



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura**  
**Universidad Zaragoza**

Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética  
Curso académico 2020-2021

*Trabajo Fin de Máster*

# Evaluación de escenarios de descenso energético para la transición ecológica

Assessing energy descent scenarios for the ecological transition

---

Martín Lallana Santos

Tutores

Dra. Alicia Valero Delgado

Dr. Adrián Almazán Gómez

Zaragoza, junio de 2021



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**



## Agradecimientos

Este Trabajo Fin de Máster ha sido un proyecto ambicioso que ha requerido cinco intensos meses de dedicación y que no habría sido posible sin la ayuda de diversas personas. Me gustaría agradecerle a Luis González Reyes y a Ángel Lareo Fernández, junto al resto de personas que elaboraron el informe “*Escenarios de trabajo en la transición ecosocial 2020-2030*” de *Ecologistas en Acción*, por su predisposición a transmitir el conocimiento generado en ese proceso y por orientarme con la adaptación de su modelo de cálculo al análisis energético. Les agradezco a Álvaro Campos Celador y a Iñigo Capellán Pérez sus recomendaciones de referencias bibliográficas que han sido fundamentales para este trabajo. Agradezco la paciencia y la ayuda prestada por el servicio de consultas metodológicas de Eurostat, a partir de la cual pude comprender mejor las *Cuentas de los flujos físicos de la energía (PEFA)*. Le agradezco a las trabajadoras del *Centro de Documentación del Agua y del Medio Ambiente* de Zaragoza, por proporcionar un espacio cómodo y tranquilo en el que trabajar. Quiero agradecer también a Alicia Valero Delgado y a Adrián Almazán Gómez, por su confianza en la propuesta original y por su apoyo en el proceso de elaboración de este trabajo.

Me gustaría agradecerle a mis padres, pues sin su apoyo económico y confianza durante estos meses no me habría sido posible llevar a cabo esta investigación. Le agradezco a Joana, por haber estado a mi lado, mostrando apoyo y confianza, aun con las complicaciones de los tiempos pandémicos. Por último, no puedo dejar de mencionar y agradecer a todas aquellas personas con las que he trabajado en la militancia, el activismo y los movimientos sociales durante los últimos cinco años. Sin el estímulo constante de debates, reflexiones y formación política no habría llegado a la comprensión de la profundidad de la crisis ecológica que ha hecho posible este trabajo.

## Resumen

En este trabajo estableceremos el descenso en el consumo energético a nivel mundial que debe realizarse para afrontar la crisis ecológica actual. Evaluamos la desigualdad en el reparto del consumo energético y estableceremos cuál es el consumo mínimo para una vida digna. De esta forma lograremos establecer un umbral del descenso energético que sería universalizable para el conjunto de la población mundial, el cual ubicamos en un consumo anual de energía final per cápita de entre 15,6 GJ y 31,0 GJ para el año 2050. El consumo anual de energía final per cápita en promedio para Norte global se encontraba en 2017 en los 118 GJ. Posteriormente abordaremos las estrategias que son necesarias llevar a cabo para lograr estos descensos en los países del Norte global, comprendiendo la forma en la que se constituye la demanda y pasando de los enfoques basados en la eficiencia energética hacia aquellos basados en la suficiencia energética. Por último, realizamos un análisis de dos escenarios de transición ecológica en el estado español entre 2020 y 2030, Green New Deal y Decrecimiento. Adaptaremos el modelo de cálculo con el que se analizó previamente la evolución de horas de trabajo y emisiones para esos escenarios, y calcularemos las variaciones en el consumo energético. De esta forma obtenemos un consumo anual de energía final per cápita en 2030 de 44,6 GJ y 36,8 GJ para cada uno de los escenarios. Concluiremos evaluando estos resultados obtenidos con respecto al objetivo de descenso energético marcado por el umbral de consumo mínimo y consumo máximo.

**Palabras clave:** Transición ecológica, Descenso energético, Decrecimiento, Suficiencia energética

## Summary

In this work we will establish the global energy descent that must be achieved to face the current ecological crisis. We evaluate the inequality in the distribution of energy consumption and establish what is the minimum consumption for a decent living. In this way, we will be able to establish a threshold of energy descent that would be generalized for the entire world population, which we place at an annual per capita final energy consumption of between 15.6 GJ and 31.0 GJ for the year 2050. Annual per capita final energy consumption on average for Global North was 118 GJ in 2017. We then address the strategies needed to achieve these reductions in the countries of the global North, understanding how demand is constituted and moving from approaches based on energy efficiency to those based on energy sufficiency. Finally, we perform an analysis of two ecological transition scenarios in the Spanish state between 2020 and 2030, Green New Deal and Degrowth. We will adapt the calculation model with which the evolution of working hours and emissions was previously analyzed for these scenarios, and we will calculate the variations in energy consumption. In this way we obtain an annual per capita final energy consumption in 2030 of 44.6 GJ and 36.8 GJ for each of the scenarios. We will conclude by assessing these results with respect to the energy reduction target set by the minimum and maximum consumption thresholds.

**Key words:** Ecological Transition, Energy Descent, Degrowth, Energy Sufficiency

## Índice

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Razones para un descenso energético</b>	<b>4</b>
<b>2. La distribución del descenso energético</b>	<b>6</b>
<b>3. Estrategias de reducción de la demanda energética</b>	<b>9</b>
<b>4. Análisis de caso: Escenarios de transición ecológica en el estado español 2020-2030</b>	<b>11</b>
4.1. Modelo empleo-emisiones 2020-2030 Ecologistas en Acción . . . . .	11
4.1.1. Modelo de cálculo . . . . .	12
4.1.2. Escenarios y resultados principales . . . . .	13
4.1.3. Adaptación modelo de cálculo al caso de consumo energético . . . . .	14
4.2. Recopilación y adaptación de los datos de partida . . . . .	14
4.3. Resultados de consumo energético según escenarios en 2030 . . . . .	16
4.3.1. Resultados 2030 para el escenario BAU . . . . .	17
4.3.2. Resultados 2030 para el escenario GND . . . . .	18
4.3.3. Resultados 2030 para el escenario D . . . . .	20
4.3.4. Comparación entre resultados de escenarios . . . . .	22
<b>5. Conclusiones y discusión</b>	<b>28</b>
5.1. Futuras líneas de investigación . . . . .	30
<b>Anexo 1 - Ampliación: Razones para un descenso energético</b>	<b>31</b>
<b>Anexo 2 - Ampliación: La distribución del descenso energético</b>	<b>41</b>
<b>Anexo 3 - Ampliación: Estrategias de reducción de la demanda energética</b>	<b>47</b>
<b>Anexo 4: Datos iniciales y adaptaciones consumo energético</b>	<b>59</b>
<b>Anexo 5: Factores ajuste posteriores a la simulación</b>	<b>79</b>
<b>Anexo 6: Resultados energéticos completos de los escenarios</b>	<b>88</b>
<b>Referencias</b>	<b>95</b>

## Índice de figuras

1.	Evolución del consumo mundial de energía primaria y de la distribución porcentual de fuentes energéticas entre 1994 y 2019 . . . . .	1
2.	Evolución del consumo total de energía primaria en el estado español entre los años 1850 y 2000 con diferenciación de fuentes energéticas . . . . .	2
3.	Distribución por categorías de la huella de energía final en el estado español según quintiles de ingresos económicos . . . . .	7
4.	Distribución inicial productos energéticos según sectores agrupados . . . . .	16
5.	Variación del consumo energético y de las emisiones entre 2020 y 2030 según los resultados del escenario BAU . . . . .	18
6.	Variación del consumo energético y de las emisiones entre 2020 y 2030 según los resultados del escenario GND . . . . .	20
7.	Variación del consumo energético y de las emisiones entre 2020 y 2030 según los resultados del escenario GND . . . . .	22
8.	Variación del consumo total de productos energéticos entre 2020 y 2030 según los escenarios BAU, GND y D . . . . .	23
9.	Comparación entre el consumo de productos energéticos según los diferentes escenarios	24
10.	Evolución de las trayectorias del IDH de China, Costa Rica, India, Japón, España y Estados Unidos con respecto al consumo de energía primaria, entre 1975 y 2005 . . . . .	44
11.	Energía final per cápita para una vida digna, diferenciando en categorías de consumo, para Ruanda, Uruguay, Kirguistán y la media global . . . . .	45
12.	Representación de la cadena de transformaciones entre las necesidades básicas y el consumo de energía final, con las intervenciones de suficiencia señaladas . . . . .	57
13.	Tasa metabólica energética de la economía doméstica, excluyendo el sector financiero y el gobierno, para 14 países de la Unión Europea en el periodo 1995- 2013 . . . . .	62
14.	Variación en el consumo de productos energéticos 2020-2030 según escenario BAU .	91
15.	Variación en el consumo de productos energéticos 2020-2030 según escenario GND .	91
16.	Variación en el consumo de productos energéticos 2020-2030 según escenario D . . . . .	92
17.	Distribución productos energéticos en sectores agrupados en 2030 según el escenario BAU . . . . .	92
18.	Distribución productos energéticos en sectores agrupados en 2030 según el escenario GND . . . . .	93
19.	Distribución productos energéticos en sectores agrupados en 2030 según el escenario D	94

## Índice de tablas

1.	Resultados principales emisiones y tiempo de trabajo . . . . .	13
2.	Datos iniciales de consumo energético con agrupación de sectores . . . . .	15
3.	Resultados consumo energético 2030 para escenario BAU con agrupación de sectores	17
4.	Resultados consumo energético 2030 para escenario GND con agrupación de sectores	19
5.	Resultados consumo energético 2030 para escenario D con agrupación de sectores . .	21
6.	Conjunto de resultados principales para los tres escenarios . . . . .	25
7.	Consumo de energía primaria y final per cápita en 2030 según los tres escenarios . .	25
8.	Características de fuentes energéticas renovables: TRE y potencial teórico máximo .	38
9.	Descripción sectores actividad económica . . . . .	59
10.	Reparto productos energéticos transporte . . . . .	69
11.	Reparto productos petrolíferos categoría H49 . . . . .	69
12.	Porcentajes iniciales productos energéticos en transporte . . . . .	71
13.	Datos iniciales trabajo, emisiones y consumo energético . . . . .	72
14.	Ajuste suma total consumo energético sectores . . . . .	74
15.	Comparación entre distribución productos energéticos en los datos iniciales con res- pecto al Libro de la Energía . . . . .	75
16.	Agrupación de la clasificación de productos energéticos . . . . .	76
17.	Distribución inicial porcentual de productos energéticos . . . . .	77
18.	Factores ajuste originales aplicados a las emisiones . . . . .	79
19.	Supuestos ajuste, adaptación y parámetros . . . . .	81
20.	Factores emisiones electricidad según escenario tendencial y objetivo PNIEC . . . . .	82
21.	Factores emisiones productos energéticos . . . . .	83
22.	Factores de energía y de redistribución para el ajuste de los escenarios . . . . .	84
23.	Variaciones anuales consumo energético transporte en Cuidados8 . . . . .	86
24.	Evolución consumos energéticos Cuidados8 . . . . .	86
25.	Distribución productos energéticos en los componentes del consumo de Cuidados8 .	87
26.	Resultados consumo energético por sectores y escenarios . . . . .	88
27.	Modificaciones en la distribución de productos energéticos en determinados sectores según escenarios . . . . .	90

