

Trabajo Fin de Máster

Título del trabajo:

Análisis y estimación de los recursos necesarios para una descarbonización de la economía en la biorregión Cantábrico-Mediterránea

English title:

Analysis and estimation of the resources needed to decarbonise the economy in the Cantabrian-Mediterranean Bioregion

Autor/es

Javier Felipe Andreu

Director/es

Antonio Valero Capilla

Titulación del autor

Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Escuela de ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza
2021

Resumen

Análisis y estimación de los recursos necesarios para una descarbonización de la economía en la biorregión Cantábrico-Mediterránea

La Biorregión Cantábrico-Mediterránea, es un espacio geográfico natural que cuenta con recursos suficientes para constituir una unidad de resiliencia que aborde, con una visión global a medio y largo plazo, los retos que plantea la adaptación a la emergencia climática, así como la planificación de un desarrollo equilibrado armónico y sostenible. Actualmente, la biorregión tiene un consumo final de energía de 37.322 ktep proveniente principalmente de combustibles fósiles (47,59% productos petrolíferos, 24,75% energía eléctrica, 20,1% gas natural, 5,81% energías renovables de uso directo, 1,02% calor útil y 0,48% carbón), siendo Cataluña y Valencia, con un 38% y un 23% respectivamente, las comunidades con mayor consumo. Por ello el principal objetivo de este trabajo es analizar y estimar los recursos necesarios para la descarbonización de la economía de la biorregión, debido a la necesidad de reducir las emisiones de efecto invernadero para garantizar su sostenibilidad reduciendo su huella ecológica.

La primera parte de este trabajo consta de un estudio de la situación actual de la biorregión desagregado por autonomías, fuentes de energía y sectores económicos, esta situación actual sirve como referencia para establecer la estimación de las futuras demandas en los escenarios a 2030 y 2050. El escenario a 2030 se ha formulado según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), mientras que para el escenario a 2050 se han estimado las demandas finales de una economía con emisiones netas cero, para ello se ha realizado una transformación de las fuentes de energía de cada sector económico siguiendo las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), la Comisión Europea y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). La segunda parte consiste en un cálculo de la potencia eléctrica necesaria para los escenarios de 2030 y 2050, teniendo en cuenta la disminución de la potencia disponible de fuentes convencionales y la previsión del aumento de la demanda eléctrica. Se ha planteado un escenario de autosuficiencia energética en los balances de energía eléctrica de cada autonomía y un sistema eléctrico 100% renovable en 2050, estimando también sus costes. En la tercera parte se han analizado las posibles limitaciones en el uso de fuentes renovables como biogás, eólica, fotovoltaica en cubiertas y materiales críticos necesarios.

Se prevé una disminución de la demanda final de hasta un 26% en el año 2050, principalmente gracias a la mayor eficiencia obtenida a través de la electrificación, que podría suponer un 70% de la demanda final. Una reducción insuficiente para alcanzar un consumo sostenible que requeriría una disminución del 60% de la demanda final, por lo que se proponen medidas sectoriales adicionales para alcanzarlo. La potencia renovable necesaria en la biorregión para 2030 sería de 46,8 GW principalmente eólica y fotovoltaica. Y para 2050 de 162 GW con necesidades de almacenamiento de 23,46 TWh y 16,2 GW. Los costes de un sistema eléctrico 100% renovable estarían entre 52,78 €/MWh y 90,13 €/MWh, inferiores al sistema eléctrico actual. La producción de biogás renovable tendría un déficit de 5.311 ktep para satisfacer al sector industrial y al sector eléctrico. El recurso eólico de Cataluña, País Vasco, Baleares y Comunidad Valenciana podría no ser suficiente para satisfacer sus demandas con el desarrollo actual de la tecnología, las cubiertas podrían permitir la instalación de más de la mitad de la fotovoltaica necesaria y el uso intensivo de materiales puede suponer una demanda de 1.255.702 toneladas de materiales considerados en riesgo alto y medio de suministro.

Índice

Resumen.....	3
Índice.....	5
1 Introducción.....	6
2 Necesidades energéticas en la biorregión.....	8
2.1 Escenario para 2030 según PNIEC.....	10
2.2 Escenario cero emisiones para 2050.....	10
2.2.1 Electrificación del transporte.....	10
2.2.2 Industria cero emisiones.....	11
2.2.3 Electrificación sectores residencial y servicios.....	12
2.2.4 Sector primario.....	12
2.3 Resumen de previsión de consumos.....	12
3 Análisis de la producción eléctrica en la Biorregión.....	13
3.1 Estimación de la variación de potencia para el escenario 2030.....	14
3.2 Estimación de la potencia necesaria en la biorregión para 2050.....	16
3.3 Estimación de los costes de un sistema eléctrico 100% renovable.....	19
4 Limitaciones.....	19
4.1 Biogás.....	19
4.2 Eólica.....	20
4.3 Solar Fotovoltaica.....	21
4.4 Materiales críticos necesarios.....	21
5 Conclusiones.....	22
5.1 Perspectivas.....	24
6 Bibliografía.....	25
7 Agradecimientos.....	29
Lista de tablas.....	29
Lista de figuras.....	29
Anexo.....	30
Una aproximación a la sostenibilidad energética y social de la BCM.....	85

1 Introducción

La biorregión Cantábrico-Mediterránea (BCM), referido como biorregión a lo largo de la memoria, se compone de las comunidades autónomas de Cantabria, País Vasco, La Rioja, Navarra, Aragón, Cataluña, Comunidad Valenciana e Islas Baleares. La biorregión es un espacio geográfico natural que cuenta con recursos suficientes para constituir una unidad de resiliencia que aborde, con una visión global a medio y largo plazo, los retos que plantea la adaptación a la emergencia climática, así como la planificación de un desarrollo equilibrado armónico y sostenible [1]. Los objetivos de los promotores de la biorregión son acordar valores fundamentales que promuevan la dignidad humana, el respeto por la naturaleza y la protección de los bienes comunes más allá de las generaciones actuales. Ello se conseguirá promoviendo la concordia entre las comunidades del ecosistema con objeto de reducir su huella ecológica conjunta, planteando estructuras organizativas adaptadas al entorno ecológico, económico y social del territorio y manteniendo la cohesión y concordia de sus habitantes [2]. Este trabajo surge con la necesidad de reducir las emisiones de efecto invernadero en la biorregión para garantizar su sostenibilidad disminuyendo su huella ecológica [3], por ello, se centra en las fuentes de energía para cubrir la demanda final y conseguir así su descarbonización, principalmente mediante la electrificación, planteando futuros escenarios para los años 2030 y 2050.

Como base de referencia desde la que partir para plantear futuros escenarios en la biorregión, se ha realizado un estudio de los consumos energéticos de cada comunidad autónoma tomando como año de referencia el año 2018, [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], además de “el libro de la energía” [11], los informe del IDAE [12], [13] y los datos de Red Eléctrica [14]. En este análisis se han desagregado los consumos por autonomía, fuente de energía y sector de la economía, diferenciando entre industria, transporte terrestre, primario, residencial y servicios. Dicho estudio se muestra con mejor detalle en el Anexo.

El escenario de 2030 se ha planteado según se formula en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, (PNIEC) [15], donde se han tenido en cuenta la reducción de la potencia instalada de centrales nucleares, cogeneración y fuel gas, junto con el aumento de la demanda de energía eléctrica y sus previsiones de exportación. Ante una situación de disminución de la generación eléctrica proveniente de centrales térmicas convencionales, y aumento de la demanda, surge la necesidad de instalación de fuentes de potencia renovable para satisfacer el desajuste energético en la biorregión. En esta memoria se plantea un escenario de autosuficiencia energética en los balances de energía de cada comunidad autónoma, calculando así la potencia renovable a instalar por autonomía. En el Anexo se muestran de forma detallada los consumos previstos para 2030 por autonomía y fuente de energía, el estado actual del parque de generación, la variación de potencia prevista para el año 2030, incluyendo también los balances energéticos de las autonomías de la biorregión, en escenarios de autosuficiencia energética y de dependencia energética sin implantación de renovables.

En el escenario de 2050 se busca una economía con emisiones netas cero, para ello se ha realizado una transformación de las fuentes de energía de cada sector económico, siguiendo las previsiones de la Comisión Europea, [16], [17], la agencia internacional de la energía, (IEA) [18], la estrategia de descarbonización a largo plazo 2050 del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, (MITECO), [19], [20], así como informes para transformaciones

sectoriales [21], [22]. Las transformaciones calculadas en los diferentes sectores son las siguientes:

- Sector transporte. Se han calculado los consumos actuales por modo de transporte, comparándolos con una electrificación íntegra del transporte terrestre, tanto de carretera, como ferroviario que no ha sido electrificado. Además, se ha calculado la previsión del aumento de actividad de cada modo de transporte para 2050 para obtener así una estimación de los consumos eléctricos para dicho escenario. En el Anexo se detallan los cálculos realizados, además del análisis de diferentes escenarios, tanto de movilidad compartida, como de drástica disminución del consumo.
- Sector industrial. Se ha calculado con las previsiones de la Comisión Europea respecto al cambio de fuente de energía, crecimiento de los subsectores y aumento de la eficiencia, obteniendo la previsión de los consumos estimados para el año 2050 por autonomía. En el Anexo se expone el estado del arte de la literatura para la descarbonización de la industria, se explica con más detalle las diferentes previsiones de la Comisión Europea, la Agencia Internacional de la Energía y el MITECO, realizando una comparación entre ambas y detallando los consumos finales.
- Sector residencial y servicios. Se ha estimado la evolución del consumo electrificando sus fuentes de energía, teniendo en cuenta las previsiones de crecimiento del sector servicios y del aumento poblacional por parte de la Comisión Europea, y la estacionalidad de dichos consumos. Los cálculos más detallados se muestran en el Anexo.
- Sector primario. Se han considerado sus consumos estables, por su bajo peso, su mayor necesidad de cambio modal y las previsiones de la literatura.
- También se muestran otros dos posibles escenarios con una reducción de la demanda final, un escenario eficiente aplicando principios de mejora de la eficiencia en los procesos, manteniendo la actividad en todos los sectores. Y un escenario sostenible, con una mayor concienciación por parte de la población, donde además de una mejora en la eficiencia, se plantean cambios en el modo de funcionamiento de dichos sectores, aplicando procesos circulares junto con cambios de hábitos de consumo y uso de los productos por parte del consumidor, dichas medidas se muestran en el Anexo.

Ante el gran aumento previsible de la demanda eléctrica para el escenario de 2050, este trabajo se ha centrado en analizar la potencia renovable y de almacenamiento necesaria a instalar para poder conseguir un sistema eléctrico 100% renovable. Se han comparado los diferentes estudios que existen en la actualidad que abordan el caso de un sistema eléctrico español 100% renovable, [16], [23], [24], para realizar una estimación de la potencia renovable y de almacenamiento necesarias en la biorregión mediante un balance de energía mensual en el que se busca satisfacer la demanda con una sobreproducción de electricidad. Con estos datos se han estimado los costes para dicho sistema, y las posibles burbujas en la instalación de plantas de energía renovable que se están formando actualmente. En el Anexo se exponen los requerimientos para un sistema eléctrico 100% renovable, el estado del arte en la literatura y los cálculos detallados para realizar la simulación y costes.

