: Gráfica de distribución de consumos, Antártida. Fuente: Elaboración propia.

3.5.5. Conclusión de los consumos

Una vez comparados los resultados obtenidos en las gráficas del apartado anterior, finalmente se van a comparar los consumos totales entre los tres escenarios climáticos. Se va a calcular la cantidad de kWh necesarios producir para abastecer al ZEM en cada ubicación y cuál de ellos va a ser más exigente en cuanto a su demanda energética.

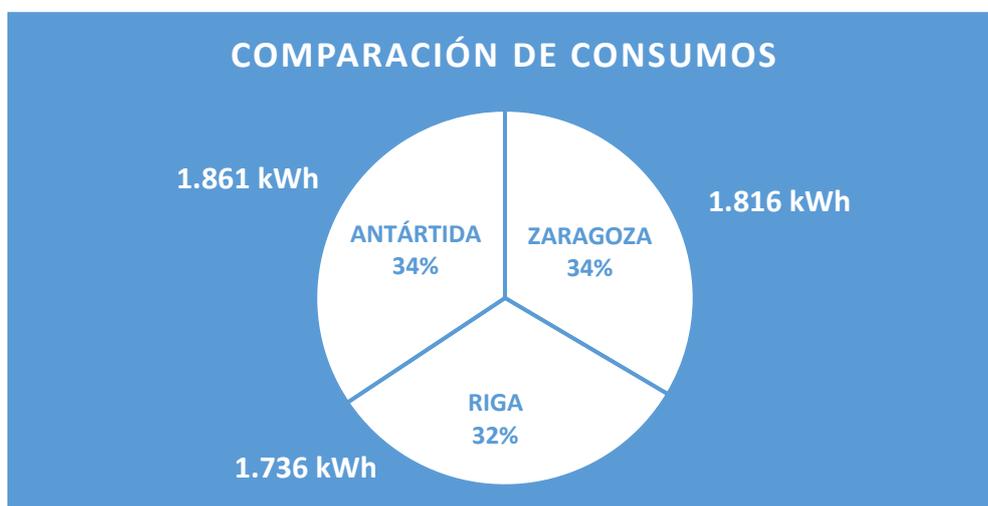


Ilustración 29: Gráfico de comparación de Consumos totales en las tres ubicaciones estudiadas.

Fuente: Elaboración propia.

Este apartado concluye con un consumo máximo para abastecimiento del ZEM de 1.861 kWh, en la Antártida. Lo que significa que dicho escenario va a ser el más demandante de los tres estudiados, con un 34% de la producción total del ZEM en los tres próximos años; uno por cada ubicación. Aunque realmente se puede ver que los consumos serán similares

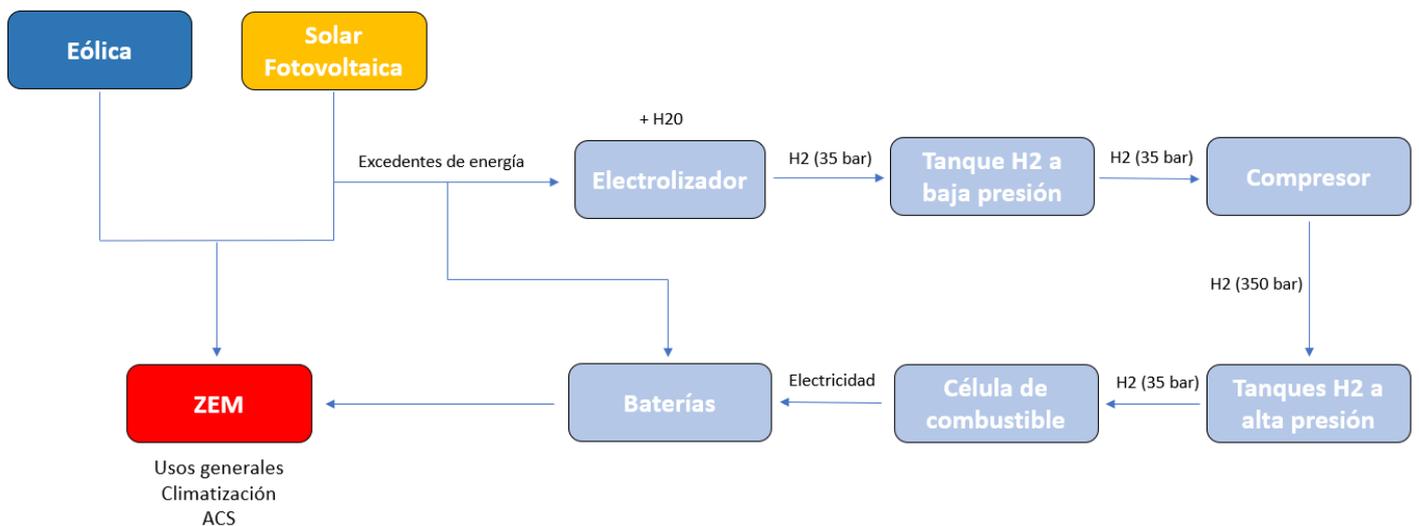
4. DISEÑO DEL MODELO

4.1. Hipótesis

Para la realización del modelo del ZEM, se va a utilizar el software ‘‘HOMER’’; en el cual se introduce el perfil de consumo eléctrico que se va a abastecer, con los datos horarios de consumos calculados en los apartados anteriores. Tras ello, el programa permite introducir todos los datos climáticos horarios que proporcionan el recurso renovable para cubrir las demandas energéticas.

Finalmente, se le transmite al programa los equipos que se van a utilizar para la producción de energía y tras ello, HOMER tendrá todos los datos necesarios para realizar las distintas combinaciones de modelos, proporcionando las cantidades de los equipos a utilizar o los kWh de cada equipo que son necesarios para cubrir las demandas.

En la *Ilustración 32* se explica esquemáticamente como se reparte la energía acumulada de los recursos renovables por los equipos utilizados, lo que va a ser el modelo energético del ZEM.



El funcionamiento del esquema anterior comenzaría con la captación de los recursos solar y/o eólico, los cuales servirían para generar electricidad y cubrir las demandas del ZEM directamente, para almacenarla en baterías y usarse posteriormente o para alimentar al electrolizador. Una vez alimentado el electrolizador y en conjunto con el aporte de agua, se podría generar Hidrógeno puro a 35 bares, el cual sería almacenado en el tanque de baja presión y posteriormente comprimido a 350 bares para su almacenaje a alta presión; de esta manera se consigue almacenar mucha mayor cantidad de Hidrógeno. El compresor sería alimentado con la electricidad generada con los equipos renovables o con el almacenamiento de las baterías o excedentes. Finalmente, cuando fuese necesario el aporte de electricidad por medio de otro recurso distinto al eólico o solar, comenzaría a alimentarse la pila de combustible con Hidrógeno y se generaría electricidad almacenada en las baterías para abastecer nuevamente la demanda del ZEM.

4.2. HOMER: Introducción de datos al programa

Para mostrar cómo es la introducción de los diferentes datos a HOMER, se va a tomar como ejemplo el caso del escenario de Zaragoza, ya que para los otros dos escenarios la introducción de datos va a ser igual. Se comienza por introducir el perfil de consumo del ZEM que se tiene que abastecer con los equipos. Por lo tanto, se agrupan todos los consumos calculados en el apartado 3 para esta ubicación y se introducen. El programa HOMER tiene la capacidad de almacenar los datos de un fichero de texto y es capaz de interpretar hasta datos horarios, los ordena de manera que crea la demanda de un año con el consumo de cada hora de cada día; lo cual acerca mucho este proyecto de estudio a la situación real que se quiere simular.

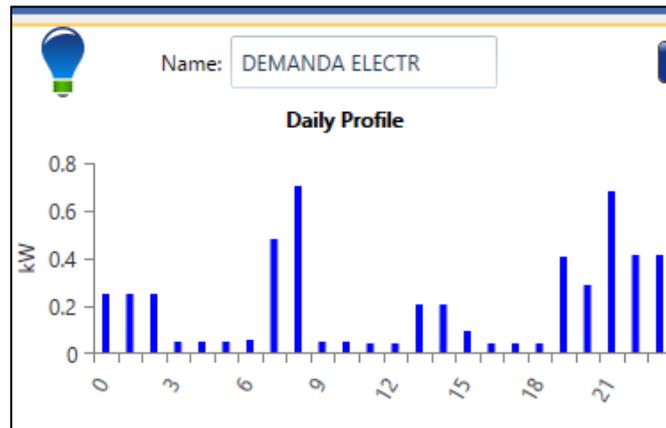


Ilustración 31: Perfil de consumo medio diario, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

En **Ilustración 33**, se observa el perfil de consumo medio diario que crea el software a partir de los datos horarios introducidos desde ‘Load, Electric’. Además; elabora el mismo tipo de perfil, pero para cada mes, donde se puede observar los meses más demandantes del año simulado.