## Resumen de abreviaturas

<i>IPCC</i>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>SR1,5</i>	Informe especial de 1,5 °C del IPCC en 2018
<i>MEI</i>	Modelos de Evaluación Integrada
<i>BECCS</i>	Captura y Almacenamiento de Carbono Bioenergético
<i>AR</i>	Aforestación y reforestación
<i>LED</i>	Escenario de baja demanda energética
<i>PIB</i>	Producto Interior Bruto
<i>ISF</i>	Institute for Sustainable Futures
<i>UTS</i>	Universidad Tecnológica de Sydney
<i>DLR</i>	Centro Aeroespacial Alemán
<i>NZE</i>	Escenario AIE Net Zero by 2050
<i>AIE</i>	Agencia Internacional de la Energía
<i>DACCS</i>	Captura de CO2 directa de aire
<i>TRE</i>	Tasa de Retorno Energético
<i>WEO</i>	World Energy Outlook (AIE)
<i>OCDE</i>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
<i>IDH</i>	Índice de Desarrollo Humano
<i>DLE</i>	Escenario de energía mínima para una vida digna
<i>CNAE</i>	Clasificación Nacional de Actividades Económicas (NACE)
<i>GND</i>	Escenario Green New Deal
<i>D</i>	Escenario Decrecimiento
<i>BAU</i>	Escenario Bussines as Usual
<i>PEFA</i>	Cuentas de los flujos físicos de la energía

*Las instituciones crean certezas y,  
cuando se las toma en serio,  
las certezas amortecen el corazón  
y encadenan la imaginación.*

– Iván Illich –

## Introducción

El actual modelo económico y de desarrollo ha conducido durante el último siglo y medio a nuestras sociedades hacia lo que se puede denominar como una *crisis civilizatoria* [1]. El consumo de recursos y el impacto sobre los ecosistemas que sostienen la vida humana en el planeta ha provocado diversas *fracturas metabólicas* que han separado a nuestro modo de vida de los ciclos de regeneración de la naturaleza [2]. El consumo acelerado de la energía capturada por la fotosíntesis durante millones de años en apenas unas décadas, ha propulsado a nuestras sociedades hasta superar diversos límites biofísicos del planeta. La dependencia hacia otros recursos no renovables y el agotamiento de la fertilidad de los suelos, la profundizan. Los síntomas de esta crisis ecológica se multiplican en todos los ámbitos. Procesos como el cambio climático, la pérdida masiva de biodiversidad o la ruptura de los ciclos del nitrógeno y del fósforo, han desbordado ya los límites planetarios. Mientras que parámetros como la acidificación de los océanos, el consumo de agua dulce o los usos del suelo están en la tendencia hacia el desbordamiento [3].

Ante la urgencia y la magnitud de esta crisis ecológica, se hace necesario repensar, actualizar y transformar el encaje de nuestras sociedades dentro de los límites planetarios. La energía ha jugado un papel central en todo este proceso histórico, y por lo tanto deberá ser una pieza prioritaria para todas estas transformaciones [4]. La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la transición energética están presentes en las agendas de políticas públicas de gran parte de los países europeos. Sin embargo, estas se abordan principalmente desde el punto de vista de la descarbonización del actual consumo energético. Las estrategias se centran en la extensión de las tecnologías de captación de energías renovables y la electrificación de sectores que actualmente utilizan combustibles fósiles. En este trabajo defendemos que antes de llevar a cabo estrategias centradas en el suministro energético, deben realizarse análisis y transformaciones profundas de la actual demanda energética. De lo contrario, la transición energética corre el riesgo tanto de no poder llevarse a cabo, como de agravar el resto de las crisis socio-ecológicas que tenemos que abordar en el corto plazo.

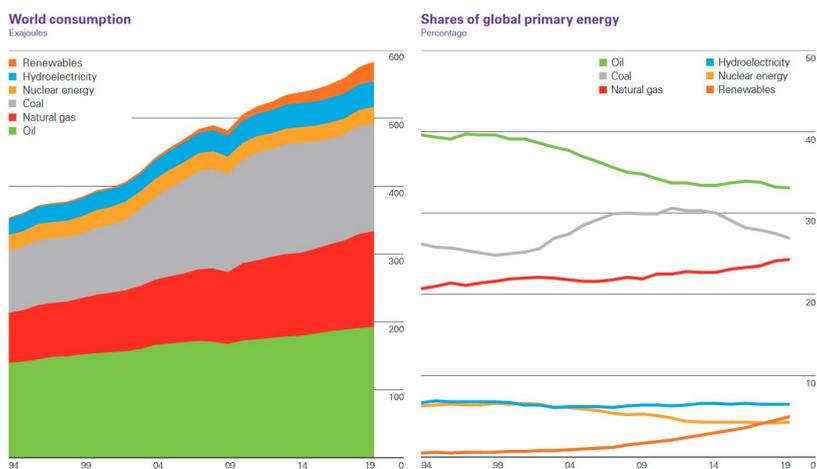


Figura 1: Evolución del consumo mundial de energía primaria y de la distribución porcentual de fuentes energéticas entre 1994 y 2019. Extraído de BP 2020 [5]

A nivel mundial, el consumo anual de energía primaria alcanzó en 2019 los 583,9 EJ. Llega a este nivel con una media de crecimiento anual de 1,6 % durante la última década [5]. A su vez, el consumo anual de energía final a nivel global alcanzó en 2019 los 435 EJ [6]. De este consumo, el

84,3 % de la energía primaria es aportada por la suma de petróleo, gas natural y carbón, tal y como se puede observar en la figura 1.

En 2019, el reparto per cápita establecía la media del consumo anual de energía primaria en los 75,7 GJ [5]. Mientras que países como el estado español se situaban considerablemente por encima de dicha media, con un consumo anual de energía primaria de 122,4 GJ per cápita. Los datos de la última década muestran que el consumo absoluto y per cápita de energía primaria está descendiendo en el estado español, a un ritmo anual medio de -1 % y -1,2 % respectivamente. Mientras que a nivel mundial, se observa un aumento del 1,6 % sobre el consumo de energía primaria absoluta, y de un 0,4 % sobre el consumo per cápita. Si estas tendencias se mantuvieran durante las próximas décadas, el consumo per cápita del estado español se situaría en la media mundial en el año 2049, con una cifra anual de 85,3 GJ per cápita. Para ese año, el estado español habría descendido desde los 5,72 EJ a los 4,23 EJ de consumo de energía primaria en términos absolutos, mientras que a nivel global se habría pasado de 583,9 EJ hasta los 940 EJ.

Puesto en una perspectiva histórica, estas cifras son todavía más abrumadoras. En la figura 2 se muestra la evolución del consumo total de energía primaria en el estado español entre los años 1850 y 2000. Teniendo en cuenta el aporte del trabajo humano y animal, el consumo anual de energía bruta apenas incrementó entre 1850 y 1950 desde 14,7 GJ hasta 26,4 GJ per cápita, mientras que entre el año 1960 y el 2000 pasó de 33,8 GJ a 120,6 GJ per cápita [7]. Ejemplificando así lo que se ha venido a llamar como la *gran aceleración* ocurrida en la segunda mitad del siglo XX. Un análisis de las transformaciones del metabolismo social que ocurrieron en este periodo puede encontrarse en las investigaciones de González de Molina et al. [8], especialmente centradas en el metabolismo agrario.

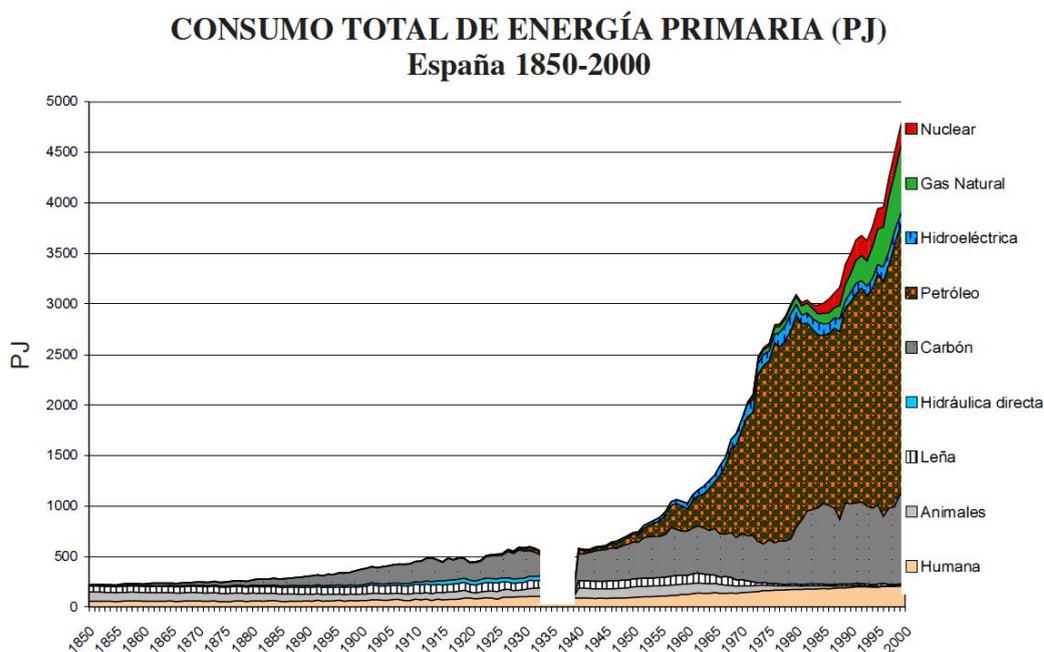


Figura 2: Evolución del consumo total de energía primaria en el estado español entre los años 1850 y 2000 con diferenciación de fuentes energéticas. Extraído de Mar Rubio 2005 [7]

Para afrontar la crisis ecológica y llevar a cabo una transición energética realmente efectiva, es prioritario afrontar un descenso del consumo energético. Este descenso debe realizarse a nivel

mundial, pero los países industrializados y enriquecidos del Norte global, como el estado español, deberán asumir las partes más importantes de este descenso. Tanto por sus responsabilidades históricas en la crisis ecológica, como porque son estos países los que tienen el consumo energético más excesivo. Sin embargo, la dimensión del metabolismo energético de la transición ecológica no puede en ningún caso ocultar la dimensión social de estas transformaciones. Cuestiones como la noción de libertad y autonomía no están dadas en el descenso energético, será en el proceso de transición y en la forma en la que se conciben los límites como una decisión colectiva donde se lograrán alcanzar estos elementos fundamentales [9].