En este trabajo también se analizan las limitaciones técnicas y de recurso renovable de la energía eólica, de la producción potencial de biogás como sustitutivo al gas natural y el uso de fotovoltaica en las cubiertas de los edificios. En el Anexo aparecen los datos más detallados, así

como mapas donde se representa a escala la superficie necesaria de cada fuente renovable por autonomía, y un escenario de veto a la eólica para 2030 y 2050 en algunas regiones. Otro limitante podrían ser los materiales necesarios para realizar esta transición energética, con especial atención a los materiales catalogados como críticos en riesgo medio y alto de suministro, realizando una estimación de las toneladas necesarias en un escenario tendencial y un escenario optimista en el uso de recursos, en el Anexo se muestra de forma detallada los materiales necesarios por tipo de tecnología.

Finalmente se exponen las conclusiones de este trabajo, entre las que destacan la tendencia a la electrificación y disminución del consumo final por su mayor eficiencia, aunque no sería suficiente para alcanzar un consumo sostenible. La necesidad de establecer una correcta planificación de la potencia renovable a instalar y una adecuada ordenación del territorio para evitar burbujas especulativas, permitir un correcto desarrollo de la biorregión y evitar también el rechazo en la población a estas fuentes de energía. El coste de un sistema 100% renovable sería más barato que el sistema convencional. La existencia de limitaciones en la producción de biogás en la biorregión; y de recurso eólico en algunas comunidades, aunque existiría un recurso suficiente en el total de la biorregión. Y finalmente la importancia de establecer una economía circular vinculada a la recuperación y reutilización de materiales críticos.

Adicionalmente en el Anexo se incluyen propuestas sectoriales para la reducción de la demanda final de energía, y conseguir así un consumo sostenible en la biorregión, mostrando un escenario tendencial usado para los cálculos de esta memoria, un escenario de menor consumo debido a la mejora de la eficiencia en los procesos, y un escenario sostenible donde se calculan todas las medidas propuestas. Finalmente, se expone con el título “Una aproximación a la sostenibilidad energética y social de la BCM” un borrador de declaración realizada a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, que sirve como base para la Fundación Foros de la Concordia para impulsar el progreso sostenible y solidario dentro de la biorregión.

2 Necesidades energéticas en la biorregión

Para conocer las demandas energéticas de cada comunidad dentro de la biorregión, se ha procedido a analizar los informes de balances energéticos que realizan las comunidades autónomas. En Aragón se han recopilado los datos del boletín de coyuntura energética [4], en las Islas Baleares se ha usado el balance energético que publica anualmente el Govern [5], para Cataluña el balance energético de Cataluña publicado en una serie histórica desde 1990 [6], para Valencia se ha usado el informe sobre los datos energéticos de la Comunidad [7], para el País Vasco se ha usado el informe anual [8] y los datos disponibles en el portal EUSTAT [9], para Navarra el informe del 2018 del Balance Energético de Navarra [10]. Se ha elegido el año 2018 por disponibilidad de datos tanto a nivel estatal como de comunidades, teniendo como fuentes de datos “el libro de la energía” [11], los informe del IDAE [12], [13] y los datos de Red Eléctrica [14].

Para las comunidades autónomas de Cantabria y La Rioja, al no disponer de ningún informe se ha procedido a estimar el consumo según su aportación al PIB nacional [25], debido a la relación existente entre el aumento del consumo de energía y el aumento del PIB [26], [27]. Por lo tanto, la energía primaria y final se han multiplicado por el peso de cada comunidad dentro del PIB para obtener el consumo total aproximado de la comunidad. El consumo eléctrico para Cantabria y La Rioja se han obtenido gracias al informe del sistema eléctrico español 2018 [14]

y los datos desagregados por comunidad relativos a producción y demanda en barras de central [28], gracias a estos datos, se han obtenido el resto de los consumos hasta el total calculado para la comunidad, respetando la central de incineración de residuos de Cantabria y el bajo consumo de carbón en La Rioja.

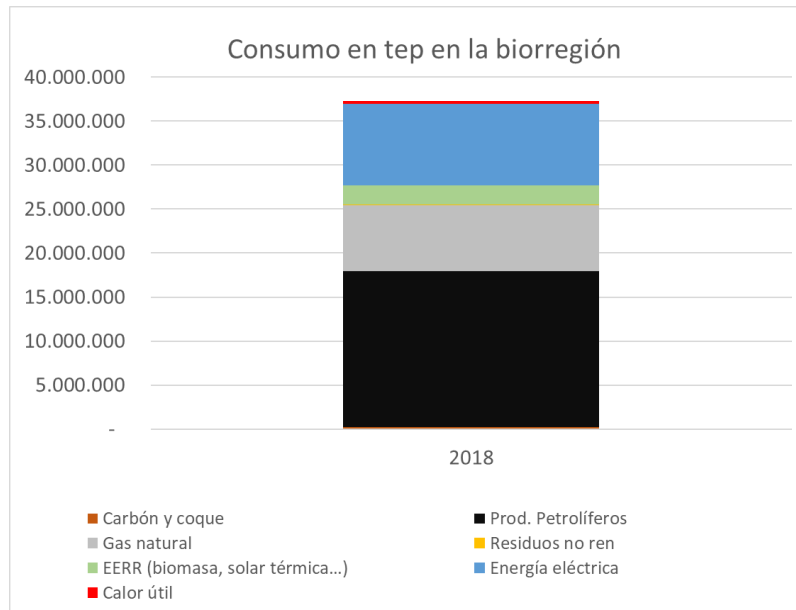


Fig. 1 Consumo en tep en la biorregión

Como se ve en la Fig. 1, en la biorregión el consumo final es de 37.322 ktep, con un 68,2% proveniente de combustibles fósiles emisores de gases de efecto invernadero. El peso por comunidad autónoma dentro del consumo final se muestra en la Fig. 2, con las comunidades de Cataluña y C. Valenciana representando el 60% del consumo final de la biorregión:

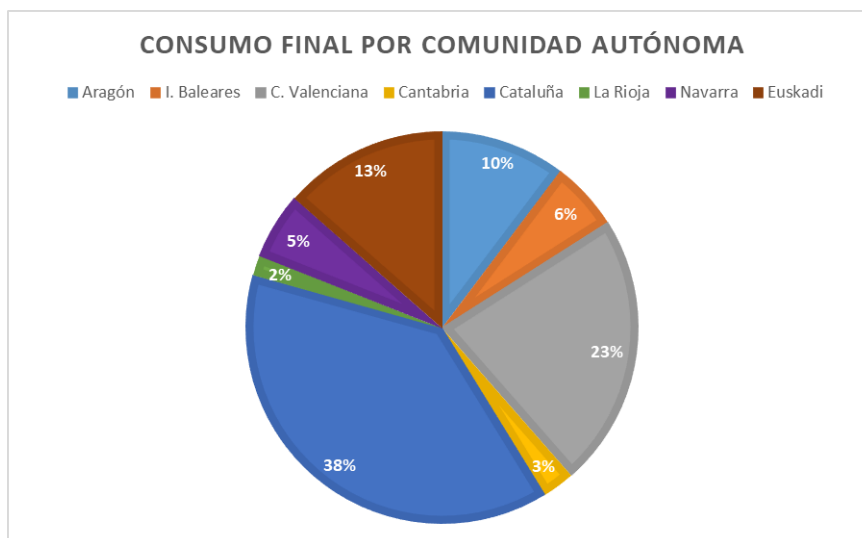


Fig. 2 Consumos finales en la biorregión por comunidad autónoma

En los resultados desagregados por Comunidades mostrados en el Anexo, llama la atención el alto consumo de productos petrolíferos respecto a su consumo final de las islas baleares, así como el elevado consumo de energía eléctrica respecto a su consumo final en comunidades importadoras de energía eléctrica como Cataluña, Cantabria, Valencia o País Vasco. Entre las comunidades destaca el papel de las energías renovables en forma de biomasa y solar térmica en Aragón, representando el mayor porcentaje dentro del consumo final, principalmente gracias

al sector industrial. Los consumos energéticos representados en el Anexo son los usados como referencia para el resto de los escenarios.

2.1 Escenario para 2030 según PNIEC

Se han estimado las necesidades finales de energía para el año 2030 utilizando la evolución del uso de las fuentes de energía estimada en el PNIEC [15], desde el año de referencia de 2018 hasta el año 2030. El cambio porcentual por fuente de energía entre ambos años se ha aplicado a cada autonomía, para obtener así el balance energético en el año 2030 por comunidad autónoma. Estos cálculos han tenido en cuenta casos particulares de fuentes de energía de cada comunidad autónoma como se indica en el Anexo.

2.2 Escenario cero emisiones para 2050

Para el año 2050 se ha realizado una estimación de consumos finales en una economía con cero emisiones, analizando diferentes informes especializados para determinar los cambios tecnológicos que permitan esa transición, y la transformación de la demanda. Entre los informes analizados está el informe de la Agencia Internacional de la Energía [18], las previsiones de la Comisión Europea [16], [17], el informe realizado por el MITECO para una economía descarbonizada [19], [20], así como informes para transformaciones sectoriales [21], [22].

2.2.1 Electrificación del transporte

Debido al impulso por parte de las autoridades que está recibiendo el vehículo eléctrico, y por su bajada de precios y competitividad, se ha estimado que los vehículos eléctricos dominarán el mercado del vehículo de pasajeros y de los vehículos ligeros comerciales. Respecto al transporte de mercancías existe disconformidad respecto a qué tecnología será la predominante, existen estudios que apuestan por la tecnología eléctrica, otros por pilas de combustible con hidrógeno y otros por el gas natural [22]. Según el informe de la IEA para el 2030 el desarrollo de baterías con densidades de 400 Wh/kg permitirá la electrificación del transporte de larga distancia por carretera, representando ya unas ventas del 25% de camiones electrificados en dicho año [18]. En otros estudios donde buscaban encontrar el modo de transporte con el menor coste asociado determinan la electrificación en el transporte por carretera como la solución a menor coste [29], [30]. En el caso de aviación según la IEA, la densidad necesaria en las baterías para ser competitivas está en 650 Wh/kg, desarrollo al que se espera llegar para 2040. En este trabajo se ha considerado la total electrificación del transporte por carretera y el uso de otros combustibles como hidrógeno, o combustibles sintéticos provenientes de biomasa para el transporte aéreo o marítimo [18].

Para estimar el consumo por modo de transporte se han usado los datos proporcionados por el Ministerio de transporte Movilidad y agenda Urbana [31], que diferencia entre transporte por carretera, ferrocarril y marítimo. Los porcentajes de consumo según el tipo de transporte que proporciona el informe sintético del IDAE [12], el parque de vehículos proporcionado por la DGT [32], y la estadística ofrecida por las ITV respecto a los km recorridos anualmente por cada modo de transporte [33]. Obteniendo así el consumo medio individual de cada medio de transporte. Este consumo es el que se ha transformado por equivalentes eléctricos realizando un promedio entre cada constructor y sector, para obtener la media del sustituto eléctrico. En esta transformación del consumo también se ha considerado una eficiencia de carga del 85,5%. Además, se han tenido en cuenta los informes de la Comisión Europea y el modelo europeo PRIMES, asumiendo las proyecciones aumento de la actividad para los diferentes modos de

transporte facilitados en un documento de datos, tanto en km recorridos (energía), como en vehículos [34]. También se ha estimado el consumo ferroviario con la electrificación de las líneas diésel existentes según un informe de ElecRail [35] y las proyecciones de crecimiento de la Comisión Europea, los resultados se muestran en la Fig. 3, donde se puede observar una reducción del consumo final del 54%. En el Anexo se muestra una información más detallada, además de escenarios de movilidad compartida y disminución drástica del consumo.