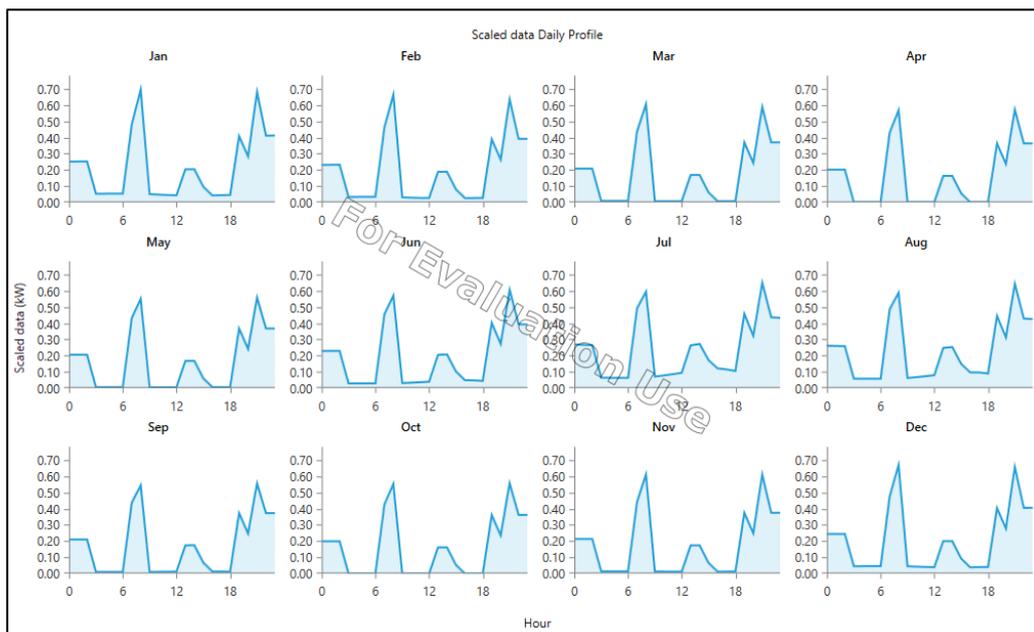


Ilustración 32: Perfiles de consumo por mes, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procede a introducir los recursos climáticos horarios y para ello se accede desde la pestaña ‘‘RESOURCES’’. En este proyecto, como ya se sabe se necesitan: ‘‘Solar GHI, Wind y Temperature’’.

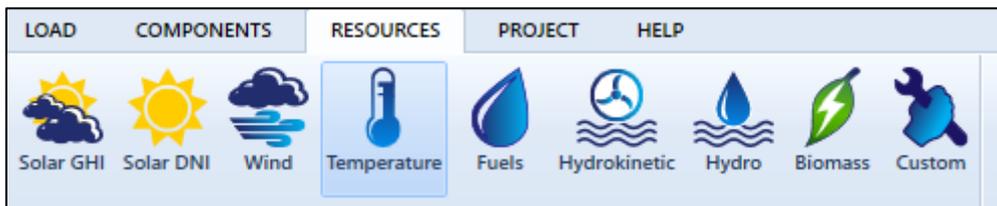


Ilustración 33: Recursos climáticos, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

Una vez introducidos los archivos de texto con los datos horarios de los recursos, el programa elabora unos gráficos medios del propio año.

- Radiación solar:

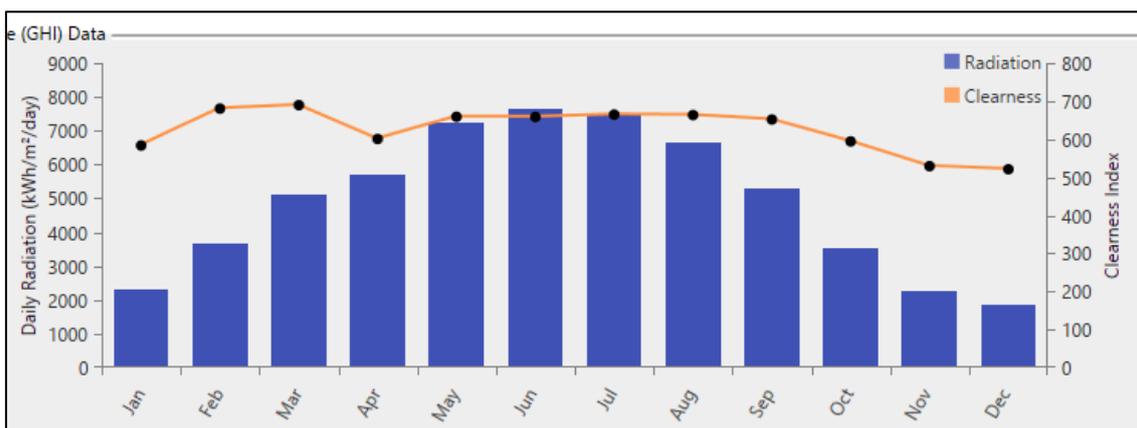


Ilustración 34: Gráfico de la Radiación media mensual, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

- Velocidad del viento:

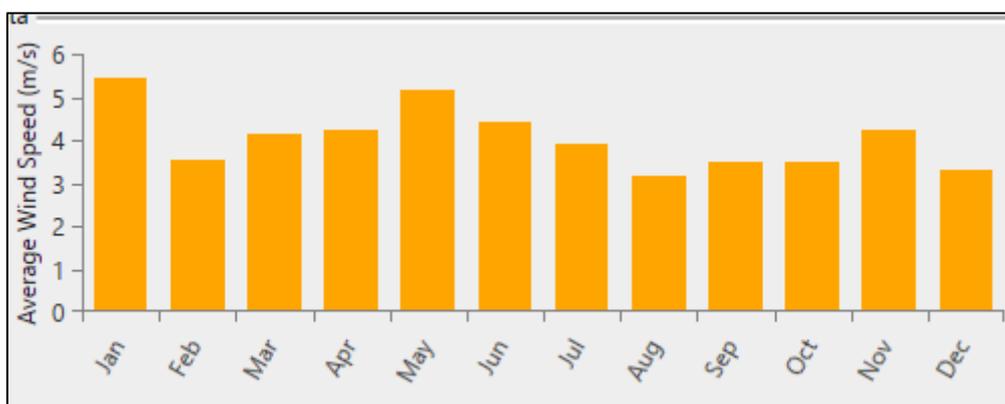


Ilustración 35: Gráfico de la Velocidad del viento media mensual, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

- Temperatura: Se accede desde ‘‘Temperature’’.

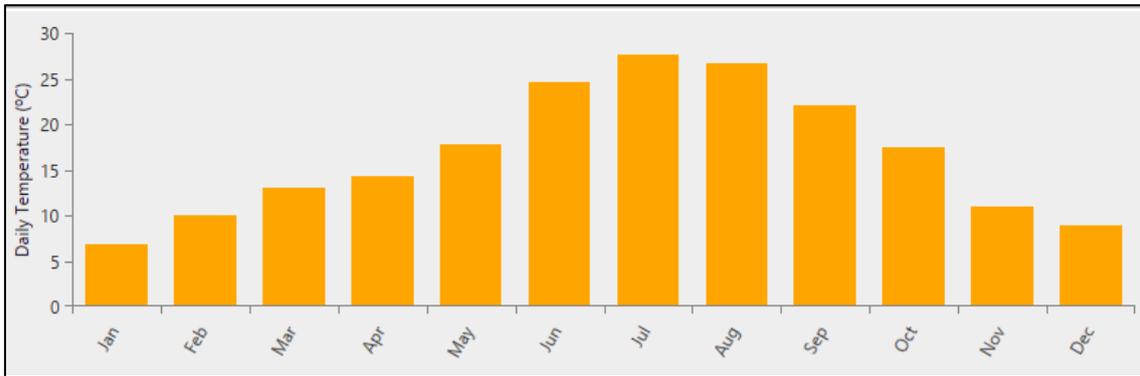


Ilustración 36: Gráfico de la Temperatura media mensual, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso, es introducir los equipos que se van a necesitar; que ya se han detallado en el apartado 3.3. En HOMER, se accede al menú de los equipos disponibles desde la pestaña: ‘‘Components’’. Se introducen todos los equipos que se quieren simular; lo que quiere decir que en los resultados de la simulación aparecerán distintas opciones donde no se hará uso de todos ellos, para poder analizar así la necesidad o no de su utilización y su influencia en el sistema.