El objetivo de este trabajo es aproximarse al análisis, los escenarios y las estrategias de este descenso energético. La primera sección abordará los motivos que nos imponen el descenso energético. Empezando por los escenarios de mitigación del cambio climático, pasando por la escasez de minerales críticos para la transición energética y terminando con la previsión de una situación de declive energético. La segunda sección se centrará en cuál debe ser la distribución del descenso energético a nivel mundial. Evaluaremos el actual reparto del consumo energético, examinaremos el vínculo entre el consumo energético y la satisfacción de necesidades humanas y terminaremos presentando un escenario del consumo energético mínimo para una vida digna. En la tercera sección, nos adentraremos en las consideraciones que deben tenerse en cuenta para llevar a cabo las estrategias que logren el descenso energético. Iniciamos con un cuestionamiento profundo del crecimiento económico y de la retórica del desacoplamiento, continuamos con una introducción a los procesos mediante los cuales se constituye la demanda energética y la dependencia establecida con respecto a los sistemas sociotécnicos que la moldean, y terminaremos con una descripción de la necesidad de pasar del enfoque de la eficiencia energética hacia un enfoque de la suficiencia energética. Por último, en la cuarta sección realizaremos un análisis de caso, en el que calcularemos tres escenarios energéticos diferentes para el estado español en 2030. Nos basaremos en un modelo y unos escenarios previamente definidos, obtendremos los datos energéticos iniciales, realizaremos los ajustes necesarios y presentaremos los resultados hallados. En la sección de conclusiones sintetizaremos los elementos centrales del trabajo y trazaremos futuras líneas de investigación.

## 1. Razones para un descenso energético

El punto de partida de este trabajo requiere dedicarle un espacio a justificar las razones que nos conducen a afirmar la necesidad de planificar un descenso energético en el corto y medio plazo. El sentido común imperante es justamente el contrario, y son los puntos de vista tecno-optimistas las que dominan el ámbito académico y las recomendaciones de los grandes organismos internacionales. En esta sección presentaremos las conclusiones de la recopilación bibliográfica que hemos llevado a cabo según la cual se diferencian tres razones que justifican abordar con urgencia las transformaciones que nos conduzcan a un descenso energético a nivel mundial. La ampliación de esta recopilación puede consultarse en el Anexo 1.

En primer lugar, examinamos el papel que juega la demanda energética en la viabilidad de los escenarios de mitigación del cambio climático [10]. Para evitar las peores consecuencias del calentamiento global es necesaria una profunda reducción de emisiones en las próximas dos décadas que cumpla con los presupuestos de carbono señalados por el IPCC [11]. Es fundamental lograr esta reducción de emisiones sin depender de tecnologías de emisiones negativas, dada la falta de evidencia acerca de su eficacia y de la posibilidad de escalarla a los niveles actualmente proyectados [12, 13]. Para ello, resulta necesario un fuerte descenso energético, como el proyectado por el “*Escenario de baja demanda de energía*” (LED), que considera una reducción del 40% de la energía final a nivel mundial para 2050, alcanzando los 245 EJ [14]. Además, dado que resulta muy improbable que ocurra un fuerte desacoplamiento entre consumo energético y crecimiento económico [15], los escenarios que logren esto deberán ser por fuerza unos escenarios de *decrecimiento* [16]. Para cumplir con la justicia climática y ecológica en este proceso, será necesario repartir el descenso diferenciando entre Norte global y Sur global según sus responsabilidades. De forma que el consumo anual de energía final pasaría en el Norte global de 118 GJ per cápita en 2017 a 31 GJ per cápita en 2050, mientras que el del Sur global pasaría de 36 GJ per cápita en 2017 a 31 GJ per cápita en 2050 [16].

En segundo lugar, examinamos los límites que imponen unos recursos minerales finitos ante el despliegue masivo de las tecnologías de captación de energías renovables. Diferentes investigaciones identifican al cobalto, litio, telurio y níquel como aquellos elementos más críticos. Se trata de aquellos minerales que van a experimentar el incremento de la demanda más significativo en las próximas décadas, y aquellos que pueden suponer un impedimento al despliegue masivo de estas tecnologías [17, 18]. Estos impedimentos aparecen incluso para aquellos escenarios en los que se reduce considerablemente el consumo de energía final, hasta el nivel de 253 EJ en 2050, para los que se identifica como la demanda podría superar las reservas de cobalto, litio y níquel [19, 20]. La propia Agencia Internacional de la Energía (AIE) empieza a reconocer las limitaciones que pueden llegar a suponer las reservas y tasas de producción actuales de estos minerales para aquellos escenarios de descarbonización que cumplirían con los objetivos climáticos [6, 21]. Todo ello, junto al descenso de las leyes minerales [22] y a los impactos de la minería sobre la biodiversidad [23] y sobre las comunidades locales [24], hace que tome más importancia la disminución de la demanda energética. Será este descenso energético el que posibilite una transición energética que pase de una matriz fósil a una renovable, sin causar una degradación ecológica demasiado severa por el camino.

Por último, nos adentraremos en los motivos que nos indican la posibilidad de que el futuro próximo sea el de un declive energético, loelijamos o no. Las estimaciones sobre fuertes reducciones en la producción de petróleo durante la próxima década [25, 26] hacen visibles las consecuencias de la superación del pico de producción de petróleo convencional que tuvo lugar entre 2005 y 2006 [27], y que fue suavizada por una industria especulativa y deficitaria del *fracking* [28]. En el caso de que las compañías inviertan únicamente en los pozos existentes, tal y como se ha visto que es

la tendencia, la producción descendería desde los 98 Mb/día de 2019 hasta 40 Mb/día en 2040. Frente a ello, debe atenderse cuidadosamente a las limitaciones que existen a la hora de sustituir de forma completa la actual matriz energética fósil por una 100 % renovable. Cuestiones como una baja Tasa de Retorno Energético (TRE), un potencial teórico máximo, la dependencia con respecto al sistema fósil y el coste energético de la sustitución tienen suficiente peso como para llamar a la prudencia [4, 29]. Aunque las cifras varían entre unos estudios y otros, que la energía primaria máxima que podrían suministrar las energías renovables modernas se encontraría en el intervalo de 142 a 378 EJ [4]. El proceso de transición energética que vamos a vivir en las próximas décadas no tiene equivalente histórico, por lo que conviene aproximarse a las estimaciones sobre escenarios 100 % renovables con prudencia y con *humildad de conocimientos* [29].

El conjunto de estos motivos nos lleva a afirmar la necesidad de afrontar la tarea de diseñar las transformaciones sobre la sociedad que logren llevar a cabo este descenso energético. Por los resultados de las investigaciones aquí expuestos, nos parece un criterio razonable y prudente asumir como objetivo la reducción del 40 % del consumo de energía final a nivel mundial. Aunque esto podría encontrarse con limitaciones debido a la escasez de minerales. De forma que tomaremos este valor, de 245 EJ en 2050, como máximo. Lo que señalan diversas investigaciones es que sería este descenso el que posibilitaría llevar a cabo una transición hacia una matriz energética renovable.

## 2. La distribución del descenso energético

Hemos visto los motivos por los cuales debemos abordar un descenso en la demanda energética global. Ante esta realidad, emergen diferentes preguntas acerca de cuáles serían las consecuencias de ello. En esta sección, exponemos las conclusiones de la recopilación bibliográfica realizada sobre tres elementos centrales para responder a estas preguntas: la profundas desigualdades existentes en el reparto de este consumo energético, la vinculación entre la demanda y la satisfacción de necesidades humanas y el consumo energético mínimo necesario para el desarrollo de una vida digna. Una ampliación de esta recopilación puede consultarse en el Anexo 2.

El consumo energético a nivel mundial presenta actualmente unas enormes desigualdades [30]. Mientras que el 10 % más rico de la población mundial consume el 39 % de la energía final, el 10 % más pobre consume 20 veces menos, un 2 % de la energía final. Son estas desigualdades las que se presentan como el principal impedimento a superar para lograr llevar a cabo un descenso energético compatible con criterios de justicia social. El consumo energético actual es más que suficiente para asegurar una vida digna para el conjunto de la población mundial [31, 32]. Es la falta de *eficiencia social* en la transformación de este consumo hacia la satisfacción de las necesidades humanas para una vida digna lo que impide que esto ocurra [32]. De este modo, el descenso energético que necesitamos pasa por una fuerte redistribución del consumo, unas transformaciones a nivel mundial que eliminen estas desigualdades. Los niveles de consumo energético del Norte global no son en ningún modo universalizables para el conjunto de la población, por lo que deben reducirse diferenciando entre el consumo de lujo, el despilfarro y el de suficiencia.

Se puede observar una desvinculación de la satisfacción de necesidades humanas con respecto al consumo energético a partir de cierto nivel de saturación [33, 32]. Esto significa que los niveles de consumo energético en los países del Norte global no se corresponden con la calidad de vida experimentada por su población, sino que se pueden alcanzar niveles de satisfacción equivalentes con menores consumos. Por el otro lado, se observa como pequeños aumentos del consumo energético sí que se encuentran fuertemente vinculados a una mejora de la satisfacción de necesidades humanas en aquellos países con los niveles de consumo más bajos. De esta forma, se podrían llevar a cabo fuertes reducciones en la demanda del Norte global sin que ello se traduzca en un empeoramiento de la vida de su población. Mientras que, unos ligeros aumentos en el consumo energético de países del Sur global se podrían traducir fácilmente en una mejora considerable de las condiciones de vida de su población.