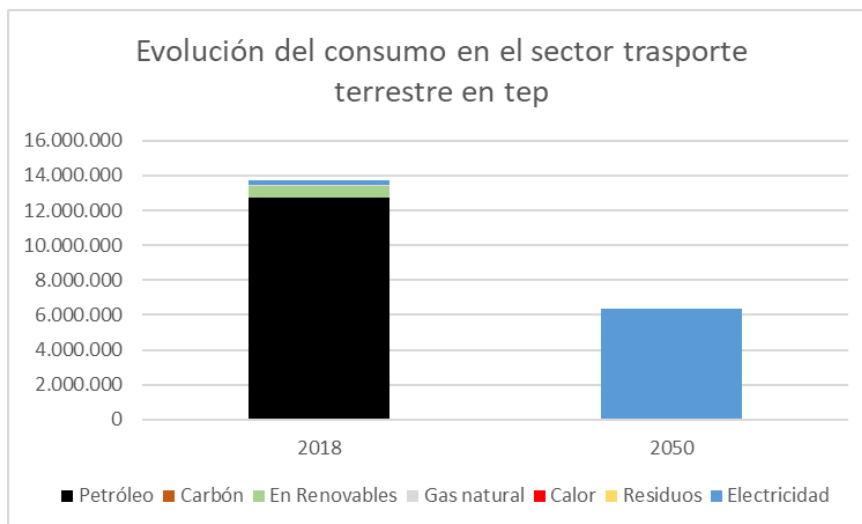


Fig. 3 Evolución del consumo en el sector transporte en tep

2.2.2 Industria cero emisiones

La solución planteada por la industria europea, ante la situación previsible de reducir los derechos de emisión en los próximos años para frenar el calentamiento global, está centrándose en el aumento de la eficiencia, la captura de CO2 y compensación de las emisiones de CO2 [36]. Debido a que no existe una uniformidad clara en las tecnologías a usar para descarbonizar la industria realizando unos cálculos propios, y que sería un estudio superior al alcance de este trabajo, se han usado las estimaciones de la Comisión Europea mediante su modelo PRIMES [16], sobre las futuras demandas en 2050 en una economía con cero emisiones, estas previsiones se han comparado con las de la Agencia Internacional de la Energía [18] y el MITECO [19], como se puede comprobar en el Anexo. Debido a que los consumos que toma la Comisión Europea como referencia por fuente de energía coinciden con los de la industria en la biorregión, se han considerado las mismas transformaciones en las fuentes de energía.

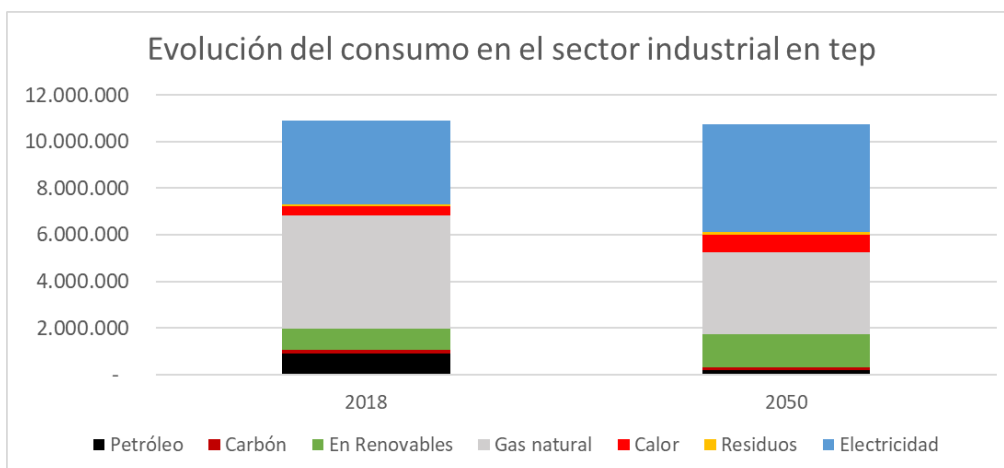


Fig. 4 Evolución del consumo industrial en tep

También se ha considerado la evolución de la demanda en los sectores por su crecimiento, y el aumento de la eficiencia que propone la Comisión Europea específicamente para el caso de España, obteniendo una reducción del consumo de un 2%. La comparación entre 2018 y 2050 se muestra en la Fig. 4. Para una información más detallada consultar el Anexo.

2.2.3 Electrificación sectores residencial y servicios

Teniendo en cuenta las previsiones de electrificación del MITECO [19], junto a las predicciones del consumo de la Comisión Europea para el caso específico de España, se ha estimado la evolución del consumo electrificando sus fuentes de energía. Para ello se ha desagregado los consumos presentados por el IDAE y el MITECO por uso y fuente en ambos sectores [37], electrificando tanto calefacción, como agua caliente sanitaria (reducción del consumo en un 80%) y el uso de cocinas de inducción (reducción del consumo en un 50%). El consumo residencial se ha estimado de forma lineal al crecimiento poblacional, un 5% entre 2018 y 2050 según la Comisión Europea. El crecimiento del PIB para el mismo periodo de tiempo, se espera que sea de un 68,8%, para estimar el consumo final, se ha optado por un valor de elasticidad de la renta de 0,2 [21] según la siguiente ecuación:

$$DemandaFutura = DemandaActual + (Elasticidad * DemandaActual * CrecPIB)$$

Obteniendo la evolución de la demanda final en ambos sectores, el sector residencial tendría una disminución de su demanda final de un 33% y el sector servicios un aumento del 3%, como se muestra en la Fig. 5:

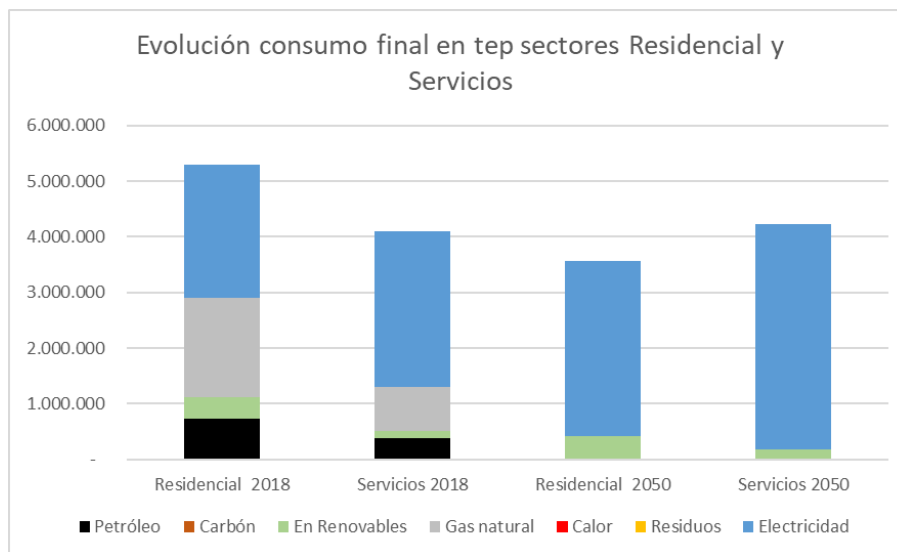


Fig. 5 Evolución del consumo sectores residencial y servicios en tep

2.2.4 Sector primario

Debido a la dificultad de poder desagregar los consumos dentro del sector primario, el bajo peso de este dentro de los consumos energéticos de la biorregión donde sólo representan el 4%, la mayor necesidad de su cambio modal para reducir sus emisiones como propone el MITECO y a que la Comisión Europea estima que la reducción del consumo gracias a la eficiencia se ve compensada por el crecimiento del sector, se han considerado los mismos consumos para este sector para el año 2050 que los reflejados actualmente en la Biorregión.

2.3 Resumen de previsión de consumos

Recopilando los resultados de los anteriores apartados se obtiene la evolución del consumo en la biorregión hasta 2050 como se muestra en la Fig. 6:

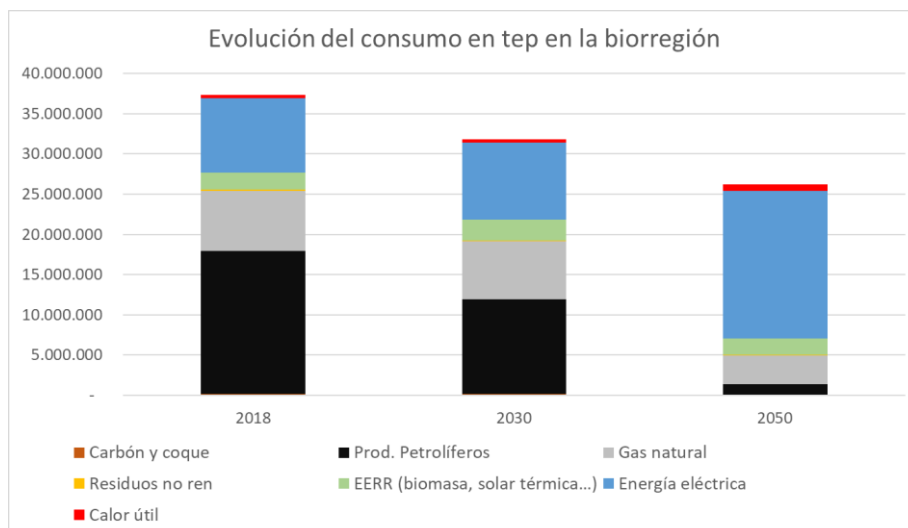


Fig. 6 Evolución del consumo final en tep en la biorregión

En esta comparación se puede ver la tendencia a la descarbonización mediante el menor uso de combustibles fósiles, a cambio de aumentar la electrificación y energías renovables de uso directo como la térmica y la biomasa, de esta forma la demanda final disminuye en un 26% en el año 2050, suponiendo un consumo per cápita de 55,47 GJ, insuficiente para llegar al margen de consumos per cápita sostenibles entre 15,8 y 31 GJ estimados para garantizar un nivel de vida decente limitando el calentamiento global a 1,5 °C sin hacer uso de tecnologías de emisión negativa [38]. En el Anexo se plantean escenarios con las medidas necesarias para disminuir el consumo hasta dichos márgenes, en la Fig. 7 se muestra el resumen de estos, donde sólo se considera el transporte terrestre en el sector transporte.

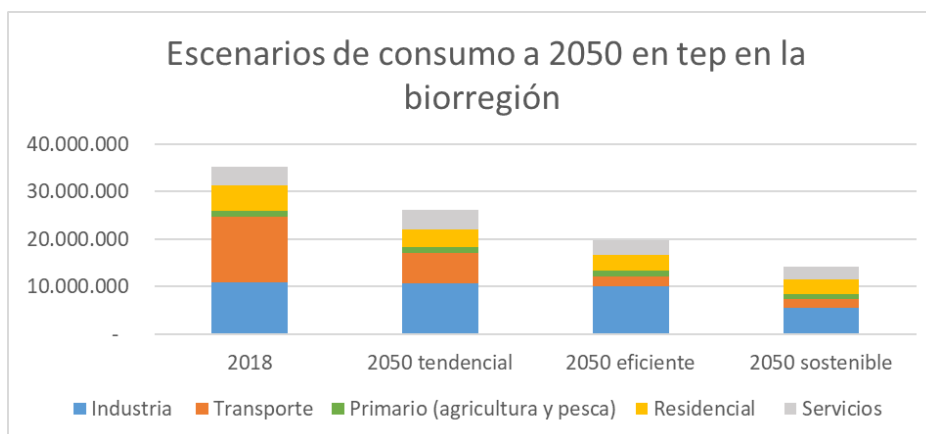


Fig. 7 Escenarios de consumo en 2050 en tep en la biorregión

Este trabajo se ha centrado en los recursos para abastecer estas demandas finales, prestando mayor atención al sector eléctrico y las necesidades de energías renovables para cubrir la demanda, con la opción de usar biogás en vez de gas natural, y biomasa en vez de productos petrolíferos.