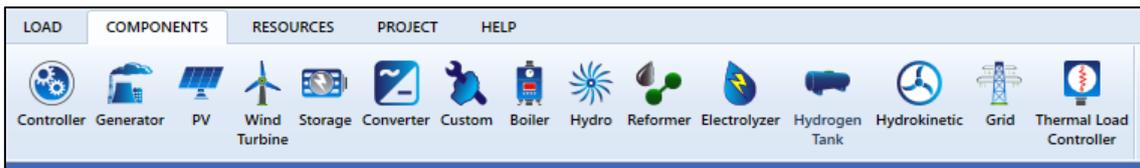


Ilustración 37: Equipos energéticos, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el programa habrá elaborado el modelo energético que forman los equipos para los tres escenarios estudiados.

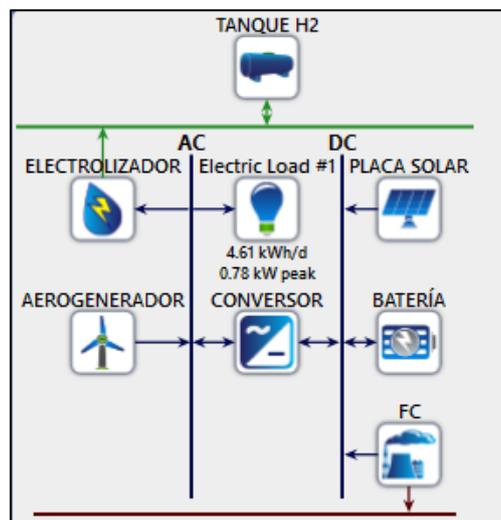


Ilustración 38: Modelo energético común para los tres escenarios, HOMER. Fuente: Elaboración propia.

5. RESULTADOS

En este apartado, se ordena a HOMER que calcule los resultados después de introducir todos los parámetros necesarios; ya comentados anteriormente con un ejemplo. Se va a tener que realizar el mismo procedimiento que se siguió con Zaragoza, con Riga y la Antártida también; respecto a la introducción de los diferentes datos de recursos climáticos. El programa, según los recursos renovables que se le introducen y para el mismo modelo energético, realiza múltiples combinaciones que dan como resultado lo que se muestra a continuación:

Architecture									
		PLACA SOLAR (kW)	AEROGENERADOR	PILA H2 (kW)	BATERÍA	ELECTROLIZADOR (kW)	TANQUE H2 (kg)	CONVERSOR (kW)	
		1.30			1	2.40	5.00	0.849	
		1.31		1.20	1	2.40	5.00	0.824	
		1.01	1		1	2.40	5.00	0.784	
		1.01	1	1.20	1	2.40	5.00	0.817	
			1		23	2.40	5.00	1.27	
			1	1.20	23	2.40	5.00	1.68	

Ilustración 39: Resultados de HOMER para la ubicación de Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.

Se muestra un ejemplo de cómo proporciona HOMER los resultados; donde se aprecia que para cada caso realiza la simulación variando las combinaciones de los equipos, lo que provoca cambios en las necesidades de potencia en ellos. Por ejemplo; es coherente que en el caso de no tener aerogenerador, la potencia de las placas solares sea mayor al caso en el que si se tiene aerogenerador, ya que en este último caso se distribuiría el abastecimiento energético entre los dos equipos.

Se quiere destacar que, en HOMER se tiene un controlador de la producción que puede programar como va a utilizarse la electricidad. Dicho controlador, consigue que la energía proveniente de los recursos solar y eólico, sean utilizados para abastecer la carga eléctrica de primera necesidad; es decir, el consumo del ZEM. Tras ello, deja en segundo plano el abastecimiento de elementos de segunda necesidad, como es el caso del electrolizador y pila de Hidrógeno.

Por lo tanto; el controlador consigue que la electricidad producida sea siempre utilizada primero para abastecer el edificio y si hay electricidad sobrante, la dirige al abastecimiento de los equipos de generación de hidrógeno; de esta manera se evita utilizar innecesariamente electricidad para generar hidrógeno en un momento vital de necesidad para cubrir la demanda de la iluminación del ZEM, o la climatización.

La pila de Hidrógeno al final es utilizada en mayor medida en aquellas situaciones donde no hay suficiente recurso solar o eólico y no se puede cubrir la demanda; por lo tanto, al tener Hidrógeno almacenado ya se tiene un recurso energético capaz de producir electricidad.

Una vez calculados los tres escenarios estudiados, se ha elaborado una tabla que agrupe todos los resultados obtenidos para visualizar que opciones son más atractivas y cuáles serían mejores opciones:

Tabla 17: Agrupación de resultados de los tres escenarios estudiados. Fuente: Elaboración propia.

UBICACIÓN	CONSUMO [kWh/año]	AEROGEN. 3 kW	PV [kWp]	PILA H2 [kW]	ELECTROL. [kW]	ALMAC. H2 [kg]	BATERÍAS [kWh]	CONVERSOR [kW]	PRODUCCIÓN [kWh/año]	EXCESO [%]
ZARAGOZA	2.299	-	1,3	1,2	2,4	5	9,6	0,824	2.163	0
ZARAGOZA	4.588	1	1,01	1,2	2,4	5	9,6	0,849	4.984	5,32
ZARAGOZA	1.914	-	1,31	-	2,4	5	9,6	0,817	2.600	23,8
ZARAGOZA	2.620	1	-	1,2	2,4	5	153,6	1,68	2.696	0,1
ZARAGOZA	1.914	1	1,01	-	2,4	5	9,6	0,784	4.433	55,1
RIGA	3.506	-	30,6	1,2	2,4	10	48	2,7	6.223	43,8
RIGA	4.710	1	7,71	1,2	2,4	10	38,4	1,29	8.434	41,7
RIGA	1.714	1	-	-	2,4	10	393,6	4,96	1.622	0
RIGA	1.722	1	-	1,2	2,4	10	393,6	4,96	1.630	0
RIGA	2.106	1	6,76	-	2,4	15	48	2,7	5.618	60,6
ANTÁRTIDA	2.932	-	1,63	1,2	2,4	5	9,6	0,917	3.125	0,4
ANTÁRTIDA	4.430	1	0,787	1,2	2,4	5	9,6	0,935	12.346	63,4
ANTÁRTIDA	2.010	1	-	-	2,4	5	48	0,893	10.934	81,1
ANTÁRTIDA	4,848	1	-	1,2	2,4	10	9,6	0,886	11.249	56,6
ANTÁRTIDA	2.009	1	1,02	-	2,4	5	9,6	0,912	12.730	84

En la **Tabla 17**, se puede observar todos los resultados obtenidos en HOMER y las potencias necesarias de los equipos que ha calculado para cada combinación. Hay algunos equipos que ya estaban comprados por Arpa, por lo que sus características ya estaban definidas y no han sido resultado de HOMER. Son el caso del aerogenerador; de 3 kW de potencia, la pila de hidrógeno; de 1,2 kW y el electrolizador; de 2,4 kW. En el caso de las baterías se tenían elegidas unas de 9,6 kWh; por lo tanto, los diferentes resultados obtenidos son producto de necesitar varias baterías de esta misma potencia y en el caso del almacenamiento de Hidrógeno se tiene que cada tanque almacena 5 kg, por lo que equivale a un tanque y 10 kg equivalen a 2 tanques.

Las casillas en rojo indican los resultados que son incoherentes y por lo tanto erróneos, ya que el consumo eléctrico está por debajo de la producción del sistema, así que esos resultados no podrían abastecer al ZEM.

Para la elección de los equipos finales se van a analizar los resultados según dos criterios:

- Criterio basado en la eficiencia del sistema
- Criterio basado en la fiabilidad y seguridad del sistema en cualquier imprevisto climático.

5.1. Resultados de HOMER, Zaragoza

Según un criterio más enfocado a la eficiencia energética, se va a buscar un sistema que no derroche innecesariamente energía; lo que afecta directamente al aumento económico del proyecto debido a un sobredimensionamiento excesivo. Por ello; siguiendo el orden de la **Tabla 17** para el escenario de Zaragoza, serían buenas opciones:

- 1) La de su segunda fila; que cuenta con todos los equipos y tiene un exceso energético del 5,52 %.
- 2) La de su tercera fila; que únicamente cuenta con PV y tiene un exceso de producción del 23,8 %.
- 3) La de su cuarta fila; que descarta la utilización de PV y no tiene exceso de producción.

Por otro lado, siguiendo un criterio enfocado a la fiabilidad y del sistema, se piensa en elegir una distribución de equipos que pueda abarcar más de un solo recurso renovable; por lo tanto, habrá una seguridad de abastecimiento energético ante inclemencias climáticas que recorten recursos. Es por ello, que las opciones 1) y 3); a pesar de tener un mínimo exceso de producción energética que sería un dimensionamiento teóricamente perfecto, se considera muy arriesgado tener un margen tan pequeño de demanda-producción y se decide buscar otra opción.