Investigaciones recientes señalan que sería posible reducir el consumo de energía final en 2050 hasta los 149 EJ y asegurar una vida digna para el conjunto de la población mundial [31]. Estos valores son calculados a partir de los productos y servicios energéticos necesarios para satisfacer las necesidades humanas básicas y asegurar el desarrollo de vidas dignas en la sociedad. Las diferencias entre el consumo mínimo necesario para garantizar esto en cada país varía según factores climáticos y demográficos. Consideramos adecuado tomar este valor como el nivel mínimo de consumo energético en el horizonte de 2050. Por lo que, si lo ponemos junto a las conclusiones de la sección anterior, llegaríamos a definir el umbral del consumo de energía final de 2050 entre los 149 EJ como mínimo y los 245 EJ como máximo. Este umbral traducido a un consumo anual de energía final per cápita establecería unos valores de 15,3 GJ como mínimo y 31,0 GJ como máximo. El nivel mínimo de energía final necesario para garantizar una vida digna en el estado español, sería de 15,8 GJ anuales per cápita [31].

Al comparar esto con la actual desigualdad en el consumo energético, vemos cómo actualmente

el 77% de la población mundial con menos ingresos ya se encuentra dentro de este umbral en términos de huella de energía final, al ser esta inferior a los 30 GJ per cápita [30]. Por lo que la reducción debería ser asumida por el 23% más rico de la población mundial. Así mismo, lograr llevar al conjunto de la población dentro de este umbral significaría que el 38% con menos ingresos de la población incrementa su huella de consumo de energía final, la cual actualmente es inferior a los 10 GJ per cápita. De esta forma, vemos que son los países como el estado español, que actualmente tiene un consumo energético que excede considerablemente este umbral, quienes deberían asumir la mayor parte del descenso energético a nivel global. Para ello, una reducción en las categorías de servicios energéticos más desiguales como el consumo energético asociado al transporte terrestre y aéreo será fundamental.

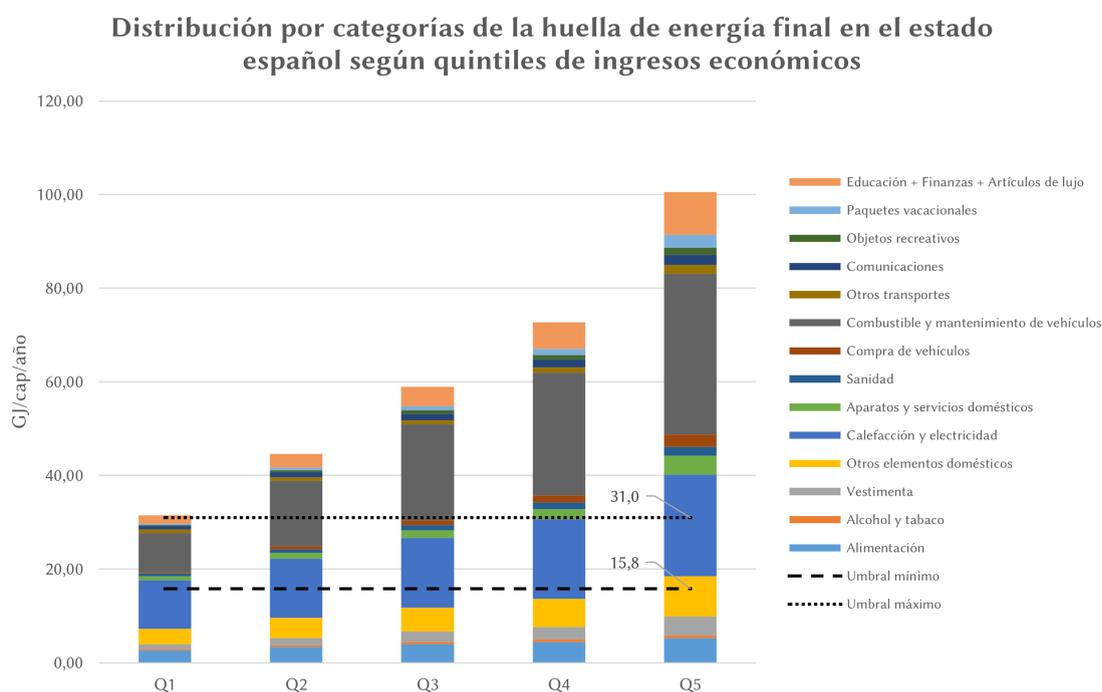


Figura 3: Distribución por categorías de la huella de energía final en el estado español según quintiles de ingresos económicos. En línea discontinua se indican los valores del umbral mínimo y máximo definido en este trabajo. Elaboración propia a partir de datos de Oswald et al. 2020 [30]

Si analizamos la huella de energía final per cápita atendiendo a los tramos de ingresos económicos para el caso del estado español, vemos cómo la redistribución sigue siendo necesaria dentro de nuestras fronteras. A partir de los datos de la investigación de Oswald et al. [30], representamos en la figura 3 el desglose por categorías de productos y servicios de la huella energética, según los quintiles de ingresos económicos. En cada quintil están representadas 9,36 millones de personas. De esta forma, se aprecia claramente cómo el 20% de la población con menos ingresos (Q1) del estado español ya se encuentra prácticamente dentro del umbral máximo que hemos fijado en este trabajo. La mayor parte del descenso en la huella energética deberá asumirse entonces por aquellos sectores de la población que actualmente exceden ampliamente este umbral. Vemos cómo el 20% con más ingresos de la población (Q5) tiene una huella energética en la categoría de “combustible y mantenimiento de vehículos” que excede por sí sola el umbral máximo (34,32 GJ/cap/año). La reducción en la huella de energía final que deberá ser asumida por estos tramos de población para llevar a cabo una redistribución en el descenso energético será del 69,2% para el Q5, del 57,4% para el Q4, del 47,4% para el Q3 y del 30,5% para el Q2.

Detectamos, sin embargo, algunas discrepancias que nos hacen tomar estos valores con cierta cautela. Los datos oficiales establecen el consumo anual de energía primaria per cápita en 122,4 GJ para el caso del estado español en 2019 [5]. Calculado a partir de los valores de energía final para usos energéticos del *Libro de la Energía* [34] y los datos de población del Instituto Nacional de Estadística (INE) [35], obtenemos un consumo anual de energía final per cápita de 78,0 GJ para el año 2018. Los valores aportados por Oswald et al. establecen una huella de energía final per cápita de 61,7 GJ en promedio para el conjunto de la población. Esto no es coherente con los resultados de Capellán y Arto [36], que estimaban una huella energética un 34 % superior a la demanda energética territorial, para el caso de energía primaria en 2008. Por lo tanto, sería razonable asumir que los valores de Oswald et al. son inferiores a la huella de energía final real del estado español, pues de lo contrario estaríamos afirmando que la huella energética es inferior al consumo territorial. En cualquier caso, el enfoque más adecuado para establecer las reducciones de consumo energético según el umbral máximo y mínimo definido es el de la huella de energía final. Si se analizan únicamente los consumos territoriales, corremos el riesgo de seguir ocultando las desigualdades existentes en la energía contenida en el comercio internacional.

De esta forma vemos cómo resulta imprescindible abordar una redistribución profunda del consumo energético tanto dentro como fuera de nuestras fronteras. El umbral de consumo anual de energía final per cápita de 15,8 GJ como mínimo y 31,0 GJ como máximo, para el caso del estado español, debe ser la referencia con la que orientarnos en esta redistribución.

### 3. Estrategias de reducción de la demanda energética

Llegados a este punto, hemos visto la necesidad de conseguir fuertes reducciones en el consumo energético de los países del Norte global, como es el caso del estado español. Sin embargo, el descenso energético no se consigue por decreto. El nivel de consumo energético de estos países no es tan alto por una cuestión de derroche de energía, sino que está entretelado con la forma en la que están estructuradas estas sociedades. En esta sección nos adentraremos en la estrecha relación entre consumo energético y crecimiento económico, presentaremos algunas comprensiones sobre los procesos mediante los cuales se constituye la demanda energética, y terminamos con una crítica a los actuales enfoques de eficiencia energética que nos conducirá a introducir algunas nociones sobre el enfoque de la suficiencia energética. Una ampliación de la recopilación bibliográfica llevada a cabo para abordar estas cuestiones se puede encontrar en el Anexo 3.

La demanda energética está constituida por unos sistemas sociotécnicos concretos que moldean aquellos usos percibidos socialmente como necesarios [37, 38]. Por lo tanto, la demanda energética es una cuestión dinámica, social, cultural, política e histórica [39]. Es de esta forma como se han creado unos “entornos energívoros” [40] o “monopolios radicales” [41], que anclan a nuestras sociedades en la dependencia hacia un alto consumo energético, que no es sostenible. Se trata de un sistema de infraestructuras a gran escala, intensivas en capital y de larga duración, que coevolucionan con las tecnologías, instituciones, habilidades, conocimientos y comportamientos. Estos sistemas geográficamente extensos tienen una inercia muy considerable, y una vez establecidos bloquean las posibilidades de establecer otra forma de satisfacer las necesidades y deseos sociales de modos de vida alternativos que consuman mucha menos energía. Las transformaciones que se lleven a cabo para reducir profundamente la demanda energética en los países del Norte global deberán ir encaminadas a desmantelar estos sistemas sociotécnicos, superar las inercias creadas durante las últimas décadas y desarrollar las infraestructuras que permitan constituir unas prácticas sociales que satisfagan las necesidades para disfrutar de una vida digna con mucha menos energía.

Este proceso no será posible si no se abandona el dogma del crecimiento económico. No se han encontrado evidencias empíricas de que haya ocurrido en ningún país un desacoplamiento entre consumo energético y crecimiento económico en la magnitud y estabilidad temporal necesarias para abordar la crisis ecológica [15]. Además, son múltiples los motivos que llevan a la conclusión de que tampoco es probable que este desacoplamiento ocurra en un futuro próximo. Por lo tanto, ante la alta improbabilidad de un desacoplamiento realmente efectivo, seguir impulsando el crecimiento es una apuesta excesivamente arriesgada e irresponsable [15]. Las estrategias de descenso energético pasarán obligatoriamente por una contracción de la esfera económica, que reduzca tanto la producción como el consumo [42].