3 Análisis de la producción eléctrica en la Biorregión

Se ha analizado la producción energética actual en la biorregión para calcular las potencias a instalar en los futuros escenarios de 2030 y 2050, teniendo en cuenta la progresiva desinstalación de plantas convencionales que recoge el PNIEC. En este trabajo se plantea una

autosuficiencia energética de las comunidades para conseguir una transición justa, evitando el desequilibrio entre la España vaciada y la España llena, tanto para 2030 como para 2050, y consiguiendo un sistema más robusto ya que una generación renovable distribuida es más estable que una concentrada en un mismo punto. Las potencias instaladas, generación de electricidad y demandas actuales se han tomado del informe de Red Eléctrica de España (REE), [39]. En la siguiente Fig. 8 se muestra el balance de energía por comunidad autónoma en la actualidad, las comunidades autónomas con mayor porcentaje de generación renovable sobre su generación son exportadoras netas de electricidad (Aragón, Navarra y La Rioja), siendo el resto importadoras de electricidad, con un déficit en la biorregión de 15,87 GWh en 2019.

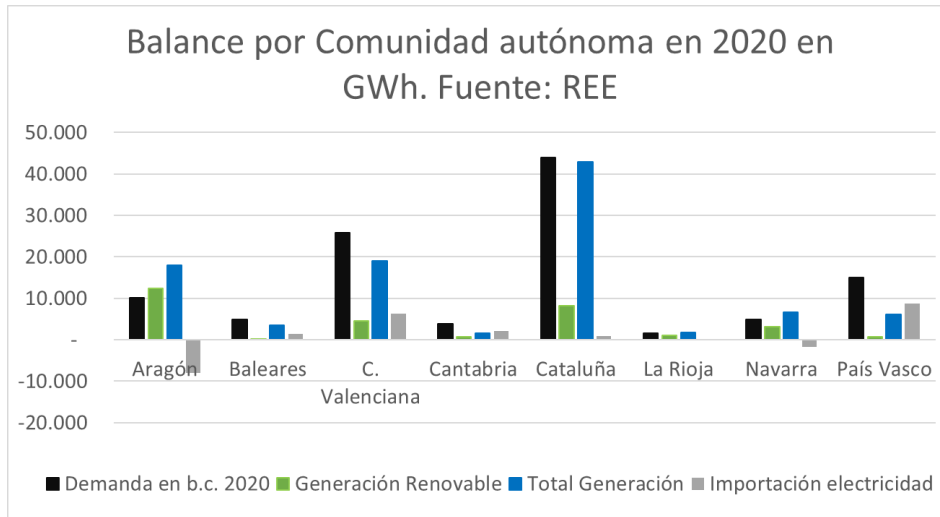


Fig. 8 Balance energético por comunidad autónoma en 2020 en GWh

3.1 Estimación de la variación de potencia para el escenario 2030

Incorporando las previsiones de reducción de potencia de centrales de cogeneración, carbón, fuel/gas y nucleares recogidas en el PNIEC, además del aumento de la demanda eléctrica y la previsión de exportación de energía eléctrica recogida en el PNIEC (se ha calculado con un porcentaje igual a la generación de la biorregión), se han estimado la variación de potencia por comunidad autónoma necesaria, para que cada comunidad sea capaz de autoabastecerse y exportar energía eléctrica en forma proporcional a su demanda.

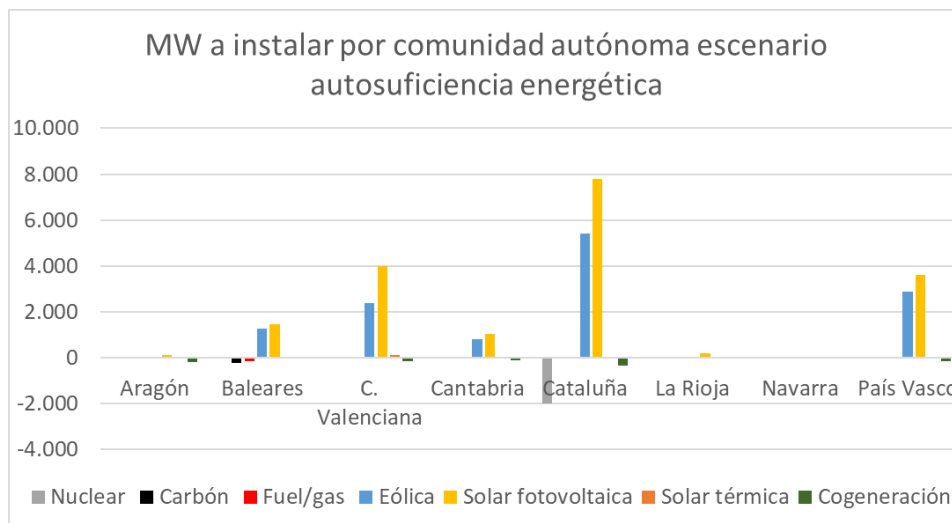


Fig. 9 Potencia en MW a instalar por fuente y comunidad autónoma escenario autoabastecimiento y exportación de energía

En la Fig. 9 se muestran los MW a instalar para conseguir dicho escenario, donde se puede observar la necesidad de instalación de potencia renovable en Baleares, Comunidad Valenciana, Cantabria, Cataluña y País Vasco para cumplir los objetivos del PNIEC y conseguir una autosuficiencia energética.

Para realizar el cálculo se ha utilizado un promedio entre las horas de trabajo obtenidas en el informe REE, el atlas eólico [40] y el portal PVGIS [41], para las diferentes tecnologías. Con esta nueva potencia instalada el balance por comunidad autónoma quedaría como muestra la Fig. 10, donde se puede ver que todas las comunidades exportan energía para cumplir el objetivo del PNIEC.

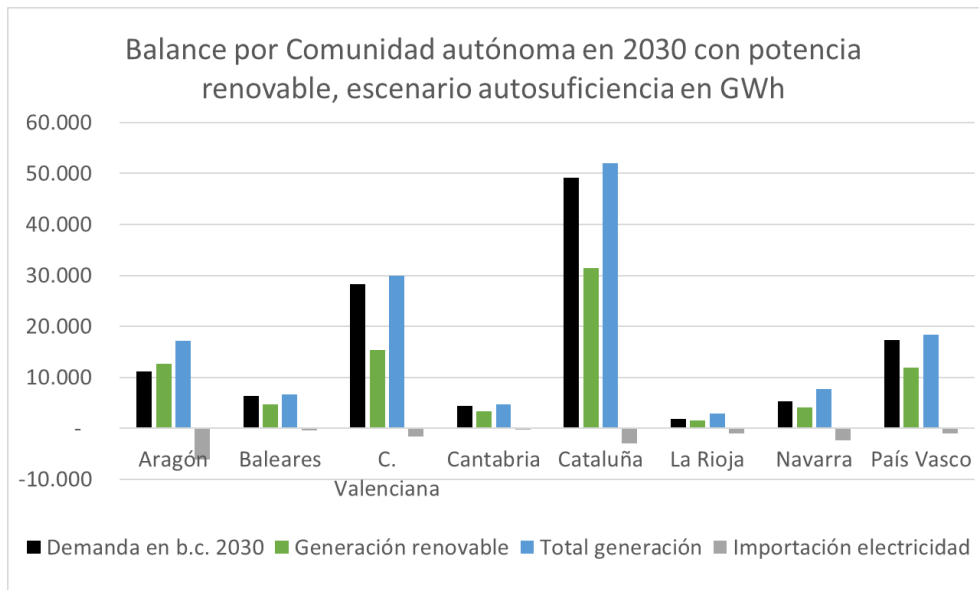


Fig. 10 Balance por comunidad autónoma con potencia renovable en GWh, escenario de autosuficiencia

Se han obtenido los GW eólicos terrestres potenciales instalables en cada comunidad respetando zonas protegidas, desde el atlas eólico [40], donde se consideró el potencial eólico instalable en España para vientos superiores a 6 m/s y una capacidad del terreno de 4 MW/km², este sería un valor conservador, siendo el recurso potencial posiblemente mayor por el desarrollo de la tecnología. Se puede observar en la Fig. 11 que en todas las comunidades autónomas se podría instalar la eólica planificada en 2030 sin requerir de instalaciones marinas:

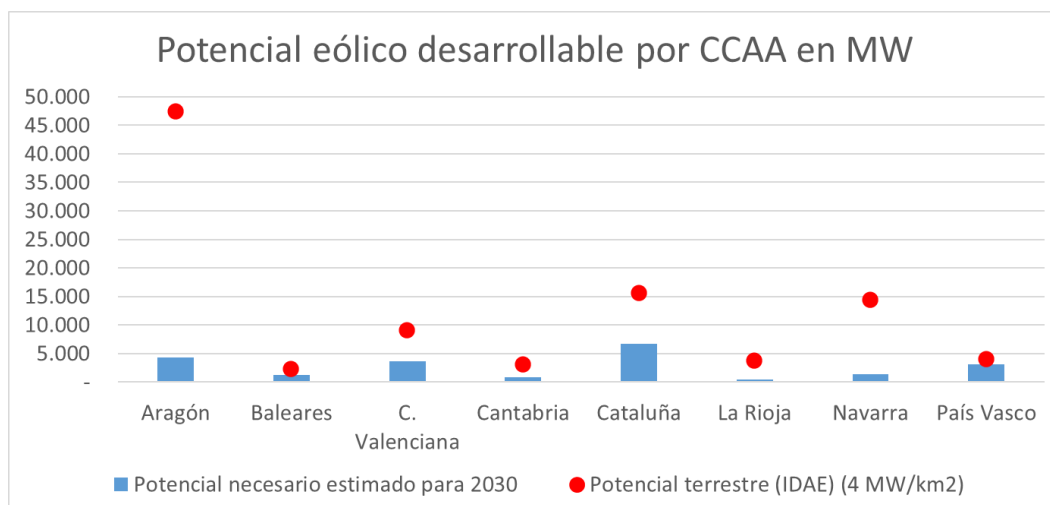


Fig. 11 Potencial eólico desarrollable por CCAA en MW vs necesario en 2030

3.2 Estimación de la potencia necesaria en la biorregión para 2050

Existen diversos estudios en todo el mundo que evalúan las necesidades para conseguir un sistema eléctrico 100% renovable, aprovechando principalmente los recursos disponibles en cada región, en Islandia por ejemplo el uso de los recursos geotérmicos les ha permitido estar más cerca de alcanzar el sistema eléctrico 100% renovable [42], en el norte de Europa, el uso de eólica y biomasa es mayor [43], [44], o en zonas con un buen recurso hídrico la hidráulica es la más conveniente [45], en la mayoría de los estudios recalcan que sistemas eléctricos 100% renovables conseguirían obtener precios más bajos que con los actuales combustibles fósiles. Además, para conseguir un sistema 100% renovable se necesitan unos requisitos de disponibilidad de recurso, almacenamiento, estabilidad de red etc. En el Anexo se muestran los requisitos para alcanzar un sistema eléctrico 100% renovable.

Como referencia para estimar la potencia necesaria a instalar de las diferentes fuentes de energía, se ha utilizado el estudio de Jacobson [23], Michael Child [24] y la Comisión Europea [16] donde ya se han simulado sistemas eléctricos 100% renovables, con ejemplos particulares para el caso de España. Debido a la existencia de estas simulaciones ya realizadas, se han usado como referencia las necesidades de potencia renovable y almacenamiento en proporción a cada GWh de demanda para obtener un sistema eléctrico 100% renovable. Las demandas eléctricas estimadas para 2050 se han calculado en el apartado 2, en la siguiente Fig. 12 se muestran desagregadas por autonomía y sector.