La opción 2) se considera que da una solución mejor para los casos donde el abastecimiento del ZEM viera limitado el recurso eólico o solar y además cumple con un margen más alto entre la demanda y la producción eléctrica. Eligiendo esta opción, se contaría con la producción eléctrica de un recurso extra, generada por la pila de combustible a partir del Hidrógeno producido por el electrolizador.

Finalmente, la decisión es escoger la opción 2); marcada en verde en la **Tabla 17**. Las razones son porque cumple de mejor manera con los criterios, abarca todos los recursos climáticos disponibles, dispone de mayor cantidad de fuentes de energía que aportan seguridad al modelo energético y a pesar de tener mayor exceso de producción, es un valor perfectamente admisible e incluso más favorable que los mínimos márgenes que tienen las dos opciones descartadas.

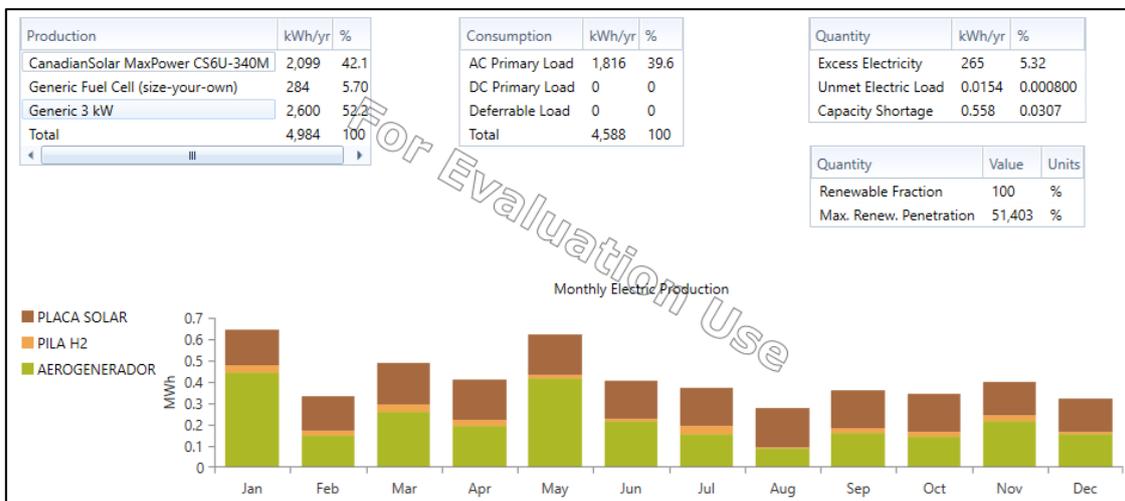


Ilustración 40: Resultados HOMER Zaragoza - Distribución de la producción eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

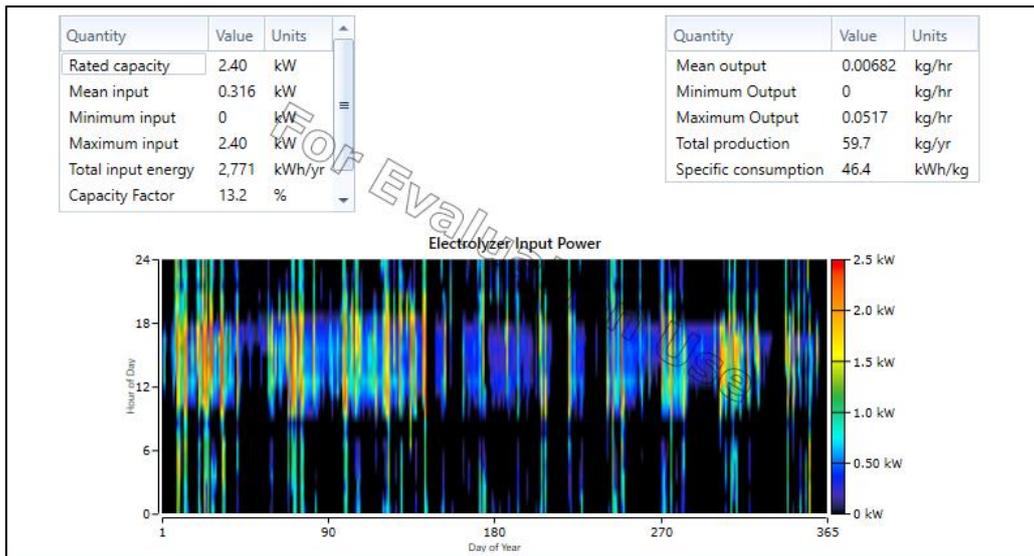


Ilustración 41: Resultados HOMER Zaragoza - Producción de H₂ del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.

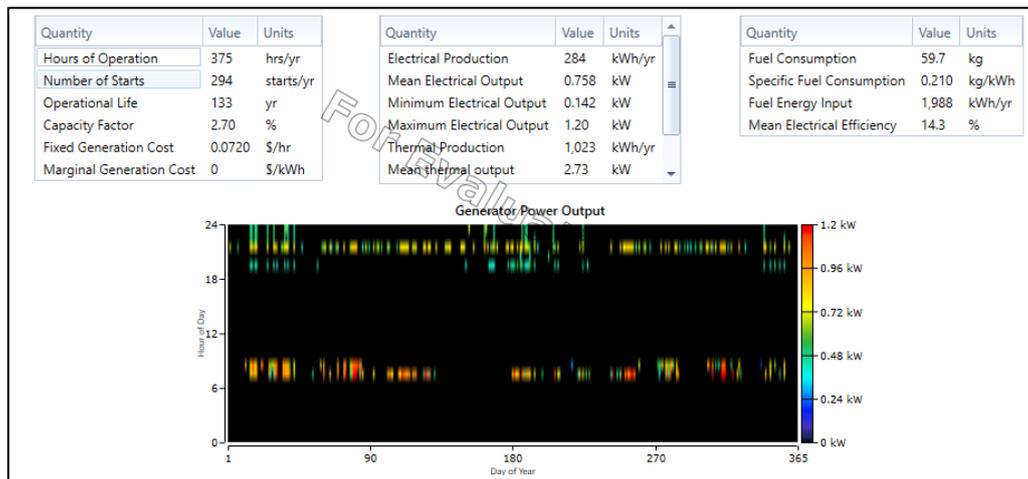


Ilustración 42: Resultados HOMER Zaragoza – Consumo pila de H₂. Fuente: Elaboración propia.

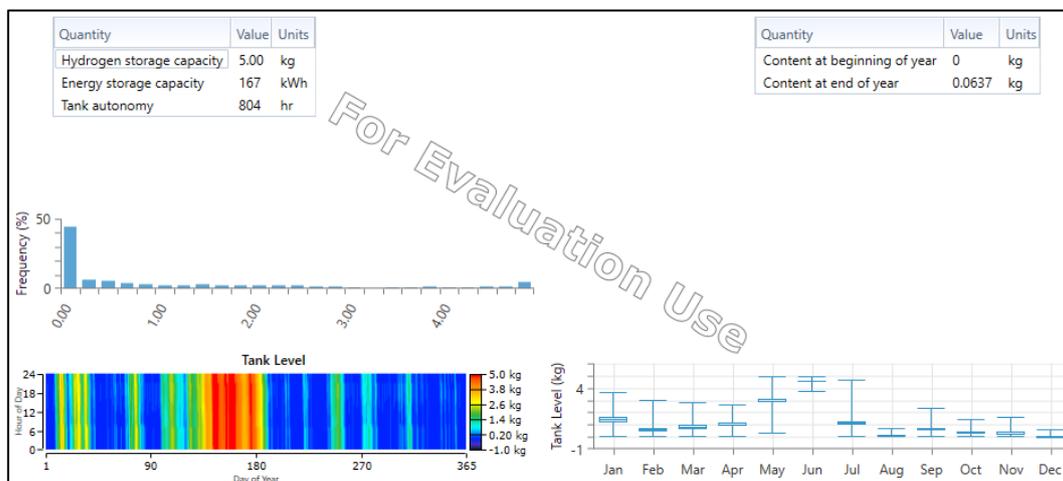


Ilustración 43: Resultados HOMER Zaragoza – Almacenamiento de H₂ en los tanques. Fuente: Elaboración propia.

Comentando los puntos más relevantes de las imágenes expuestas, se puede observar en la **Ilustración 40** la distribución de la producción eléctrica en:

- 2.600 kWh/año del aerogenerador (52,2%)
- 2.100 kWh/año de las placas solares (42,1%)
- 284 kWh/año de la pila de hidrógeno (5,7%)

Respecto al electrolizador, se puede ver en la **Ilustración 41** como es su funcionamiento y a que horas se suele poner en marcha a lo largo del año en el gráfico de potencia. Sus valores de producción más importantes son una producción de Hidrogeno media durante el año de 0,00682 kg/h, una producción total de 59,7 kg/año y un consumo medio de 46,4 kWh por kg producido.