Así mismo, las medidas de eficiencia energética, en un contexto de crecimiento, se han mostrado incapaces de responder a los retos ecológicos que tenemos por delante [43, 44, 45]. La mayor parte de los países de la UE-27 han experimentado un *efecto rebote* directo e indirecto superior al 50 %, de forma que la mitad del ahorro energético previsto por las medidas de eficiencia energética se ha visto contrarrestado [43]. El incremento del tamaño y potencia de los dispositivos tecnológicos, así como el aumento de los estándares de comodidad y la creación de nuevas necesidades, han anulado sistemáticamente los efectos de un incremento de la eficiencia energética [44]. Además, el propio enfoque de la eficiencia energética legítima, reproduce y perpetúa unas concepciones establecidas sobre la necesidad de unos usos energéticos que simplemente no pueden mantenerse [45]. Frente a ello, las estrategias de descenso energético deberán estar articuladas a partir del enfoque de la suficiencia energética.

Una estrategia de suficiencia energética debe partir de las necesidades básicas y los procesos que las transforman en la demanda de unos servicios técnicos concretos [46]. Esto no quiere decir que no haya que mejorar la eficiencia energética de dispositivos, edificios y servicios, sino que el foco no debe estar en una acumulación de mejoras incrementales [45]. El foco debe estar puesto en buscar las formas en las que aquellas necesidades socialmente percibidas como tal se puedan cubrir mediante usos que reduzcan el consumo energético. Investigaciones recientes muestran como mediante una combinación de medidas de reducción, sustitución y ajuste se podrían lograr las transformaciones que reduzcan de manera efectiva la demanda energética, a pesar de que no se mantenga la equivalencia con respecto a la forma en la que actualmente esas necesidades están siendo satisfechas [47].

Todas estas transformaciones, regidas por el enfoque de la suficiencia, deberán realizarse con la vista puesta en establecer un “suelo” y un “techo” que asegure la sostenibilidad ecológica y permita llevar a cabo una vida digna. Aquí, enlazamos con el umbral de consumo anual de energía final per cápita al que llegábamos en la sección anterior: entre 15,8 GJ y 31,0 GJ, para el caso del estado español. Para lograr esto, deberán revisarse también el conjunto de las cadenas de suministro globalizadas de las que depende actualmente nuestra economía, en las que se deposita gran parte de la responsabilidad de la dependencia hacia un excesivo consumo energético [38]. Será necesario una re-localización y acortamiento de las cadenas de producción, distribución y consumo, así como una reducción de la dependencia con respecto a materiales escasos presentes únicamente en regiones del mundo lejanas.

Por último, merece la pena destacar que durante todo este proceso no podemos caer en el error de aproximarnos a los medios tecnológicos comprendiéndolos como algo neutro y separado del contexto social, económico e histórico en el que han sido creados. Como señala Adrián Almazán: *cuando [un individuo] crea una técnica, junto a los fines que conscientemente le quiere imprimir se “cuelan”, de manera inconsciente, muchos valores o finalidades sociales* [48]. De esta forma, las técnicas están en cierto modo sujetas a los fines de la sociedad en la que aparecen, los cuales quedan solidificados en los objetos técnicos. Como ya hemos visto antes, en esta imbricación profunda las prácticas sociales son moldeadas por las técnicas. Por lo tanto, las perspectivas del descenso energético deben partir de un análisis no neutral de las actuales tecnologías industriales. Pues sería un grave error minusvalorar la forma en la que las actuales comprensiones y fines sociales que nos han conducido a la dependencia de un consumo energético excesivo están contenidas en dichas tecnologías.

En este sentido, Ivan Illich propuso el concepto de la *convivencialidad* para valorar las tecnologías [41]. Este concepto hace referencia hacia el carácter de las herramientas que hace que en su empleo los usuarios sea más autónomos y más capaces de transformar el mundo según sus propias necesidades y deseos. Según Illich, la sociedad convivencial sería *“aquella sociedad en la que la tecnología moderna está al servicio de la persona integrada en la colectividad y no al servicio de un cuerpo de especialistas”*, y remarca *“convivencial es la sociedad en la que el hombre controla la herramienta”*, no al revés. Por lo tanto, a la hora de pensar en las estrategias de descenso energético, deberemos pensar también en la forma de avanzar hacia sociedades más convivenciales, en las que la técnica se ponga realmente al servicio de la satisfacción de necesidades humanas y de la sostenibilidad ecológica. Alejándose así de unos objetivos de acumulación de capital que provoca un continuo aumento del consumo energético y de un imaginario del progreso ha supuesto una gran expropiación de la capacidad de las sociedades de decidir democráticamente sobre su vida [48]. Todos estos elementos deberán estar presentes en las transformaciones que se lleven a cabo, si queremos obtener unos resultados realmente efectivos.

## 4. Análisis de caso: Escenarios de transición ecológica en el estado español 2020-2030

En este trabajo queremos realizar un análisis de caso sobre el estado español que ilustre las reflexiones realizadas en las secciones anteriores y que se aproxime a los descensos del consumo energético que consideramos necesarios para abordar la transición ecológica. El enfoque del que partimos se centra en la demanda energética, frente a otros muchos estudios realizados del lado del modelo de producción energética. Es así porque consideramos imprescindible una evaluación en profundidad de la energía que realmente necesitamos abastecer, tal y como se desarrollaba en los apartados previos. Así mismo, en este análisis de caso nos vamos a aproximar a la cuestión desde el enfoque de cambios estructurales en el modelo productivo, que tienen como consecuencia un descenso en la demanda energética. Esto contrasta con otros enfoques, en los que el actual modelo productivo no se cuestiona, y solo se evalúan posibles reducciones en el consumo energético mediante mejoras tecnológicas o aumentos de la eficiencia. De esta forma, las variaciones en el consumo energético que vamos a estudiar no aparecen como efecto de una “política energética”, sino como consecuencia de transformaciones estructurales.

No podemos dejar de mencionar que para realizar un estudio en profundidad sobre esta cuestión sería necesaria una modelización de dinámica de sistemas. Dada la multitud de factores que influyen y las complejas relaciones entre ellos, obtener unos resultados realmente sólidos al respecto exige un cálculo de ese tipo. Este tipo de estudios son los que llevan a cabo el *Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS)* de la *Universidad de Valladolid* [49].

Sin embargo, en este trabajo llevamos a cabo un análisis más modesto sobre la cuestión. Nos basaremos en el informe *Escenarios de trabajo en la transición ecosocial 2020-2030* realizado por *Ecologistas en Acción* en el año 2019 [50]. Este informe estudia las posibles evoluciones dinámicas e interconectadas entre las horas de trabajo y las emisiones de gases de efecto invernadero, y analiza estos dos factores en tres escenarios diferentes. Para ello, se definió un método de cálculo y se desarrolló un modelo informático que lo llevara a cabo. Nuestra intención es partir del trabajo hecho en este informe para adaptar el cálculo de escenarios al el consumo energético. De esta forma, podemos partir de una metodología ya definida, con tres escenarios contruidos de forma argumentada y un modelo de cálculo. Además, al hacerlo así, podemos interpretar los resultados que obtengamos acompañándolos con los resultados obtenidos en este informe en términos de emisiones y horas de trabajo. Esto facilita una comprensión amplia de las diferentes propuestas de transición ecológica.

### 4.1. Modelo empleo-emisiones 2020-2030 Ecologistas en Acción

El informe *Escenarios de trabajo en la transición ecosocial 2020-2030* estudia las consecuencias en términos de emisiones y horas de trabajo para dos posibles escenarios de transición ecológica en el estado español, así como un tercer escenario tendencial. Para ello, establecen una división en sectores del conjunto de actividades económicas, a partir de la *Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE)* a tres dígitos. En total, se establecen 86 sectores, que se agrupan en 17 conjuntos. Pueden consultarse todos los sectores con los que trabajaremos en el Anexo 4. A partir de esta división de sectores se recopilan los datos iniciales desde diferentes fuentes, tanto de horas de trabajo como de emisiones GEI. Los escenarios se definen en base a incrementos o descensos porcentuales sobre las horas de trabajo para cada uno de los sectores analizados. De esta forma, el modelo de cálculo obtiene las horas finales de trabajo para cada uno de los sectores y, a partir de ahí, se obtienen las emisiones asociadas a los sectores. La hipótesis central sobre la que se desarrolla

el estudio es que, en una primera aproximación, la ratio entre emisiones y horas de trabajo para cada sector se puede considerar constante para la próxima década.

Lo que se está estudiando es cómo reduciendo la actividad económica de aquellos sectores con más emisiones por hora trabajada y aumentando la actividad económica en otros sectores con unas emisiones por hora trabajada menores, se obtiene una reducción global en las emisiones. Es el alto grado de desagregación en los sectores analizados el que permite realizar este estudio de forma que se obtengan unos resultados aproximados a las transformaciones reales.

Así mismo, se hace especial énfasis en no contabilizar únicamente las horas correspondientes a los *trabajos productivos* y asalariados, teniendo en cuenta también las correspondientes a los *trabajos de reproducción social* o *trabajos de cuidados* [51]. De hecho, en los valores iniciales se cifra en un 53% del total las horas de trabajo dedicadas a cuidados no remunerados, así como un 8% dedicadas a cuidados remunerados. De esta forma, se lleva a cabo un análisis que tiene en cuenta el conjunto de los trabajos llevado a cabo en la sociedad, siguiendo así los aportes realizados desde la economía feminista.

#### 4.1.1. Modelo de cálculo

En la realización del informe se diseñó un programa informático en *Python* que llevó a cabo el modelo de cálculo definido. El modelo tiene los siguientes principios [50]:

- La relación entre emisiones y tiempo de trabajo permanece constante para el grueso de los sectores de actividad económica en la próxima década. Se define esta hipótesis porque se asume que no habrá grandes disrupciones tecnológicas en el periodo analizado. En algunos sectores de actividad, se requieren ajustes en este cociente para reflejar aumentos de eficiencia, reducciones del consumo, procesos de desindustrialización o reconversiones.
- La evolución de cada uno de los subsectores de actividad es independiente de la del resto, excepto en unos pocos casos en los que existen acoples directos. Una parte importante de los acoples directos definidos están vinculados a una correlación fuerte entre la disponibilidad energética y la actividad económica de aquellos sectores dependientes de un alto consumo energético.
- La evolución de cada sector está sujeta a unos máximos y mínimos definidos, salvo excepciones, a partir de las series históricas de crecimiento de cada sector.

De esta forma, el programa realiza el cálculo de las horas de trabajo y las emisiones resultantes para 2030 en cada uno de los sectores a partir de los datos iniciales y de la variación anual porcentual definida en la construcción de los escenarios. En algunos casos, la evolución de un sector se define como dependiente de la evolución de otros sectores. Es así como se simulan las conexiones entre diferentes sectores dentro de la actividad económica. La dinámica dependiente modela un sector según una relación proporcional con otro sector o mediante la combinación lineal de uno o más sectores.