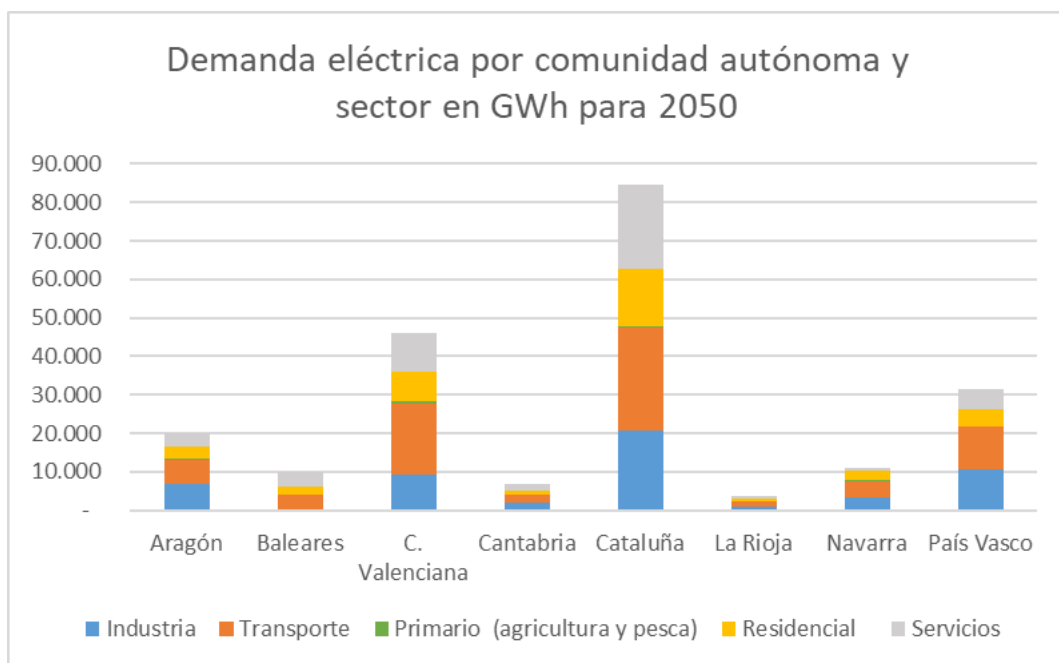


Fig. 12 Demanda eléctrica por comunidad autónoma y sector en GWh para 2050

Debido a la baja potencia hidráulica en la biorregión en comparación con el resto de España, es necesario un apoyo de energía térmica y solar térmica para tener un porcentaje mínimo de energía gestionable. Además, esta carencia se cubre también con el almacenamiento y una mayor sobreproducción de energía, en concordancia también a la estrategia de exportación de energía eléctrica por parte del estado español, en la Fig. 13 se muestra los porcentajes de generación del sistema para la biorregión en comparación con los estudios mencionados.

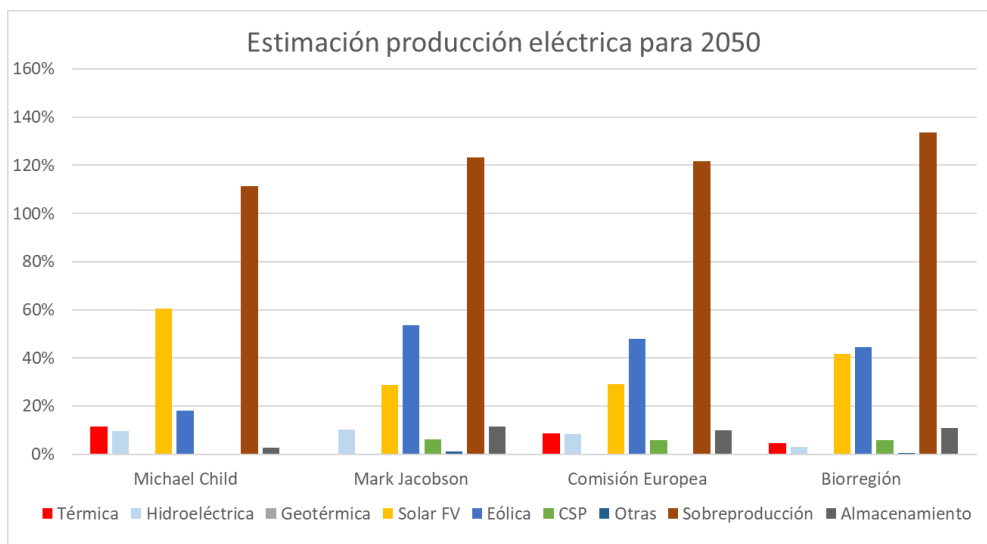


Fig. 13 Porcentajes de producción sobre la demanda final

Las necesidades de almacenamiento en la biorregión se han estimado como un 11% de la potencia renovable instalada, debido a la existencia de interconexiones. En un escenario de aislamiento peninsular, sería necesario una potencia de almacenamiento superior, de hasta un 18% sobre la potencia renovable instalada [46].

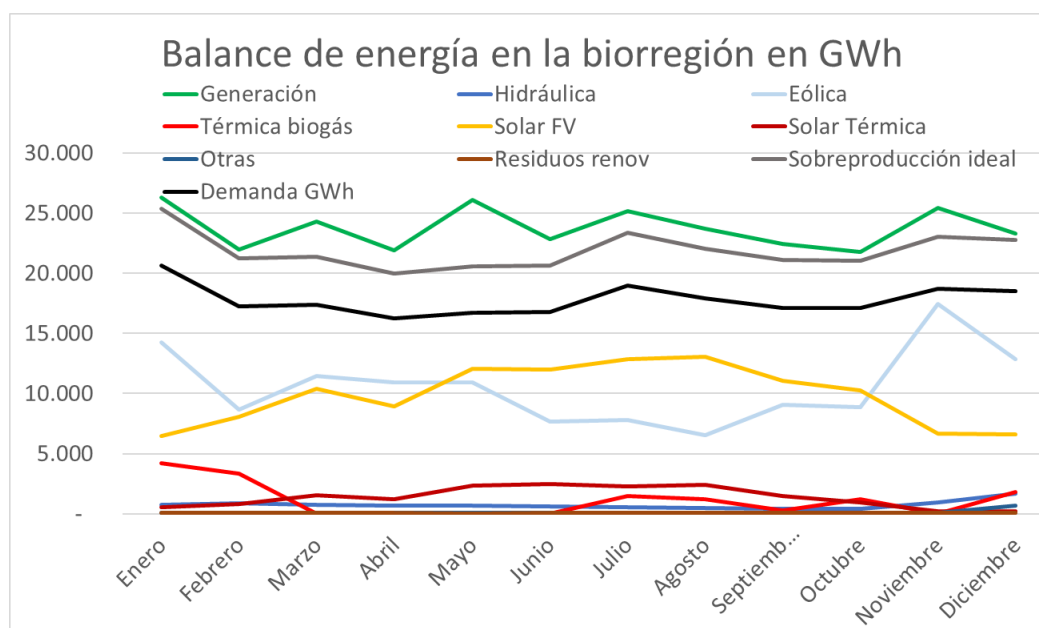


Fig. 14 Balance de energía en la biorregión en GWh

Para el almacenamiento eléctrico en un escenario interconectado, son necesarios 16,22 GW de potencia y 23,46 TWh de capacidad. Sólo se ha considerado la posibilidad de instalar nueva potencia renovable de eólica, fotovoltaica, solar térmica y térmica de origen renovable, debido a la madurez de estas tecnologías. En la Fig. 14 se muestra el balance de energía, donde la línea negra indica la demanda final, y la línea gris la demanda final multiplicada por 1,23 de sobreproducción ideal, siguiendo esta última línea como referencia ideal para la generación renovable total (en verde), la sobreproducción final anual es de un 33,66%, y mensualmente es siempre superior a un 23%.

En la Fig. 15 se muestra la estimación de la potencia a instalar en la biorregión y su evolución temporal, se considera que en el año 2050 la térmica instalada es a base de fuentes renovables como biomasa o biogás.

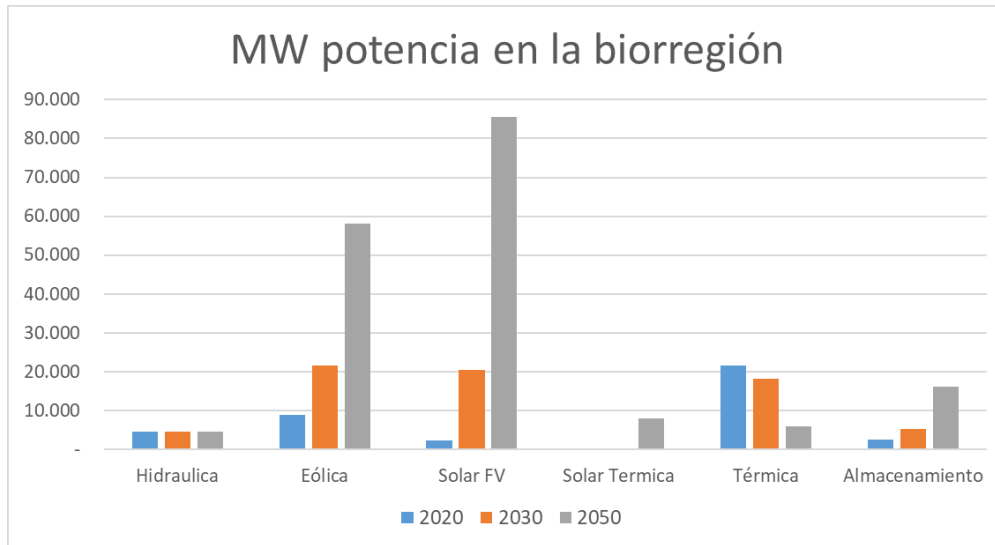


Fig. 15 Estimación de la evolución temporal de la potencia renovable en la biorregión en MW

Realizando una estimación de la potencia anual a instalar de forma lineal en toda la biorregión, se ha calculado que, en los años 2020 y 2030, debe ser de 1.280 MW eólicos y 1.818 MW fotovoltaicos. Y entre los años 2030 y 2050, 1.831 MW eólicos y 3.255 MW fotovoltaicos, ver Fig. 16.

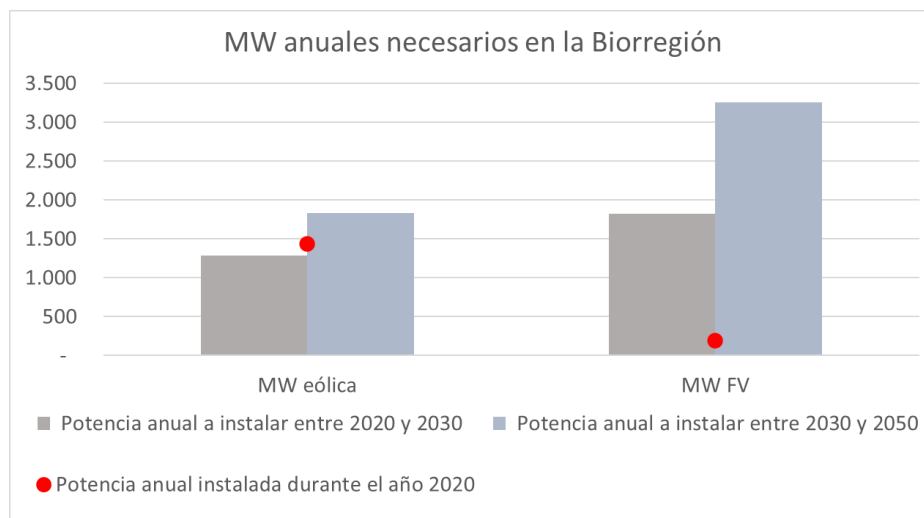


Fig. 16 Potencia anual instalada durante el año 2020 vs potencia anual a instalar entre 2020 y 2030; y entre 2030 y 2050

Se puede observar que existe una sobre instalación de potencia eólica durante el año 2020 en la comunidad de Aragón que aglutina el 81% de la potencia eólica instalada, 1.164MW, y defecto de solar fotovoltaica en ese mismo año. Esta distribución de la potencia instalada de forma asimétrica puede conllevar problemas de robustez en un futuro sistema eléctrico de potencia, además de crear burbujas especulativas y un rechazo de la población a algunas energías renovables, por lo que es necesaria una correcta planificación y ordenación del territorio para evitar este tipo de problemas.