A continuación, en la **Ilustración 42** se ve en que momentos del día se activa la pila de Hidrógeno durante el año y a que horas del día. Aporta una cantidad de 284 kWh y funciona durante 375 horas,

Finalmente, en la **Ilustración 44**, se muestra como se ha ido llenando el almacenamiento de Hidrógeno a lo largo del año, a la vez que también se vacía para suministrar combustible a la pila de Hidrógeno. Se ve como a mitad de año el almacenamiento está prácticamente lleno, lo que provocaría que no se pudiera generar más Hidrógeno. Pero también se puede que pensar que es debido a que en esa época del año no hay excedentes de energía suficientes para suministrar al electrolizador y por lo tanto no hay producción de Hidrógeno, a la vez que tampoco se puede suministrar a la pila y por ello se ve como en la gráfica para aproximadamente dos meses seguidos, el nivel de almacenamiento de los tanques está en rojo; ni sube ni baja del máximo de 5 kg. Cuando el color varía entre distintos tonos azulados y verdes significa que el tanque se llena y vacía constantemente porque se está produciendo Hidrogeno en el electrolizador a la vez que se consume en forma de combustible en la pila.

5.2. Resultados de HOMER, Riga

Partiendo del mismo modelo energético de Zaragoza, se cambia la demanda eléctrica del ZEM, junto a los datos de los recursos climáticos y ya se pueden obtener los resultados para la siguiente ubicación. Se van a analizar los casos del escenario de Riga siguiendo los mismos criterios que anteriormente para decidir el sistema más adecuado.

Volviendo a la **Tabla 17**; en primer lugar, se ve como hay dos simulaciones que no cubren la demanda mínima; por lo tanto, son descartados. Por otro lado, hay una opción que está sobredimensionada en exceso en un 62% y observando la primera y segunda fila se tienen unos excesos de producción eléctrica de 43,8% y 40,6% respectivamente. Ante esta situación, la diferencia está en que un modelo considera el uso de un aerogenerador y otro no, es por ello que se selecciona la opción que contempla su uso y por lo tanto garantiza la seguridad del abastecimiento de la demanda. Se toma esta decisión porque la climatología en el escenario de Riga es muy desfavorable; muy poca radiación en meses de invierno y velocidades de viento relativamente bajas como para no compensar la falta de recurso solar. Por lo tanto, el criterio sería similar al anterior descrito en Zaragoza, se quiere garantizar la fiabilidad del modelo energético contemplando un dimensionamiento de la instalación.

Architecture									
		PLACA SOLAR (kW)	AEROGENERADOR	PILA H2 (kW)	BATERÍA	ELECTROLIZADOR (kW)	TANQUE H2 (kg)	CONVERSOR (kW)	
		30.7			5	2.40	10.0	2.50	
		7.71	1	1.20	4	2.40	10.0	1.29	
		30.6		1.20	5	2.40	15.0	2.70	
		6.76	1		5	2.40	10.0	1.02	
			1		41	2.40	10.0	4.96	
			1	1.20	41	2.40	10.0	4.96	

Ilustración 44: Resultados de HOMER para la ubicación de Riga. Fuente: Elaboración propia.

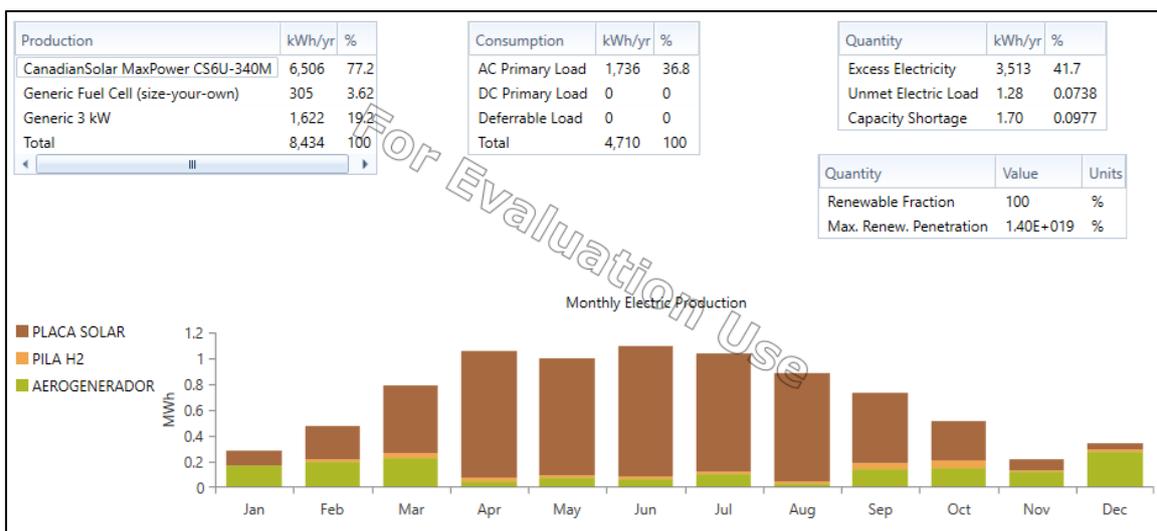


Ilustración 45: Resultados HOMER Riga - Distribución de la producción eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

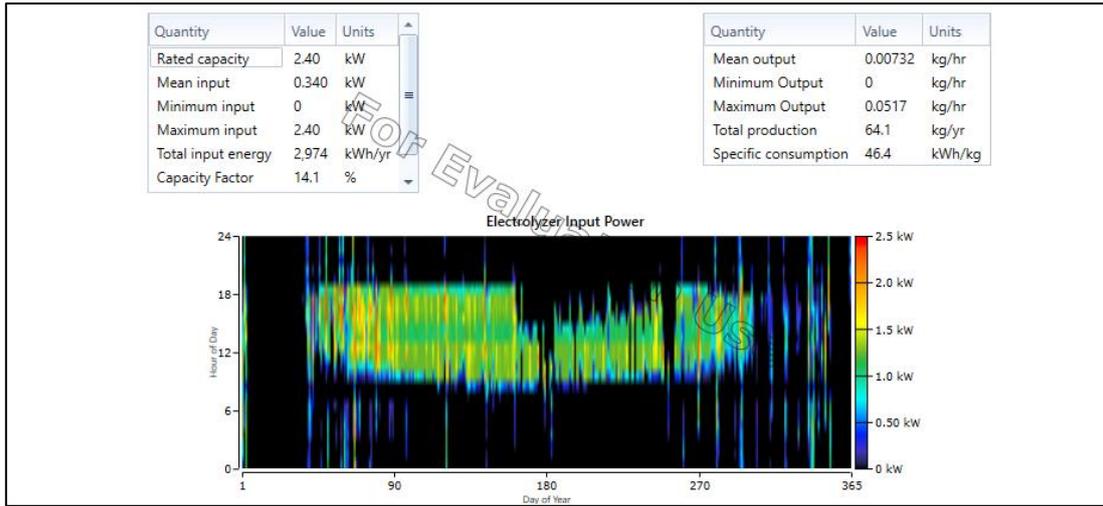


Ilustración 46: Resultados HOMER Riga - Producción de H₂ del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.

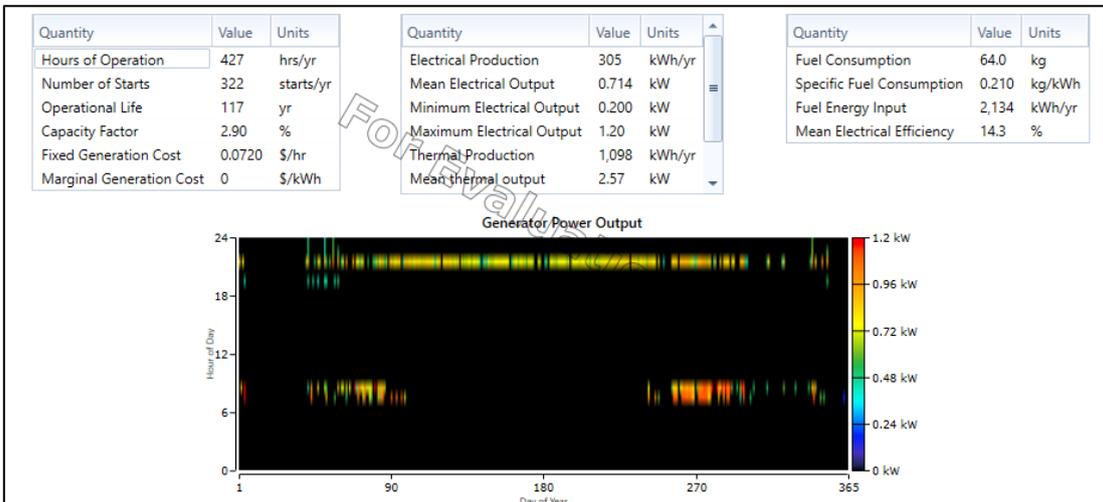


Ilustración 47: Resultados HOMER Riga - Producción pila de H₂. Fuente: Elaboración propia.