El modelo no establece ninguna restricción sobre las emisiones anuales resultantes de la simulación de los escenarios, así que hay libertad para que se incumplan las expectativas tanto de emisiones como de horas de trabajo en los escenarios definidos. Es a través de un proceso iterativo de análisis mediante el cual se termina de establecer en qué sectores se debe incidir de manera prioritaria.

#### 4.1.2. Escenarios y resultados principales

Se definen dos escenarios de transición ecológica que representan dos enfoques políticos y dos vías económico-institucionales diferentes para llevar a cabo la reducción de emisiones necesaria en la próxima década. Se trata de la propuesta de Green New Deal para el estado español [52] y la propuesta de Decrecimiento [53]. Pasamos a explicar brevemente cada una de ellas.

**Escenario Green New Deal (GND):** Se trata de una estrategia institucional para llevar a cabo una modernización ecológica de alta tecnología que estimule sectores económicos como el de las energías renovables industriales, las TIC o la eficiencia energética para dar lugar a una descarbonización rápida. Se impulsan también sectores como el agroecológico. Su apuesta política es la de un nuevo pacto social neokeynesiano, en el que se asume una continuidad en la estructura del metabolismo económico.

**Escenario Decrecimiento (D):** Parte de la necesaria, deseable e inevitable reducción robusta del consumo de energía y materiales en las sociedades contemporáneas. Las reducciones en las emisiones se logran mediante la construcción de economías más rurales, locales y destecnologizadas. Se trata de una transformación encaminada hacia metabolismos sociales de base agraria. Su apuesta política pasa por una búsqueda de mayor autonomía social, con respecto al Estado y con respecto a la mercantilización.

**Escenario Business as Usual (BAU):** Supone una continuación suave de las dinámicas ya en marcha en términos de crecimiento económico y desarrollo de sectores concretos. No representa un escenario de transición ecológica. Su función es tener una referencia con la que evaluar hacia donde nos dirigimos si no se toman medidas y comparar dicho resultado con los obtenidos para los otros dos escenarios de descarbonización.

Presentamos en la tabla 1 los resultados principales obtenidos en el informe para la variación de emisiones y tiempo de trabajo entre 2020 y 2030 según cada uno de los escenarios.

Tabla 1: Resultados principales emisiones y tiempo de trabajo

	BAU	GND	D
<b>Emisiones totales</b>	21 %	-55 %	-80 %
<b>Emisiones sin absorción forestal</b>	21 %	-45 %	-68 %
<b>Tiempo de trabajo</b>	6 %	2 %	1 %

La variación en las horas de trabajo presentada se refiere al conjunto de los trabajos, no únicamente los remunerados. Para complementarlo, se evalúan diferentes posibilidades de mercado de trabajo. De forma que aunque se de una reducción en el tiempo de trabajo remunerado para algunos casos, la aplicación de una jornada laboral de 30 horas haga que ello no se traduzca en una pérdida de empleo.

Las conclusiones a las que se llegan con los resultados obtenidos indican que el escenario BAU es incompatible con cualquier intento de afrontar la mitigación del cambio climático, pues supone un importante incremento de emisiones. Por su parte, el escenario GND avanza en la dirección adecuada, pero resulta insuficiente si se quiere integrar el compromiso con la justicia climática

global, que obliga a aquellos países con mayor responsabilidad histórica a asumir una reducción de emisiones superior a la marcada como objetivo a nivel mundial. El escenario D lograría alcanzar el nivel de reducción de emisiones necesario y climáticamente justo en términos globales.

En cuanto a la estructura productiva, el escenario D establece un proceso de primarización y ruralización significativo de la economía española, aunque los sectores secundario y terciario seguirían siendo mayoritarios. En el escenario GND, la matriz productiva es más similar a la actual, aunque con un mayor peso del sector energético, del sector público de cuidados y de las nuevas tecnologías. Por último, en términos laborales, si se aplicara una jornada de 30 horas semanales, se crearían 5 y 1,3 millones de nuevos empleos en los escenarios GND y D respectivamente.

#### 4.1.3. Adaptación modelo de cálculo al caso de consumo energético

Antes de replicar la metodología del informe para analizar la variación en el consumo energético, necesitamos validar uno de los principios sobre los que se asienta el modelo de cálculo para nuestro caso. Se trata del principio que determina que el cociente entre emisiones y tiempo de trabajo se puede considerar prácticamente constante a lo largo del periodo estudiado. Debemos comprobar si esto tiene una equivalencia en el cociente entre consumo energético y tiempo de trabajo.

Encontramos la comprobación empírica de este supuesto en el artículo *Finance, energy and the decoupling: an empirical study*, publicado en 2017 [54]. En el Anexo 4 se encuentra desarrollada la validación de este principio de cálculo a partir de los resultados de esta investigación. De esta forma, podremos considerar constante la relación entre consumo energético y horas de trabajo para el periodo de tiempo estudiado. Bajo este supuesto llevaremos a cabo la primera parte del cálculo. Posteriormente, siguiendo los pasos del informe original [50], se le aplicarán algunos factores de ajuste a determinados sectores, para representar transformaciones más profundas en ellos. La explicación de estos factores de ajuste se encuentra desarrollada en el Anexo 5.

#### 4.2. Recopilación y adaptación de los datos de partida

Una vez definido el modelo de cálculo y los escenarios estudiados en el informe en el que vamos a basarnos para este análisis, necesitaremos recopilar y adaptar los datos iniciales de consumo energético desagregados para todos los sectores estudiados. Aunque el punto de partida es 2020, en el informe se trabaja con los datos recopilados para 2017, por lo que aquí haremos lo mismo. Se trata de 86 sectores definidos a partir de la agrupación de diferentes categorías de la *Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE)*.

La única fuente de datos actualmente existente con un nivel de desagregación equivalente está en las *Cuentas de los flujos físicos de la energía*, PEFA por sus siglas en inglés [55]. Se trata de una herramienta estadística creada por la *Oficina Europea de Estadística (Eurostat)*. Nos basaremos en los datos de *uso neto de energía doméstica*, que se corresponde al consumo de energía primaria desagregado por sectores [56]. Así mismo, obtendremos los datos de la distribución porcentual de productos energéticos para todos los sectores, exceptuando aquellos en los que tiene lugar la transformación de productos energéticos primarios en secundarios [57].

En el Anexo 4 se puede encontrar la descripción de todos los sectores, la explicación en detalle de la recopilación de datos a partir de PEFA, la adaptación de los datos de aquellos sectores que así lo requieran y el conjunto de los datos iniciales de consumo de energía primaria para todos los sectores individuales estudiados. A continuación, presentamos en la tabla 2 los datos iniciales según

la agrupación de sectores definida en el informe.

Vemos cómo los sectores que representan un mayor porcentaje del consumo de energía primaria son el de energía, con un 30,3 % del total, seguido por el de cuidados no remunerados, con un 23,9 % del total. A estos les siguen el sector transporte, con un 15,4 % y el de industria, con un 11,2 % del consumo de energía primaria total.

Tanto en la contabilidad de PEFA como en los sectores definidos en informe original, una parte importante del consumo energético del transporte está incluida en el sector de cuidados no remunerados (actividades domésticas), correspondiente al uso del vehículo privado. Así mismo, hay consumos energéticos de transporte que están incluidos en otras actividades económicas que requieran el uso de transporte para desarrollar su producción o servicios. Los valores que se presentan recogidos bajo la categoría de “Transporte” son aquellos consumos relacionados específicamente con servicios de transporte. Esto en ningún caso supone una doble contabilidad de los consumos energéticos. En el Anexo 4 se presentan los detalles de la adaptación realizada sobre los datos iniciales de los sectores de transporte, así como la equivalencia entre los valores de consumo energético total aquí presentados y los recogidos en el *Libro de la Energía* [34].

Tabla 2: Datos iniciales de consumo energético con agrupación de sectores

Agrupación sectores	Consumo energético	
	[ktep]	[%]
<b>Alimentación</b>	6,160.8	4.7 %
<b>Silvicultura</b>	83.9	0.1 %
<b>Construcción</b>	6,432.4	4.9 %
<b>Energía</b>	39,984.9	30.3 %
<b>Residuos</b>	55.1	0.1 %
<b>Transporte</b>	20,343.6	15.4 %
<b>Turismo</b>	3,872.9	2.9 %
<b>Industria</b>	14,729.3	11.2 %
<b>Ocio</b>	610.8	0.5 %
<b>TIC</b>	438.1	0.3 %
<b>Finanzas</b>	437.7	0.3 %
<b>Investigación</b>	85.6	0.1 %
<b>Actividades estatales</b>	1,152.1	0.9 %
<b>Comercio</b>	2,789.8	2.1 %
<b>Otros servicios</b>	928.3	0.7 %
<b>Cuidados remunerados</b>	2,426.7	1.8 %
<b>Cuidados no remunerados</b>	31,498.5	23.9 %
<b>Total</b>	132,030.7	-

Para complementar, en la figura 4 se puede visualizar la distribución de productos energéticos según los sectores agrupados. En el Anexo 4 se presenta de forma completa los porcentajes de reparto de productos energéticos para cada uno de los sectores.

Para que no haya equívocos, merece la pena comentar que en el caso de la agrupación de sectores “Energía”, al no estar contabilizando los productos energéticos para los sectores Energ1 ni

Energ2, y al tener el consumo energético de Energ3 un valor nulo, únicamente se está representando la distribución de productos energéticos para Energ4, cuya actividad es la de “Extracción de combustibles fósiles”.

Con todos estos datos ya podremos pasar a ejecutar el modelo y obtener los resultados para los diferentes escenarios.