3.3 Estimación de los costes de un sistema eléctrico 100% renovable

Se ha asumido un sistema de producción estable durante todo el año, para disminuir las necesidades de almacenamiento, como esta simulación se ha hecho con valores mensuales y no horarios, no se ha podido estimar el coste horario del almacenamiento de energía, pero sí de las capacidades estimadas a instalar, sumándose al coste total del sistema. El coste de capacidad de almacenamiento durante el periodo analizado se estima de 12.07 €/kWh de forma hidroeléctrica con 32,5 años de vida útil, y de 51,73 €/kWh en baterías con 17 años de vida útil, tal y como se realiza en el estudio de Jacobson [46]. El hidrógeno no se ha considerado por su baja eficiencia y alto coste actual frente a otras tecnologías. Entre los almacenamientos analizados para capacidad eléctrica, el hidroeléctrico resulta más interesante a gran escala por coste y valor añadido a la agricultura y trabajo local, aunque es muy previsible que se desarrolle un almacenamiento mediante baterías a pequeña escala por parte de los consumidores productores. Los costes nivelados de producción eléctrica se han obtenido del informe IRENA [47], realizando una extrapolación del coste para los siguientes años, para el coste de la energía de los años 2020 a 2030 se ha usado la media de cada tecnología en la extrapolación de dichos años, y lo mismo para el periodo entre 2030 y 2050. Esta proyección se ha considerado como los costes optimistas, el rango superior de los costes, o costes pesimistas, se ha estimado con el estudio de Michael Child [24]. Para la solución propuesta del año 2050, se busca que la energía renovable supere la demanda en al menos un 33% durante el año, de esta forma se obtendría un coste de la energía renovable de entre 21,58 €/MWh a 49,28 €/MWh, junto al coste de almacenamiento, considerando sólo hidráulico, se obtendría un valor final de la energía entre 52,78 €/MWh a 90,13 €/MWh. En caso de valorar que el almacenamiento estuviese distribuido en forma de baterías domésticas y coches eléctricos, o aprovechando la segunda vida de estos coches eléctricos [48], estos precios podrían ser inferiores.

4 Limitaciones

Se han tenido en cuenta las limitaciones existentes de las diferentes fuentes renovables dentro de la biorregión, para estimar las necesidades de espacio y recurso de cada región.

4.1 Biogás

Una de las opciones es la sustitución del gas natural por biogás, de esta forma se tendría un sistema con fuentes 100% renovables y con un impacto no solo de carbono neutro, como se plantea en las referencias analizadas, si no de carbono negativo al seguir teniendo los consumos eléctricos de la captura de CO₂ en las plantas que usen este combustible. En un estudio realizado por el IDAE, situación y potencial de generación de biogás en el año 2011 [49], se estima un potencial de producción de biogás de 860,7 ktep al año en la biorregión. Producción insuficiente, ya que según las previsiones para el año 2050, la industria por si sola necesitaría 3.581 ktep al año y en la producción eléctrica se necesitarían otros 1.943 ktep, si las centrales térmicas son de biogás. En la Fig. 17 se muestra la limitación de forma gráfica. Un posible complemento energético podría ser el hidrógeno como fuente de energía térmica en la industria para abastecer la energía no alcanzada mediante el biogás, o el uso de otras bioenergías. Por otra parte, desde la hoja de ruta del Biogás elaborada recientemente por el MITECO [50] y en el PNIEC [15] se plantea una producción de biogás de 895,1 ktep, para 2030, por lo que los límites

expuestos en el IDAE podrían haber aumentado considerablemente, o se esperan otras formas de producción de biogás no analizadas anteriormente.

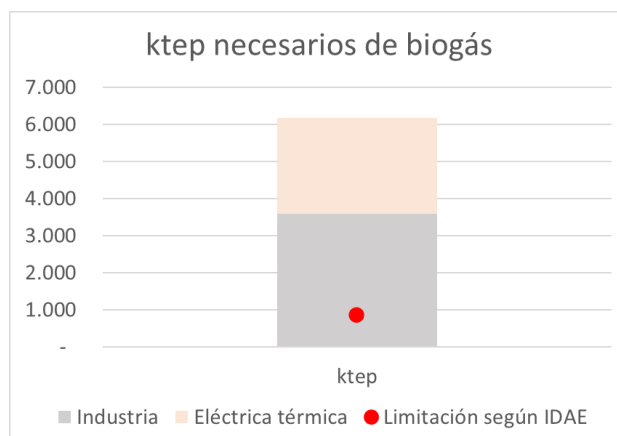


Fig. 17 ktep necesarios de biogás como sustitutivo al gas natural

4.2 Eólica

En la Fig. 18, en azul se representa el potencial eólico existente en la actualidad. En naranja, el nuevo potencial que sería necesario entre 2020 y 2030, para que cada comunidad autónoma sea energéticamente independiente y se produzca el exceso de energía recogido en el PNIEC. En gris se representa el nuevo potencial necesario entre los años 2030 y 2050, para conseguir una economía descarbonizada con regiones autoabastecidas. El punto rojo claro representa el límite teórico en cada comunidad autónoma considerando un aprovechamiento eólico de 4 MW/km² con un recurso eólico superior a 6 m/s (IDAE) tal y como recoge el atlas eólico, este aprovechamiento puede considerarse conservador, pero es similar al utilizado en la tecnología actual. El punto rojo oscuro recoge un aprovechamiento eólico superior, de 7,36 MW/km² calculado en una media de trabajos realizados en Europa [51], este valor se ha considerado como un escenario optimista de aprovechamiento del recurso.

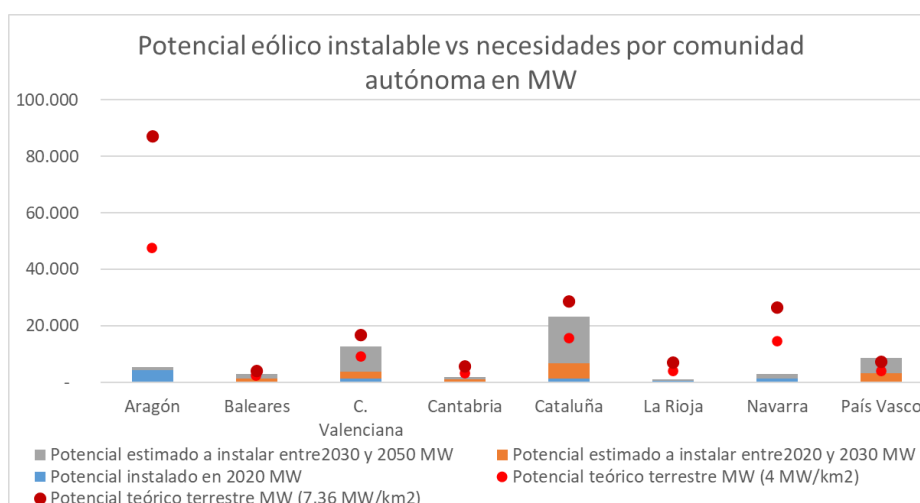


Fig. 18 Superficie de plantas eólicas teniendo en cuenta la capacidad de cada comunidad

No se han considerado grandes cambios disruptivos, aunque es posible que la tecnología aumente su potencial aprovechable, estos cálculos se han realizado como estimación de posibles limitaciones. Debido a que las comunidades autónomas de Valencia, Cataluña, Baleares y País Vasco no dispondrían de superficie terrestre suficiente con recurso eólico superior a 6 m/s, sería necesaria su instalación en otras comunidades autónomas, o en el mar. Por el gran

potencial eólico de Aragón y Navarra respecto a su demanda, todo indica que serán estas las comunidades que albergarán la producción de energía para las más demandantes, como se muestra en el apartado de veto a la eólica del Anexo. Si la tecnología permitiese un mejor aprovechamiento del espacio, sólo el País Vasco seguiría necesitando importar energía o desarrollar eólica marina. La superficie total necesaria con un aprovechamiento de 4 MW/km² sería de 14.542 km², extensión similar a la suma de La Rioja y Navarra, si el aprovechamiento fuese de 7,36 MW/km² la superficie necesaria sería de 7.903 km², similar a la superficie del País Vasco. En el Anexo se muestran los escenarios ante un mejor aprovechamiento eólico y mapas de la biorregión con la superficie de eólica necesaria en cada autonomía.

4.3 Solar Fotovoltaica

Desde el Observatorio Sostenibilidad se ha estimado que el área disponible en cubiertas de edificios es de 176.026 ha, desagregándola por comunidades autónomas en su estudio de 1 millón de tejados solares en 2025 [52]. Este valor es similar al obtenido por Katalin Bódis en su estudio realizado para toda Europa [53]. Desde el Observatorio Sostenibilidad también estiman el potencial fotovoltaico instalable con valores de 59,1 W/m², valor conservador para el estado actual de la tecnología. En este estudio se van a tomar 2 aproximaciones, escenario pesimista con 59,1 W/m² instalables en cubiertas y escenario optimista, con 120 W/m² instalables en cubiertas, sobre el espacio calculado por el Observatorio Sostenibilidad. De esta forma se obtendría para la Biorregión un total de 81.958 MW instalables en un escenario optimista y 40.358 MW instalables en un escenario pesimista frente a los 85.445 MW de potencia fotovoltaica necesaria calculada.

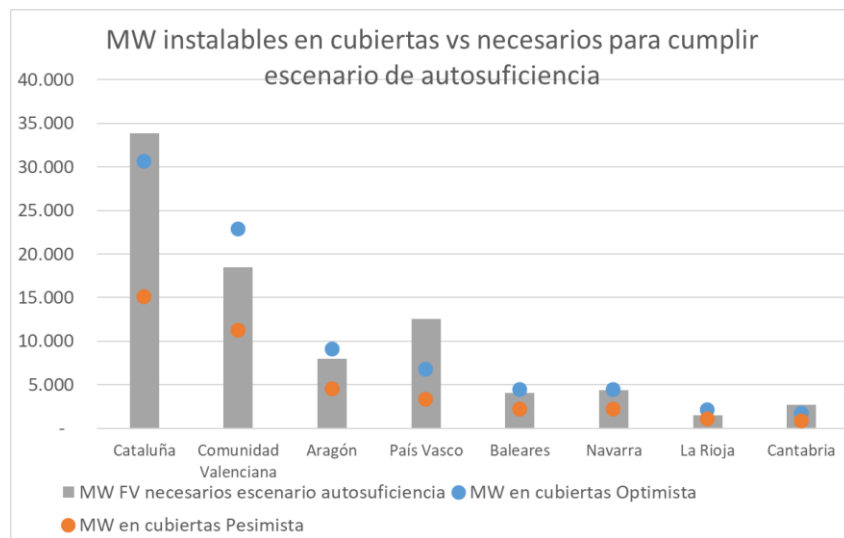


Fig. 19 MW instalables en cubiertas vs necesarios

En la Fig. 19 se representa la potencia fotovoltaica necesaria por comunidad autónoma en gris, junto a las potencias instalables en cubiertas en escenarios optimistas en azul y pesimistas en naranja, mostrando el alto potencial en el aprovechamiento de las cubiertas, que disminuirían los requerimientos de superficie necesaria en la instalación de fuentes renovables. También se puede observar como las autonomías de Cataluña, País Vasco y Cantabria no cubrirían su potencia renovable a instalar en cubiertas ni en un escenario optimista.