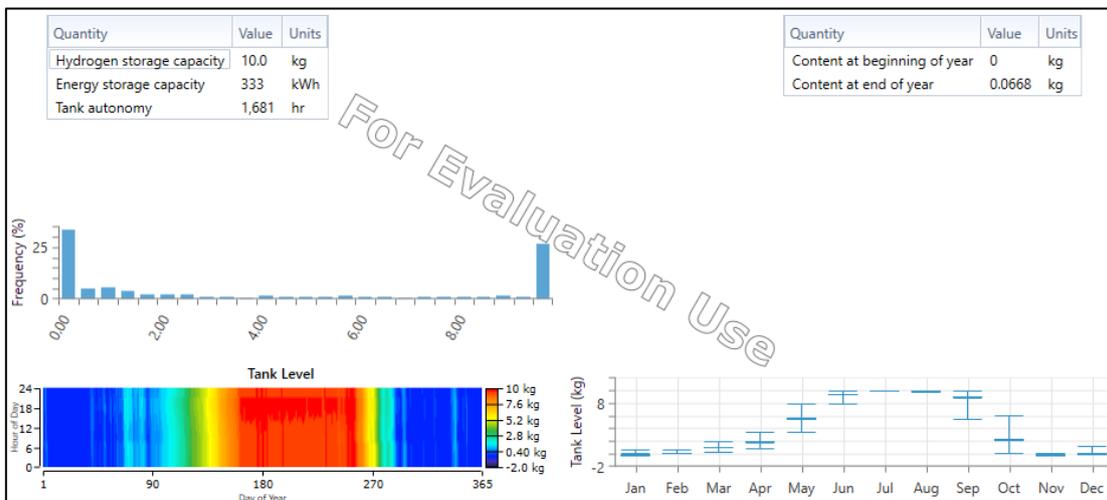


Ilustración 48: Resultados HOMER Riga – Almacenamiento de H₂ en los tanques. Fuente: Elaboración propia.

En la **Ilustración 46**, se muestra la distribución de la producción eléctrica siguiente:

- 6.506 kWh/año de las placas solares (77,2%)
- 1.622 kWh/año del aerogenerador (19,2%)
- 305 kWh/año de la pila de hidrógeno (3,62 %)

De dicha ilustración, se puede comprobar como en los meses de verano el recurso solar es relativamente alto, porque hay gran producción eléctrica en comparación a la eólica. Pero los meses de invierno dicha producción se ve reducida casi al mínimo debido a la falta de radiación y depende totalmente del recurso eólico y de la producción que pueda aportar la pila de Hidrógeno. Se vio que efectivamente, en Riga no se podía abastecer al ZEM durante un año completo contando con únicamente placas solares, o aerogenerador, ya que era imposible que se cubriera la demanda por completo en todos los meses del año.

El electrolizador produce 0,0072 kg/h de media y una cantidad de 64,1 kg/año de Hidrógeno. Se ve como su funcionamiento es a potencias de entre 1 y 2 kW a lo largo del año. La pila de Hidrógeno consume todo el combustible producido, trabajando durante 341 horas.

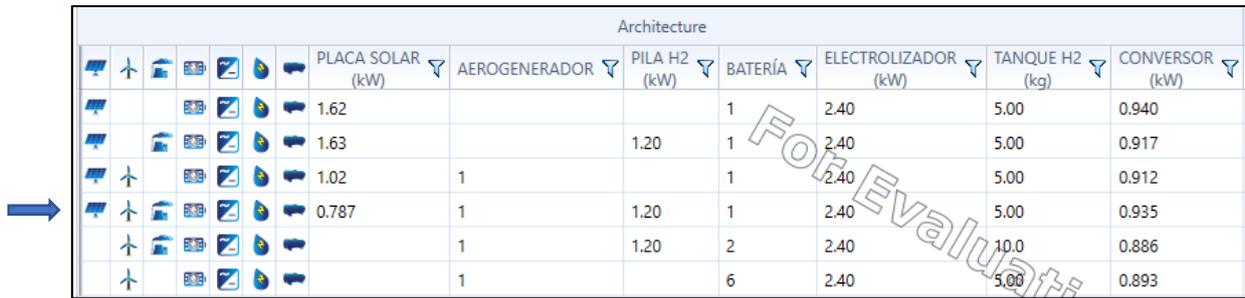
Respecto al tanque de Hidrógeno, se ve como permanece lleno durante prácticamente cuatro o cinco meses, lo que puede deberse a los motivos ya comentados en los resultados de Zaragoza, pero se está limitando la producción de Hidrógeno y por lo tanto la producción eléctrica de la pila por falta de combustible.

5.3. Resultados de HOMER, Antártida

Según los resultados obtenidos en la Antártida, se ha decidido seguir únicamente el criterio de fiabilidad del sistema para garantizar el correcto funcionamiento en el ZEM. Esto se debe a que esta ubicación es diferente a las demás; en cuanto al tipo de consumo doméstico que se va a tener y de las condiciones climáticas tan extremas.

En este escenario; como ya se ha comentado, se va a habitar durante cuatro meses del verano antártico, por lo que el recurso solar todavía es aceptable en ese periodo. A pesar de ello; el clima es muy extremo y puede que en los cuatro meses de verano haya un tiempo de escasez de recurso solar, por lo que se tiene que depender del recurso eólico también. Además; se cree conveniente tener la pila de hidrógeno para situaciones de emergencia y sobre todo para los meses de invierno donde la demanda se va a ver drásticamente reducida ya que los investigadores españoles desalojan el ZEM en esa época y solo hay gasto eléctrico de mantenimiento. Aun así, se ve necesaria esta pila para cuando haya periodos de recurso solar nulo y a su vez pueda ocurrir algo con el aerogenerador; por lo tanto, todo el criterio empleado en esta ubicación es de seguridad ya que no se está situado en una zona fácilmente accesible de ayuda en caso de falta de electricidad.

Concluyendo; se ha seleccionado la opción de la segunda fila para la Antártida de la **Tabla 15**, a pesar de tener un exceso de producción eléctrica del 63,4 %, pero se asume que tiene que ocurrir para garantizar el correcto abastecimiento durante todo el año del ZEM, que al final es el objetivo.



Architecture									
		PLACA SOLAR (kW)	AEROGENERADOR	PILA H2 (kW)	BATERÍA	ELECTROLIZADOR (kW)	TANQUE H2 (kg)	CONVERSION (kW)	
		1.62			1	2.40	5.00	0.940	
		1.63		1.20	1	2.40	5.00	0.917	
		1.02	1		1	2.40	5.00	0.912	
		0.787	1	1.20	1	2.40	5.00	0.935	
			1	1.20	2	2.40	10.00	0.886	
			1		6	2.40	5.00	0.893	

Ilustración 49: Resultados de HOMER para la ubicación de la Antártida. Fuente: Elaboración propia.

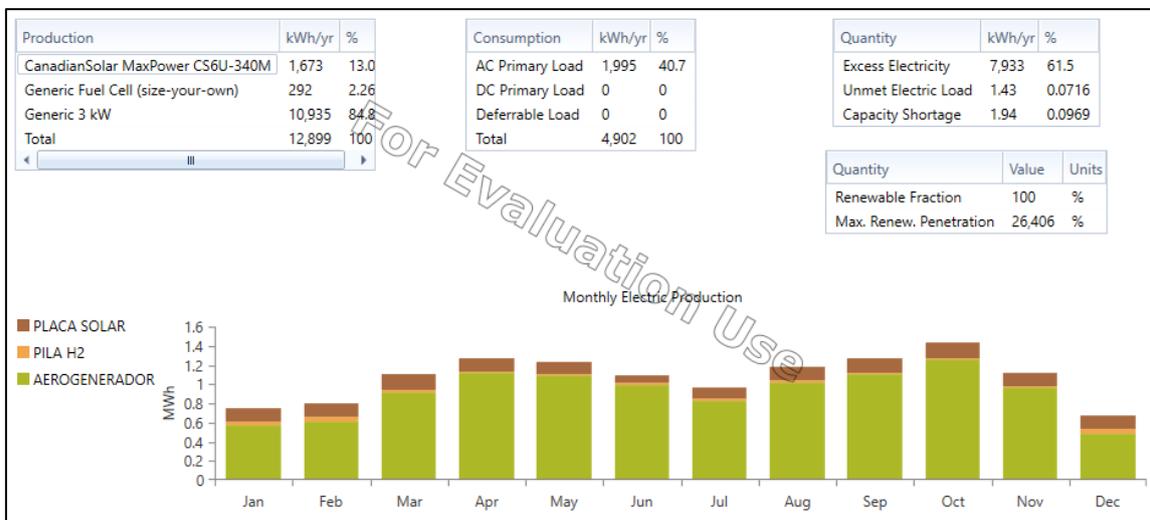


Ilustración 50: Resultados HOMER Antártida - Distribución de la producción eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