### DISTRIBUCIÓN INICIAL PRODUCTOS ENERGÉTICOS

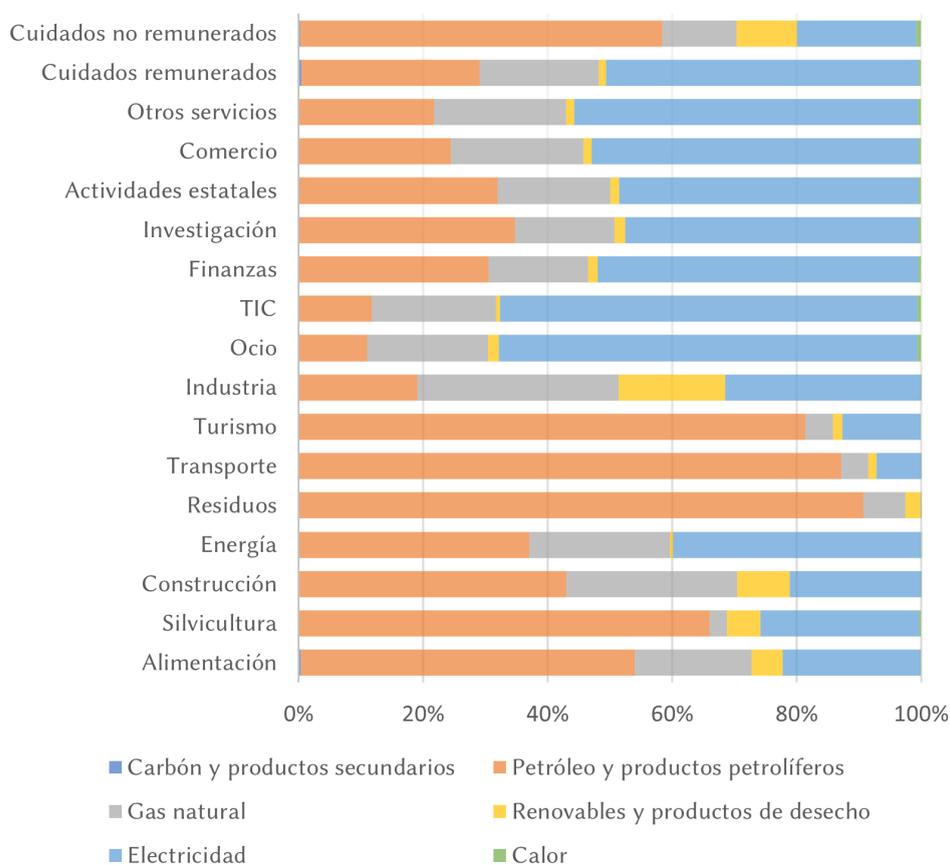


Figura 4: Distribución inicial productos energéticos según sectores agrupados

### 4.3. Resultados de consumo energético según escenarios en 2030

Una vez tenemos todos los datos iniciales necesarios recopilados y adaptados, podemos utilizar el modelo de cálculo desarrollado en el informe original mediante un programa de Python para realizar el cálculo de los tres escenarios que queremos analizar. Nuestra intención es que los resultados energéticos obtenidos se correspondan lo más posible con los resultados de horas de trabajo y emisiones del informe. Así que no realizamos apenas modificaciones sobre el programa original de Python.

Una vez ejecutado el modelo de cálculo mediante el programa, debemos ajustar mediante un paso más los resultados obtenidos. Esto es así porque en el informe se aplican diferentes factores de ajuste a algunos sectores para representar cambios más profundos de los considerados en el cálculo del modelo. Necesitaremos adaptar estos factores de ajuste, definidos en base al resultado de emisiones, para nuestro caso. Para ello desarrollamos unas pautas comunes con las que realizar

este ajuste de forma sistemática sobre todos los sectores que así lo requieren. La explicación de la metodología aplicada, así como todos los datos referidos al ajuste aplicado a los resultados, se encuentra desarrollado en el Anexo 5. Se pueden consultar los resultados obtenidos desagregados en los 86 sectores de actividad económica según los tres escenarios en el Anexo 6, así como los valores de distribución de productos energéticos para cada sector individual y las figuras que representan su variación.

#### 4.3.1. Resultados 2030 para el escenario BAU

Empezamos con la presentación de los resultados de consumo de energía primaria para 2030 según el escenario BAU. En la tabla 3 presentamos estos resultados por sectores agrupados, tanto en términos absolutos como la variación porcentual entre 2020 y 2030 y el peso que tiene la variación de cada sector sobre la variación en el consumo de energía primaria total.

Tabla 3: Resultados consumo energético 2030 para escenario BAU con agrupación de sectores

Agrupación sectores	Consumo energético 2030 - BAU		
	[ktep]	Variación 2020-2030 [%]	Peso sobre variación total [%]
Alimentación	6,390.5	3.7 %	1.4 %
Silvicultura	138.6	65.2 %	0.3 %
Construcción	7,730.3	20.2 %	7.8 %
Energía	48,983.4	22.5 %	54.2 %
Residuos	64.4	16.9 %	0.1 %
Transporte	21,102.2	3.7 %	4.6 %
Turismo	4,164.4	7.5 %	1.8 %
Industria	15,929.9	8.2 %	7.2 %
Ocio	644.4	5.5 %	0.2 %
TIC	783.7	78.9 %	2.1 %
Finanzas	520.5	18.9 %	0.5 %
Investigación	87.6	2.3 %	0.0 %
Actividades estatales	1,152.1	0.0 %	0.0 %
Comercio	3,389.5	21.5 %	3.6 %
Otros servicios	915.3	-1.4 %	-0.1 %
Cuidados remunerados	2,522.5	3.9 %	0.6 %
Cuidados no remunerados	34,098.9	8.3 %	15.7 %
<b>Total</b>	<b>148,618.2</b>	<b>12.6 %</b>	<b>-</b>

De esta forma vemos que se produce un incremento del 12,6 % en el consumo de energía primaria entre 2020 y 2030, siguiendo las transformaciones del escenario BAU. Lo cual en términos absolutos significa un aumento de 13.587,5 ktep. La mayor parte de este aumento, el 54,2 %, se le atribuye al sector de la energía. Mientras que el sector de cuidados no remunerados es responsable del 15,7 % del incremento. Observamos cómo se producen variaciones considerables en los sectores de TIC y silvicultura, con una variación interna de 78,89 % y 65,16 % respectivamente entre 2020 y 2030. Sin embargo, el peso de estas variaciones sobre el total es bastante escaso, de un 2,1 % y un 0,3 %. Los siguientes sectores con más peso sobre la variación total son el de la construcción, representando un 7,8 %, y el de la industria, representando un 7,2 %. En términos de variación interna, todos los

sectores experimentan incrementos a excepción del sector de otros servicios.

En la figura 6 podemos observar la representación de la variación entre 2020 y 2030 del consumo energético, de las emisiones y de las horas de trabajo según el escenario BAU. Los datos de emisiones y horas de trabajo son los obtenidos en el informe original, no resultados de este trabajo. En la mayoría de sectores vemos que emisiones y energía tienen una variación muy similar en este periodo, con las excepciones de turismo, TIC, silvicultura y cuidados no remunerados.

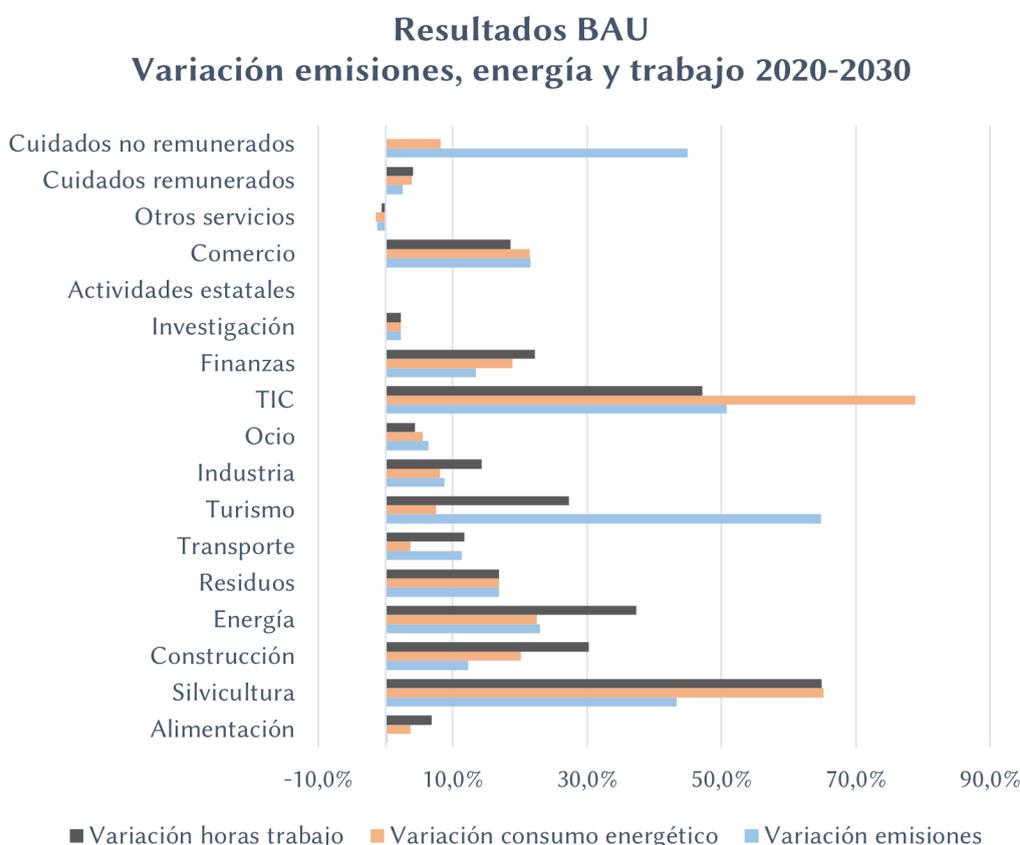


Figura 5: Variación del consumo energético y de las emisiones entre 2020 y 2030 según los resultados del escenario BAU

Apenas hay cambios en la distribución porcentual de productos energéticos dentro de cada uno de los sectores para este escenario. En términos de consumo total, el producto energético que más aumenta es la electricidad, con un 9,9%, seguido de los productos petrolíferos, con un 8,7%. El consumo de gas natural, por su parte descende un 1,3%.

#### 4.3.2. Resultados 2030 para el escenario GND

A continuación presentamos los resultados obtenidos para el caso del escenario Green New Deal. En la tabla 4 se pueden ver los resultados del consumo de energía primaria de cada sector, la variación interna experimentada por cada sector en el periodo 2020-2030 y el peso que representan esas variaciones con respecto a la variación en el consumo energético total.