4.4 Materiales críticos necesarios

Otro factor limitante para una descarbonización de la economía mediante la transición energética calculada es la posible escasez de materiales críticos considerados en riesgo alto y

medio de suministro. Por ello se ha realizado una estimación de las necesidades de estos materiales críticos en la biorregión para el año 2050. Se ha tomado como referencia el informe del Joint Research Centre, para la demanda de materiales necesarios en energía eólica y energía fotovoltaica basada en silicio cristalino [54], junto con el estudio realizado por Alicia Valero [55] para energía eólica, solar térmica y movilidad eléctrica. Se han considerado dos escenarios, uno que representa el Business As Usual (BAU), utilizando un rango medio de uso de materiales en dichas referencias. Y un escenario optimista, utilizando los valores más optimistas en la demanda de materiales para las tecnologías renovables, junto con un escenario de movilidad compartida, para reducir los consumos finales de materiales en el sector transporte, recogiendo los resultados del CSIC [56], [57]. Los resultados se muestran en la Tabla 1, comparándolos con la producción y reservas mundiales obtenidas del U.S. Geological Survey [58]. En la parte de movilidad sólo se tienen en cuenta los materiales necesarios de turismos por disponibilidad de datos, por lo que la demanda será seguramente mayor. Para una información más detallada consultar el Anexo.

Tabla 1 Materiales críticos necesarios en una economía descarbonizada, producción y reservas mundiales en toneladas

Etiquetas de fila	Suma de toneladas BAU	Suma de Toneladas optimista	Producción mundial (2020) en toneladas	Reservas mundiales en toneladas
Ag	1.322	170	25.000	500.000
Co	151	30	140.000	7.100.000
Cr	201.610	67.177	40.000.000	570.000.000
Cu	576.299	536.147	45.000.000	870.000.000
Dy	1.062	551	-	-
Ga	16	3	300	-
In	5	1	900	-
Li	120	24	82.000	21.000.000
Mn	124.874	62.139	18.500.000	1.300.000.000
Mo	6.970	6.931	300.000	18.000.000
Nd	15.926	7.429	-	-
Ni	7.279	6.620	2.500.000	94.000.000
Ta	153	30	1.700	140.000
Zn	319.916	319.916	12.000.000	250.000.000
Total general	1.255.702	1.007.169		

Para descarbonizar la economía de la biorregión sería necesaria un 10% de la producción mundial durante un año de materiales como tántalo, plata y galio, sólo para cubrir las demandas de la biorregión.

5 Conclusiones

Tras analizar las tendencias que se esperan en los diversos sectores de la economía y en sus fuentes de energía, se han estimado los consumos finales y los recursos necesarios para los años 2030 y 2050, en ambos se reduce el consumo en la demanda final gracias a la electrificación sin reducir la actividad.

Para el año 2030 según el PNIEC, se disminuye el consumo final de energía en un 14%, gracias principalmente a la electrificación del transporte terrestre. Para cubrir la esperada disminución de potencia de centrales convencionales en el sistema eléctrico, la biorregión necesitaría una potencia renovable de 12,8 GW eólicos y 18,1 GW fotovoltaicos. En un escenario de autosuficiencia todas las comunidades autónomas tendrían recursos eólicos y fotovoltaicos suficientes para cubrir sus demandas.

Para el escenario planteado a 2050 se obtendría una reducción en el consumo final de un 26%, disminuyendo en todos los sectores menos en el sector servicios que aumenta un 2% debido a su previsible aumento de actividad. La tendencia en todos los sectores tiende hacia la electrificación, que representa un 70% de la demanda final.

El consumo final per cápita calculado en el año 2050 es de 55,47 GJ en un escenario tendencial, muy lejos del rango de 15,8 – 31 GJ per cápita estimados para garantizar un nivel de vida decente limitando el calentamiento global a 1,5 °C sin hacer uso de tecnologías de emisión negativa [38]. Este escenario necesitaría una reducción del consumo final del 60% respecto al actual, por lo que son necesarios mayores cambios en todos los sectores, un resumen de estos sería, 1) el uso de tecnologías más eficientes ligadas a una reducción de las necesidades de consumo, 2) fomento de las infraestructuras públicas ferroviarias y de movilidad personal no contaminante, 3) cambio en los hábitos de consumo y uso en la población gracias a una mayor concienciación e incentivación, 4) aumentar el gravamen de los productos con alta huella ecológica, incentivando productos duraderos, reparables y reutilizables, 5) autosuficiencia, disminución de la dependencia exterior, con un cambio modal hacia procesos circulares, 6) autoabastecimiento energético localizando la producción de energía junto a su consumo y 7) la regeneración de ecosistemas y suelos.

Se han estimado también los costes de la electricidad en un escenario 100% renovable en 2050, en un rango entre 52,78 €/MWh y 90,13 €/MWh, muy por debajo de los precios actuales con combustibles fósiles. Las necesidades de almacenamiento de energía representarían 23,46 TWh de capacidad y 16,22 GW de potencia, estas necesidades podrían combinarse con el almacenamiento de agua, para paliar el efecto negativo del calentamiento global en la disminución de precipitaciones que vendrán de forma torrencial. Las necesidades de potencia renovable serían de 162 GW, repartidos entre 4,47 GW hidráulicos, 58,17 GW eólicos, 85,44 GW fotovoltaicos, 7,8 GW solares térmicos, 6 GW de térmicos renovables y 0,29 GW de otras.

Ante el previsible fuerte aumento de instalación de renovables en la biorregión, y el alto requerimiento de espacio en la tecnología eólica, es necesaria una adecuada planificación y ordenación del territorio. Para primero evitar caer en burbujas especulativas alimentadas por la emergencia climática, que puedan generar una opinión negativa a las energías renovables, como puede estar sucediendo en Aragón. Segundo, conseguir un sistema robusto y resiliente con generación renovable distribuida. Y tercero, para una transición justa evitando desequilibrios entre regiones. Por lo que se propone una instalación de potencia renovable en concordancia con la demanda energética de cada región, buscando en la medida de lo posible un autoabastecimiento.

Entre las posibles limitaciones a una economía descarbonizada, está el potencial de producción de biogás en la biorregión, no suficiente para satisfacer las demandas industriales y del sector eléctrico, según los cálculos realizados por el IDAE en el 2011 con un déficit de 5.311 ktep, lo que indica la necesidad de desarrollar una industria productora de bioenergía e hidrógeno para satisfacer dichas demandas. Otra posible limitación es la falta de recurso eólico terrestre para las demandas de 2050 en las comunidades autónomas de País Vasco, Cataluña, Comunidad Valenciana y Baleares, y previsiblemente, aunque la tecnología mejore y permita un mejor aprovechamiento del recurso, la comunidad autónoma del País Vasco necesitará desarrollar una eólica marina o importar energía eléctrica. Aunque siguiendo la tendencia actual de instalación eólica y el gran potencial eólico de las comunidades autónomas de Aragón y Navarra, todo indica que estas albergarán un potencial eólico muy superior al de sus demandas energéticas, surgiendo la pregunta de si deberían de ser compensadas, como por ejemplo, mediante incentivos como la reducción de los precios de la energía en la industria para su relocalización al punto de producción energética, y evitar consecuentemente la pérdida de población. Por otra

parte, la energía fotovoltaica necesitaría muy poco espacio no urbanizado ya que todas las comunidades autónomas excepto Cantabria, País Vasco y Cataluña, podrían satisfacer más de la mitad de su demanda eléctrica, sólo aprovechando las cubiertas de sus edificios mediante un autoconsumo.

Para la transición a una economía descarbonizada serán necesarios materiales clasificados en riesgo alto y medio de suministro como plata, cobalto, cromo, cobre, disprosio, galio, indio, litio, manganeso, molibdeno, neodimio, níquel, tántalo y zinc. ¿Habrá suficientes materiales a los precios actuales para copar toda la demanda?, ¿Será necesario desarrollar una economía circular vinculada a la recuperación de los materiales empleados? Son preguntas abiertas a las que no tenemos respuesta.

Ante la gran extensión de terreno a ocupar por la eólica, superficie similar a la extensión de Navarra y La Rioja juntas, las limitaciones de producción de biogás y los requerimientos de materiales críticos, que podrían no satisfacer las demandas, resulta imprescindible la reducción de los consumos energéticos para poder conseguir una descarbonización de la economía.

5.1 Perspectivas

Entre las dificultades a la hora de desarrollar este trabajo ha estado la recolección de datos, por la falta de estos, en algunos casos falta de coherencia entre ellos, falta de estandarización entre los diferentes informes y la no contestación de algunos organismos oficiales.

Como futuros trabajos a desarrollar:

- Análisis de un equilibrio entre las autonomías pertenecientes a la biorregión, para alcanzar una mínima huella ecológica individual que mediante pequeñas compensaciones garantice una huella ecológica unitaria colectiva. La otra perspectiva que evitar serían regiones subdesarrolladas compensando la huella ecológica de regiones desarrolladas.
- Ordenación y planificación en las regiones según las demandas y producciones energéticas, analizando la necesidad y viabilidad de desplazamiento industrial del consumidor de energía a la producción de energía.
- Profundizar en el desarrollo de una economía circular y la pérdida de eficiencia en la recuperación de materiales en cada ciclo, analizar también la huella ecológica de las materias primas importadas.
- Profundizar en la estimación de los materiales necesarios en todos los sectores, ya que sólo se han calculado las necesidades en las potencias renovables a instalar y en la movilidad eléctrica en turismos, quedando todo el sector servicios, residencial, industrial y parte del sector transporte por estimar.
- Profundizar en la descarbonización a través del hidrógeno renovable, principalmente en la industria, transporte aéreo y marítimo, estimando cómo aumentarían las demandas de electricidad para su producción.