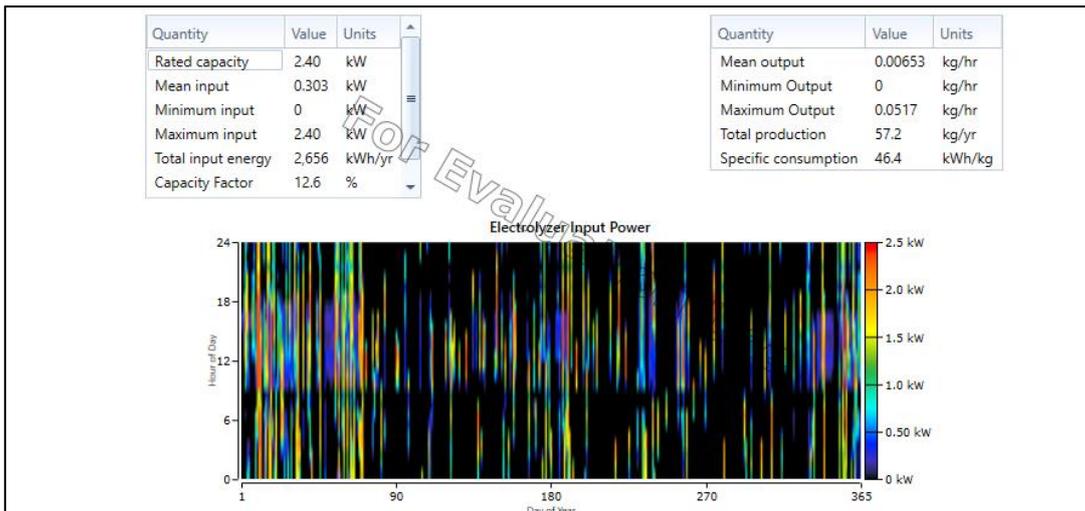


Ilustración 51: Resultados HOMER Antártida - Producción de H₂ del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.

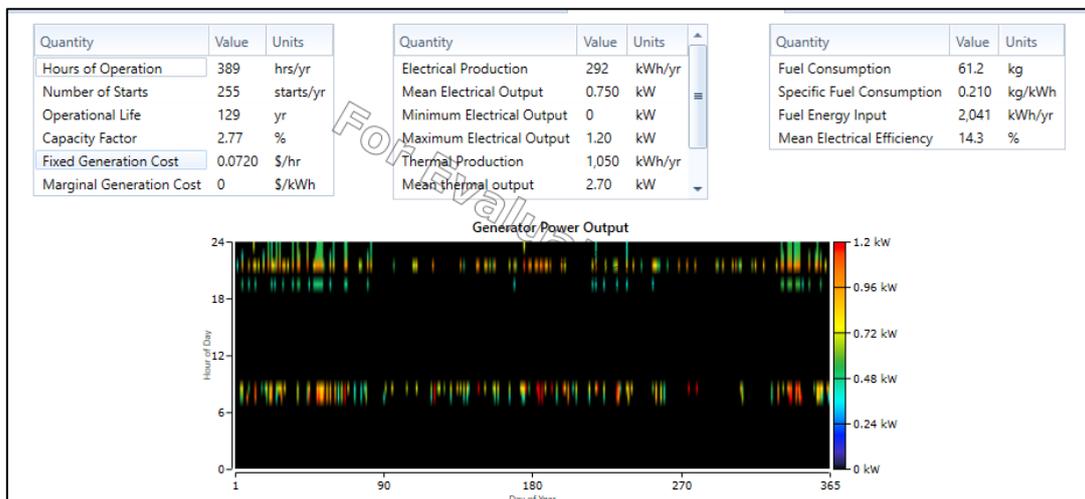


Ilustración 52: Resultados HOMER Antártida - Producción pila de H₂. Fuente: Elaboración propia.

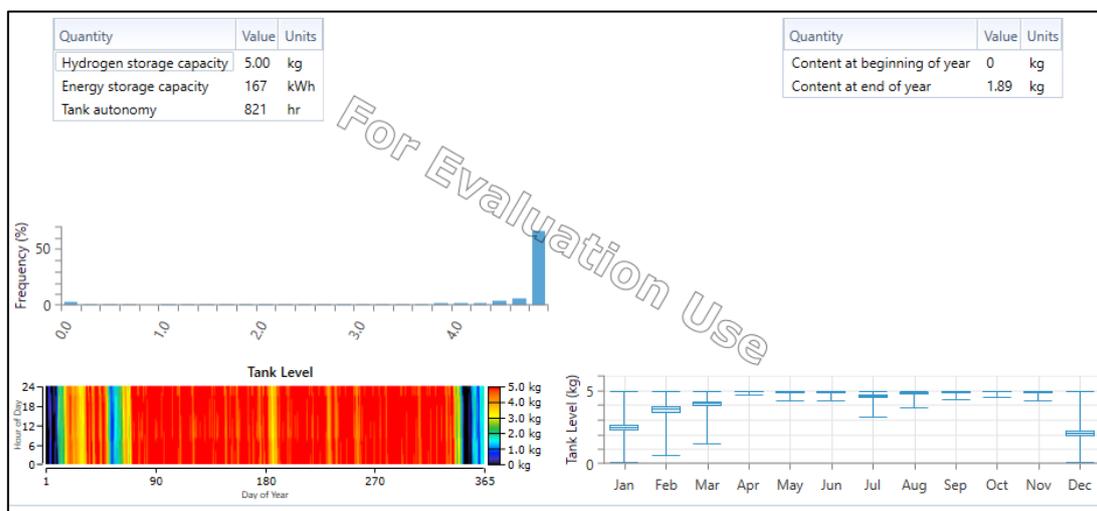


Ilustración 53: Resultados HOMER Antártida – Almacenamiento de H₂ en los tanques. Fuente: Elaboración propia.

En la **Ilustración 50**, se muestra la distribución de la producción eléctrica siguiente:

- 10.935 kWh/año del aerogenerador (88,6 %)
- 1.147 kWh/año de las placas solares (9,29 %)
- 264 kWh/año de la pila de hidrógeno (2,13 %)

El electrolizador produce una cantidad de 0,0063 kg/h y 57,2 kg de Hidrógeno en todo el año. En cuanto al gráfico de la potencia empleada por el electrolizador, se destaca el gran abanico de kW que alimentan al equipo durante todo el año, desde 0,5 kW hasta los 2,5 kW.

El tanque se llena prácticamente en el primer mes (**Ilustración 53**), lo que ocurre es que al tener que abastecer la carga primaria del ZEM con los recursos solar y eólico, pila no se pone en funcionamiento más que en momentos determinados, que debe ser cuando no hay prácticamente otro recurso climático disponible. La pila de Hidrógeno consume todo el combustible producido, trabajando durante 389 horas.

6. CONCLUSIONES

Como conclusión de los resultados obtenidos y de las decisiones tomadas de diseño, para abastecer la demanda del módulo ZEM en las ubicaciones estudiadas es indispensable contar con equipos abastecidos con recurso solar y eólico, mientras que el recurso de almacenamiento de energía en forma de Hidrógeno tiene mucho potencial a largo plazo, pero todavía se encuentra en desarrollo; por lo tanto, no es un recurso totalmente eficiente en estos tiempos. A pesar de ello, actualmente podría haber opciones más eficientes y económicas para cumplir con el objetivo de cubrir la demanda del edificio de este proyecto.

Según los resultados obtenidos, con el modelo disponible siempre ha sido mejor opción tener en cuenta la utilización del almacenamiento de Hidrógeno con los excedentes energéticos renovables y el posterior uso de la pila de combustible para generar electricidad, ya que garantiza mayor seguridad del edificio respecto a su abastecimiento de las demandas en situaciones climáticas desfavorables. Podrían haberse elegido opciones como únicamente tener PV en Zaragoza, pero sería muy arriesgado ya que en épocas de clima nublado puede que no haya ninguna fuente de energía durante días.

A continuación, se van a detallar los equipos finales seleccionados para llevar al ZEM en los diferentes escenarios estudiados en este proyecto:

- **En Zaragoza:**

Según la simulación de HOMER para el modelo elegido, ha resultado que se necesita 1 kW de PV, por lo tanto, teniendo PVs de 335 W, se van a necesitar 3 unidades.