6 Bibliografía

- [1] Grupo Aragonés del Capítulo Español del Club de Roma, «<https://www.clubderoma-aragon.org/>,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.clubderoma-aragon.org/eventos/reunion-22-de-septiembre-biorregion-cantabrico-mediterranea/>. [Último acceso: 10 julio 2021].
- [2] Fundación Foros de la Concordia, «www.bioebro.org,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.bioebro.org/la-biorregion/>. [Último acceso: 25 8 2021].
- [3] A. Valero y J. Torrubia, « Libro Blanco de la Biorregión Cantábrico-Mediterránea. Cap 4. Fundación Foros de la Concordia y Capitulo Español del Club de Roma,» 2020.
- [4] Gobierno de Aragón, Departamento de Industria, Competitividad y Desarrollo Empresarial, «Boletín de Coyuntura Energética en Aragón 2018,» Gobierno de Aragón, 2019.
- [5] Govern Illes Balears, «http://www.caib.es,» 2021. [En línea]. Available: http://www.caib.es/sites/energia/ca/publicacions_estadistiques_i_preus_de_lenergia-7491/. [Último acceso: 6 julio 2021].
- [6] Generalitat de Catalunya, Institut Català d'Energia, «http://icaen.gencat.cat,» 2021. [En línea]. Available: http://icaen.gencat.cat/es/energia/estadistiques/resultats/anuals/balanc_energetic/. [Último acceso: 6 julio 2021].
- [7] Generalitat Valenciana consellería de Economía Sostenible, Sectores Productivos, Comercio y Trabajo, Ivace energía, «Datos energéticos de la Comunitat Valenciana,» Generalitat Valenciana, Ivace energía, 2019.
- [8] Área de Estudios y Planificación, «EUSKADI ENERGÍA 2018, Datos energéticos,» Ente Vasco de la Energía, Bilbao, 2020.
- [9] Departamento de Desarrollo económico, Sostenibilidad y Medio ambiente. Datos energéticos de la C.A. de Euskadi, «https://www.eustat.eus,» 2021. [En línea]. Available: https://www.eustat.eus/estadisticas/tema_552/opt_1/tipo_1/ti_datos-energeticos-de-la-c-a/temas.html#el. [Último acceso: 6 julio 2021].
- [10] Gobierno de Navarra, «Balance Energético de Navarra,» Gobierno de Navarra, 2018.
- [11] MITECO, «La energía en España 2018,» MITECO, Secretaría de estado de energía, Madrid, 2020.
- [12] IDAE, «Informe sintético de indicadores de eficiencia energética en España. Año 2018,» Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, Madrid, 2020.
- [13] MITECO, IDAE, «<http://sieeweb.idae.es/consumofinal/>,» 2021. [En línea]. Available: <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/>. [Último acceso: 6 Julio 2021].
- [14] Red Eléctrica de España, «El sistema eléctrico español 2018,» RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, Madrid, 2019.

- [15] MITECO, IDAE, «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima,» MITECO, Madrid, 2020.
- [16] European Commission, «EU Reference Scenario 2020, Energy, transport and GHG emissions - Trends 2050,» European Commission, Brussels, 2021.
- [17] European Commission, «EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050,» European Commission, Brussels, 2016.
- [18] International Energy Agency, «Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector,» IEA, Paris, 2021.
- [19] MITECO, «Estrategia de descarbonización a largo plazo 2050. Estrategia a largo plazo para una economía española, moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050,» MITECO, Madrid, 2020.
- [20] MITECO, «ESTRATEGIA A LARGO PLAZO PARA UNA ECONOMÍA ESPAÑOLA MODERNA, COMPETITIVA Y CLIMÁTICAMENTE NEUTRA EN 2050. ANEXOS.,» MITECO, Madrid, 2020.
- [21] economics for energy, «Escenarios para el sector energético en España 2030-2050,» economics for energy, Vigo, 2017.
- [22] economics for energy, «Estrategias para la descarbonización del transporte terrestre en España, Un análisis de escenarios,» economics for energy, Vigo, 2020.
- [23] M. Z. Jacobson, M. A. Delucchi, M. A. Cameron, I. P. Manogaran, Y. Shu y A.-K. v. Krauland, «Impacts of Green New Deal Energy Plans on Grid Stability, Costs, Jobs, Health, and Climate in 143 countries,» *One Earth* 1, pp. 449-463, 24 2 2019.
- [24] M. Child, C. Kemfert, D. Bogdanov y C. Breyer, «Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe,» *Renewable Energy*, nº 139, pp. 80-101, 2019.
- [25] expansion, «<https://datosmacro.expansion.com>,» 2021. [En línea]. Available: <https://datosmacro.expansion.com/pib/espana-comunidades-autonomas/cantabria>. [Último acceso: 6 julio 2021].
- [26] A. Azam, M. Rafiq, M. Shafique, H. Zhang y J. Yuan, «Analyzing the effect of natural gas, nuclear energy and renewable energy on GDP and carbon emissions: A multi-variate panel data analysis,» *Energy*, vol. 219, nº 119592, 2021.
- [27] P. KumarNarayan, S. Narayan y S. Popp, «A note on the long-run elasticities from the energy consumption–GDP relationship,» *Applied Energy*, vol. 87, nº 3, pp. 1054-1057, 2010.
- [28] Red Eléctrica de España, «<https://www.ree.es>,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/informe-anual-sistema/informe-del-sistema-electrico-espanol-2018>. [Último acceso: 6 julio 2021].
- [29] T.-V. Nguyen, J. Schnidrig y F. Maréchal, *An analysis of the impacts of green mobility strategies and technologies on different European energy systems*, Taormina, Italy: Proceedings of ECOS 2021 - The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2021.

- [30] J. Schnidrig, T.-V. Nguyen, X. Li y F. Maréchal, *A modelling framework for assessing the impact of green mobility technologies on energy systems*, Taormina, Italy: Proceedings of ECOS 2021 - The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2021.
- [31] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «<https://apps.fomento.gob.es>,» 2021. [En línea]. Available: <https://apps.fomento.gob.es/BDOTLE/visorBDpop.aspx?i=314>. [Último acceso: 14 Julio 2021].
- [32] Dirección General de Tráfico, «dgt.es,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/series-historicas/>. [Último acceso: 18 julio 2021].
- [33] Dirección General de tráfico; Ministerio del Interior, «Análisis sobre los kilómetros anotados en las ITV,» Madrid, 2018.
- [34] European Commission, «<https://ec.europa.eu>,» 2021. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en. [Último acceso: 27 Julio 2021].
- [35] A. García Álvarez y M. d. P. Martín Cañizares, «Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción,» Grupo Gestor del Proyecto ElecRail, Madrid, 2010.
- [36] S. Quale y N. A. Røkke, «Open access to world-class research facilities: The European CCS Laboratory Infrastructure, ECCSEL,» *Energy Procedia*, nº 63, pp. 8069-8096, 2014.
- [37] MITECO, IDAE, «Informe anual del consumo energético año 2019,» IDAE, Madrid, 2020.
- [38] M. Lallana, A. Almazán, A. Valero y Á. Lareo, «Assessing Energy Descent Scenarios for the Ecological Transition in Spain 2020-2030,» *sustainability*, vol. 13, 2021.
- [39] Red Eléctrica de España, «El sistema eléctrico español informe 2020, producción de energía eléctrica,» RED ELÉCTRICA ESPAÑA, Madrid, 2021.
- [40] IDAE, «Análisis del recurso. Atlas eólico de España. Estudio técnico PER 2011-2020,» Madrid, 2011.
- [41] European Commission, «<https://ec.europa.eu/>,» 2021. [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>. [Último acceso: 5 septiembre 2021].
- [42] N. Spittler, B. Davidsdottir, E. Shafiei, J. Leaver, E. I. Asgeirsson y H. Stefansson, «The role of geothermal resources in sustainable power system planning in Iceland,» *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 1081-1090, 2020.
- [43] A. D. Korberg, I. R. Skov y B. V. Mathiesen, «The role of biogas and biogas-derived fuels in a 100% renewable energy system in Denmark,» *Energy*, vol. 199, nº 117426, 2020.
- [44] K. Hansen, B. V. Mathiesen y I. R. Skov, «Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 102, pp. 1-13, 2019.

- [45] M. Doepfert y R. Castro, «Techno-economic optimization of a 100% renewable energy system in 2050 for countries with high shares of hydropower: The case of Portugal,» *Renewable Energy*, vol. 165, pp. 491-503, 2021.
- [46] M. Z. Jacobson, «The cost of grid stability with 100 % clean, renewable energy for all purposes when countries are isolated versus interconnected,» *Renewable Energy*, nº 179, pp. 1065-1075, 2021.
- [47] IRENA, «Renewable Power Generation Costs in 2019,» International Renewable Energy Agency , Abu Dhabi, 2020.
- [48] H. Engel, P. Hertzke y G. Siccardo, «Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage,» McKinsey & Company Automotive & Assembly, 2019.
- [49] IDAE, «Situación y potencial de generación de biogás,» IDAE, Madrid, 2011.
- [50] MITECO, «Hoja de ruta del biogás (borrador),» MITECO, Madrid, 2021.
- [51] P. Enevoldsen y M. Z. Jacobson, «Data investigation of installed and output power densities of onshore and offshore wind turbines worldwide,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 60, pp. 40-51, 2021.
- [52] Observatorio Sostenibilidad, «1 millón de tejados solares en 2025: energía rentable y accesible para los ciudadanos,» Madrid, 2021.
- [53] K. Bódis, I. Kougias, A. Jäger-Waldau, N. Taylor y S. Szabó, «A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, nº 109309, 2019.
- [54] S. Carrara, P. A. Dias, B. Plazzotta y C. Pavel, «Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system,» Joint Research Centre, Luxembourg, 2020.
- [55] A. Valero, A. Valero, G. Calvo y A. Ortego, «Material bottlenecks in the future development of green technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 178-200, 2018.
- [56] F. Bistaffa, C. Blum, J. Cerquides, A. Farinelli y J. Rodríguez-Aguilar, «A Computational Approach to Quantify the Benefits of Ridesharing for Policy Makers and Travellers,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, nº 22, pp. 119-130, 2021.
- [57] D. d. Jonge, F. Bistaffa y J. Levy, «A Heuristic Algorithm for Multi-Agent Vehicle Routing with Automated Negotiation,» *AAMAS*, pp. 404-412, 2021.
- [58] U.S. Geological Survey USGS, «<https://pubs.usgs.gov/>,» 2021. [En línea]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].

7 Agradecimientos

A Antonio Valero Capilla, por su incalculable ayuda, ofrecerme este reto y enseñarme la importancia de las contusiones. A Rafael Moliner Álvarez por su inestimable colaboración y ánimos durante toda la elaboración del trabajo. A los ingenieros Jorge Torrubia Torralba, Sergio Breto Asensio, Ricardo Magdalena y Martín Lallana por sus valiosos comentarios, además de todos los organismos e instituciones consultadas por su rápida respuesta a mis preguntas y compartir la información precisada. Finalmente, a la Fundación Foros de la Concordia, al Capítulo Español del Club de Roma y a ASYPS por apoyarnos en la elaboración de este trabajo.

Lista de tablas

Tabla 1 Materiales críticos necesarios en una economía descarbonizada, producción y reservas mundiales en toneladas	22
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Lista de figuras

Fig. 1 Consumo en tep en la biorregión	9
Fig. 2 Consumos finales en la biorregión por comunidad autónoma	9
Fig. 3 Evolución del consumo en el sector transporte en tep	11
Fig. 4 Evolución del consumo industrial en tep.....	11
Fig. 5 Evolución del consumo sectores residencial y servicios en tep	12
Fig. 6 Evolución del consumo final en tep en la biorregión	13
Fig. 7 Escenarios de consumo en 2050 en tep en la biorregión.....	13
Fig. 8 Balance energético por comunidad autónoma en 2020 en GWh	14
Fig. 9 Potencia en MW a instalar por fuente y comunidad autónoma escenario autoabastecimiento y exportación de energía	14
Fig. 10 Balance por comunidad autónoma con potencia renovable en GWh, escenario de autosuficiencia	15
Fig. 11 Potencial eólico desarrollable por CCAA en MW vs necesario en 2030.....	15
Fig. 12 Demanda eléctrica por comunidad autónoma y sector en GWh para 2050.....	16
Fig. 13 Porcentajes de producción sobre la demanda final	17
Fig. 14 Balance de energía en la biorregión en GWh	17
Fig. 15 Estimación de la evolución temporal de la potencia renovable en la biorregión en MW	18
Fig. 16 Potencia anual instalada durante el año 2020 vs potencia anual a instalar entre 2020 y 2030; y entre 2030 y 2050	18
Fig. 17 ktep necesarios de biogás como sustitutivo al gas natural	20
Fig. 18 Superficie de plantas eólicas teniendo en cuenta la capacidad de cada comunidad.....	20
Fig. 19 MW instalables en cubiertas vs necesarios	21