Introduciendo al programa una potencia para aerogenerador de 3 kW, el resultado es que se necesita una unidad.

Para baterías de 9,6 kWh, se necesitará una unidad, además un inversor de 0,817 kW y para almacenar 5 kg de Hidrógeno hará falta un tanque de alta presión y otro tanque de baja presión que almacena temporalmente el Hidrógeno para posteriormente comprimirlo al de alta y alimentar a la pila.

Finalmente; y de forma común para las tres ubicaciones, un electrolizador y una pila de combustible.

Tabla 18: Cantidad de equipos en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.

	kW	Nº Equipos
Placa solar	1	3
Aerogenerador	3	1
Batería	9,6	1
Pila H2	1,2	1
Inversor	0,817	1
	kg	Nº Equipos
Tanque H2	5	2

- **En Riga:**

Tabla 19: Cantidad de equipos en Riga. Fuente: Elaboración propia.

	kW	Nº Equipos
Placa solar	7,7	23
Aerogenerador	3	1
Batería	38,4	4
Pila H2	1,2	1
Inversor	1,29	1
	kg	Nº Equipos
Tanque H2	10	3

- **En La Antártida:**

Tabla 20: Cantidad de equipos en la Antártida. Fuente: Elaboración propia.

	kW	Nº Equipos
Placa solar	0,54	2
Aerogenerador	3	1
Batería	9,6	1
Pila H2	1,2	1
Inversor	0,88	1
	kg	Nº Equipos
Tanque H2	5	1

7. ANEXOS

7.1. Anexo 1: Explicación detallada de los cálculos (COPS)

Para el cálculo de todos los consumos eléctricos por ACS y climatización, se elaboraron previamente tablas de Excel donde realizar todos los cálculos previos necesarios, como son las múltiples interpolaciones horarias para obtener los COPS.

Para comenzar, se parte de los valores de referencia de los COPS dados por la ficha técnica del fabricante de la bomba de calor, con los que se dibuja la curva y se aproxima el resto de los valores por extrapolación con la ecuación de la recta. Una vez se tienen los valores comentados, se trasladan a Excel, donde se asigna una posición a cada valor de COP con su temperatura; de menor a mayor como se muestra a continuación:

Tabla 21: COPS de referencia para el cálculo horario, Excel. Fuente: Elaboración propia.

T fija [°C] = X	-30	-15	-7	2	7	15	25	35	45
COP fijo = Y	1	1,53	2,61	3,15	3,86	4,67	4,54	2,78	1
POSICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Se remarcan en amarillo los valores de los que se ha partido y se puede observar como los COPS van aumentando o reduciéndose desde un valor entre 15 y 25°C. Esto es debido a que el valor medio de temperatura que se quiere conseguir en el interior de la construcción es de 20°C; por lo tanto, por debajo de dicha temperatura la bomba de calor entraría en modo calefacción (se reduce el COP cuanto mayor es la temperatura exterior) y por encima entraría en modo calefacción (se reduce el COP cuanto menor es la temperatura exterior).

A continuación, se introducen a la Excel todos los valores de temperatura con su hora de medida; obteniéndose 8.765 filas de datos, que son las horas que hay en el año estudiado. Tras ello, se procede a realizar el método de cálculo por interpolación del COP horario; que trataría de situar en que posición está la temperatura que se lee para cada hora a partir de los valores de temperatura de la **Tabla 19** para así saber entre que dos valores de COP hay que interpolar. Se va a explicar cómo se crearon y cómo funciona cada columna para llegar a calcular los COPS horarios y tras ello se mostrará un ejemplo:

Tabla 22: Variables creadas para interpolación de los COPS, Excel. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura fija	X	COP fijo	Y
Temperatura, límite inferior	X0	COP, límite inferior	Y0
Temperatura, límite superior	X2	COP, límite superior	Y2
Temperatura horaria leída	X1	COP interpolado	Y1

- **Columna “POSICIÓN”:** Se crea una columna que sirve para asignar un valor de posición a cada casilla de temperatura que se lee. Para ello se utiliza la función “=COINCIDIR (...)”; en cuyo interior se introduce primero la casilla de temperatura leída “X1”, después se seleccionan los valores de temperatura fijos de la *Tabla 19* “X” y finalmente se escribe un 1, que sirve para que la posición elegida de la temperatura se redondee al menor valor entre los dos posibles.
- **Columna “X1 [°C]”:** Se crea una columna con todos los valores horarios de temperaturas para la ubicación estudiada.
- **Columna “X0 [°C]”:** En referencia al valor del límite inferior de temperatura “X0”, que se encuentra entre las casillas de temperaturas fijas “X”, para la posición obtenida en el paso anterior. Se utiliza la función “=INDICE (...)”; empezando por introducir las casillas de las variables de temperaturas fijas “X” y tras ello, la casilla de POSICIÓN obtenida.
- **Columna “X2 [°C]”:** En referencia al valor del límite superior de temperatura “X2”, que se encuentra entre las casillas de temperaturas fijas “X”, para la posición siguiente a la obtenida en la primera columna “POSICIÓN”. Se utiliza la función “=INDICE (...)”, empezando por introducir las casillas de las variables “X” y tras ello, la casilla de POSICIÓN + 1, para que avance una casilla más a la siguiente posición, lo que corresponde al límite superior.
- **Columna “Y0 [COP]”:** En referencia al valor del límite inferior de los COPS “Y0”, que se encuentra entre las casillas de COPS fijos “Y”, para la posición obtenida en la columna “POSICIÓN”. Se utiliza la función “=INDICE (...)”; empezando por introducir las casillas de las variables de temperaturas fijas “Y” y tras ello, la casilla de POSICIÓN obtenida.
- **Columna “Y2 [COP]”:** En referencia al valor del límite superior de los COPS “Y2”, que se encuentra entre las casillas de COPS fijos “Y”, para la posición siguiente a la obtenida en la primera columna “POSICIÓN”. Se utiliza la función “=INDICE (...)”, empezando por introducir las casillas de las variables “Y” y tras ello, la casilla de POSICIÓN + 1, para que avance una casilla más a la siguiente posición, lo que corresponde al límite superior.
- **Columna “Y1 [COP]”:** Finalmente, se crea una columna para realizar los cálculos de las interpolaciones a partir de todos los valores obtenidos en las columnas anteriores.

$$Y1 [COP] = \frac{X1 [^{\circ}C] - X0[^{\circ}C]}{X2 [^{\circ}C] - X0[^{\circ}C]} * (Y2[COP] - Y0[COP]) + Y0[COP]$$

(Ec. 6)

Ejemplo de cálculo del COP interpolado:

Tabla 23: Ejemplo de cálculo del COP interpolado, Excel. Fuente: Elaboración propia.

HORA	X1 [°C]	POSICIÓN	X0 [°C]	X2 [°C]	Y0 [COP]	Y2 [COP]	Y1 [COP]
2019-01-01T00:00:00	2,94	4	2	7	3,15	3,86	3,28

Se ha escogido de ejemplo la interpolación realizada para la primera fecha interpolada; el 1 de enero de 2019 a las 00:00:00, donde se registró una temperatura de $X1=2,94^{\circ}\text{C}$ [1].

Partiendo de la **Tabla 22**, con la función POSICIÓN se sitúa la casilla X1, que está comprendido entre 2 y 7°C . Por lo tanto, según se ha explicado anteriormente, la función redondea el valor de 2,94 al menor número del intervalo y resulta que estaría en la posición del $X0=2$, lo que significa que está en la POSICIÓN 4 de la tabla, empezando a contar de izquierda a derecha.

Tras ello, se hallan las posiciones de los límites inferior y superior con la misma función que antes y para obtener los valores $X0=2$ y $X2=7$ se utiliza la función INDICE. Ya se tienen todos los valores de temperaturas necesarios para realizar la interpolación, ahora queda obtener los valores de los COPS.

A continuación, al saber que hay que partir de la POSICIÓN 4; que es la temperatura donde se sitúa el COP que se está buscando, se hallan las posiciones de nuevo de los límites inferior y superior; Y0 y Y2 respectivamente, del COP.

Finalmente, se calcula el COP por medio de la interpolación de los resultados obtenidos, que despejando la variable Y1 se resume en aplicar la **Ecuación 6**, obteniendo que el COP a las 00:00:00 del 1 de enero para una temperatura de $2,94^{\circ}\text{C}$ es de 3,28.

Para el resto de los valores horarios solo habría que arrastrar las celdas y por último, los consumos eléctricos se calcularán en las tablas de Excel aplicando las **Ecuaciones 2, 4 y 5**, explicadas en el **apartado 3.5**.