Así, vemos cómo se produce una reducción del 38,0% en el consumo de energía primaria en entre 2020 y 2030 según las transformaciones definidas para el escenario GND. En términos absolutos, esta reducción se traduce en un descenso de 50.171,2 ktep. Observamos que el sector con más importancia en esta reducción es de los cuidados no remunerados, ocupando un peso negativo de 33,8% de la misma, seguido del sector de energía, con un 27,5%. El conjunto de los sectores experimentan reducciones internas en su consumo energético durante es periodo, a excepción del sector TIC y el de silvicultura. Estos experimentan un incremento interno de 107,2% y 183,9% respectivamente. Sin embargo, estos incrementos apenas ocupan un peso positivo de 0,9% y 0,3% respectivamente. Otro sector cuya variación tiene un peso considerable en la variación total del consumo de energía primaria es el de transporte, representando un 17,7% de la reducción total.

Tabla 4: Resultados consumo energético 2030 para escenario GND con agrupación de sectores

Agrupación sectores	Consumo energético 2030 - GND		
	[ktep]	Variación 2020-2030 [%]	Peso sobre variación total [%]
<b>Alimentación</b>	5,576.0	-9.5 %	-1.2 %
<b>Silvicultura</b>	238.3	183.9 %	0.3 %
<b>Construcción</b>	3,108.6	-51.7 %	-6.6 %
<b>Energía</b>	26,207.5	-34.5 %	-27.5 %
<b>Residuos</b>	48.2	-12.5 %	0.0 %
<b>Transporte</b>	11,467.3	-43.6 %	-17.7 %
<b>Turismo</b>	1,544.8	-60.1 %	-4.6 %
<b>Industria</b>	12,338.3	-16.2 %	-4.8 %
<b>Ocio</b>	491.6	-19.5 %	-0.2 %
<b>TIC</b>	907.9	107.2 %	0.9 %
<b>Finanzas</b>	255.4	-41.7 %	-0.4 %
<b>Investigación</b>	52.5	-38.6 %	-0.1 %
<b>Actividades estatales</b>	653.5	-43.3 %	-1.0 %
<b>Comercio</b>	1,451.5	-48.0 %	-2.7 %
<b>Otros servicios</b>	688.4	-25.9 %	-0.5 %
<b>Cuidados remunerados</b>	2,294.7	-5.4 %	-0.3 %
<b>Cuidados no remunerados</b>	14,535.0	-53.9 %	-33.8 %
<b>Total</b>	81,859.5	-38.0 %	-

En la figura 6 podemos observar la representación de la variación porcentual de consumo energético, emisiones y horas de trabajo para cada uno de los sectores. Los datos de emisiones y horas de trabajo son los obtenidos en el informe original, no resultados de este trabajo. Observamos como la variación es muy similar para emisiones y energía en todos los casos, con las excepciones de TIC y silvicultura. Por su parte, vemos cómo las horas de trabajo aumentan en varios sectores que experimentan reducciones de consumo energético y de emisiones, como es el caso de energía, ocio, alimentación o cuidados remunerados.

Si atendemos a la distribución de productos energéticos, comprobamos que aumenta considerablemente el porcentaje que ocupa la electricidad en el sector de cuidados no remunerados. También se puede apreciar un aumento del peso de la electricidad en el sector del transporte. En el resto de sectores, apenas hay grandes variaciones. Con respecto a la variación en términos absolutos del

consumo de productos energéticos, los productos petrolíferos son los que experimentan la mayor reducción, con un 56,0 %, mientras que el consumo de gas natural desciende en un 39,3 %. A pesar de que la electricidad gane mayor peso en sectores como los cuidados no remunerados o el transporte, en términos globales su consumo desciende en un 6,5 %.

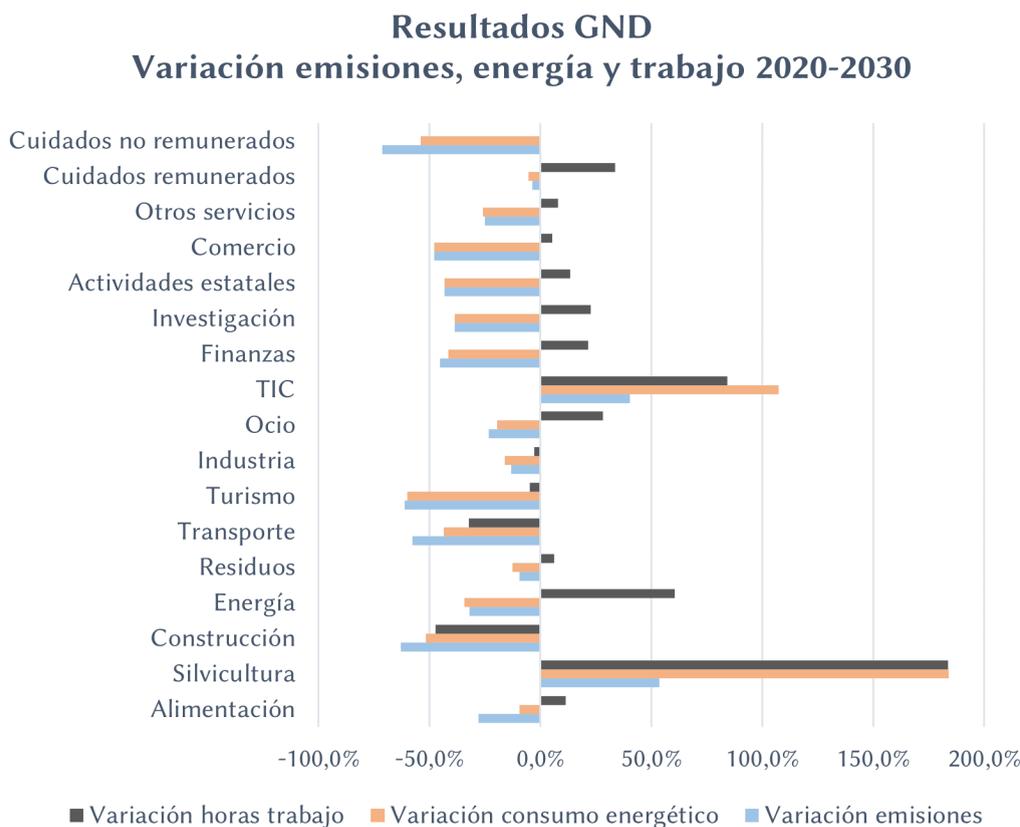


Figura 6: Variación del consumo energético y de las emisiones entre 2020 y 2030 según los resultados del escenario GND

#### 4.3.3. Resultados 2030 para el escenario D

Por último, para concluir con la presentación de los resultados obtenidos, se pueden encontrar en la tabla 5 los valores correspondientes al consumo de energía primaria de los sectores agrupados, la variación interna entre 2020-2030 para cada uno de ellos y el peso que representa esa variación interna sobre la variación total, según el escenario D.

Observamos que se experimenta una reducción del 61,2 % en el consumo de energía primaria en entre 2020 y 2030 según las transformaciones definidas para el escenario D. En términos absolutos, esta reducción se traduce en un descenso de 80.774,1 ktep. El sector que adquiere mayor centralidad en este descenso es el de la energía, representando un 41,0 % del mismo, seguido por el sector de los cuidados no remunerados, con un 23,6 %. El otro sector que mayor porcentaje de la variación total representa es el sector transporte, ocupando un 16,3 % del total. El sector de silvicultura experimenta una fuerte variación interna positiva, aumentando en un 228,5 % su consumo de energía primaria. Sin embargo, esta variación en términos absolutos apenas supone un 0,2 % positivo con respecto al descenso total.

Tabla 5: Resultados consumo energético 2030 para escenario D con agrupación de sectores

Agrupación sectores	Consumo energético 2030 - D		
	[ktep]	Variación 2020-2030 [%]	Peso sobre variación total [%]
<b>Alimentación</b>	6,083.1	-1.3 %	-0.1 %
<b>Silvicultura</b>	275.7	228.5 %	0.2 %
<b>Construcción</b>	2,580.1	-59.9 %	-4.8 %
<b>Energía</b>	6,862.3	-82.8 %	-41.0 %
<b>Residuos</b>	46.5	-15.7 %	0.0 %
<b>Transporte</b>	7,159.5	-64.8 %	-16.3 %
<b>Turismo</b>	507.9	-86.9 %	-4.2 %
<b>Industria</b>	10,215.5	-30.6 %	-5.6 %
<b>Ocio</b>	445.6	-27.0 %	-0.2 %
<b>TIC</b>	263.4	-39.9 %	-0.2 %
<b>Finanzas</b>	167.7	-61.7 %	-0.3 %
<b>Investigación</b>	43.8	-48.9 %	-0.1 %
<b>Actividades estatales</b>	564.3	-51.0 %	-0.7 %
<b>Comercio</b>	1,279.2	-54.1 %	-1.9 %
<b>Otros servicios</b>	607.2	-34.6 %	-0.4 %
<b>Cuidados remunerados</b>	1,754.6	-27.7 %	-0.8 %
<b>Cuidados no remunerados</b>	12,400.3	-60.6 %	-23.6 %
<b>Total</b>	51,256.6	-61.2 %	-

En la figura 7 podemos encontrar la representación gráfica de la variación porcentual del consumo energético, de las emisiones asociadas a cada uno de los sectores y de las horas de trabajo bajo este escenario. Consumo energético y emisiones evolucionan de forma muy equivalente para todos los sectores, con la excepción de silvicultura, donde el incremento del consumo energético es considerablemente mayor al incremento de las emisiones. Así mismo, destaca el ligero aumento de las horas de trabajo en los sectores de cuidados no remunerados, ocio y energía, que tiene lugar al mismo tiempo que se reduce el consumo energético asociado.

En este escenario tienen lugar mayores variaciones sobre la distribución de productos energéticos. En el caso del sector de cuidados no remunerados, los productos petrolíferos pasan de representar un prácticamente un 60 % del consumo a ocupar menos del 25 %, mientras que la electricidad pasa de un 20 % a un 50 %. De forma similar, en el sector del turismo, los productos petrolíferos pasan de representar más del 80 % del consumo a menos del 50 % bajo este escenario. Y cambios similares se pueden observar para los sectores de transporte y alimentación, donde los productos petrolíferos reducen su centralidad, y aumenta el porcentaje correspondiente a la electricidad. Para el resto de sectores no se aprecian variaciones tan considerables. Por su parte, la mayor variación en el consumo total de productos energéticos es la experimentada por los productos petrolíferos, que se ven reducidos en un 71,7 %, mientras que el consumo de gas natural se reduce en un 44,4 %. De igual forma que en el caso del escenario anterior, vemos que a pesar de que la electricidad haya ganado centralidad en la distribución de productos energéticos de varios sectores, en términos totales experimenta una reducción en su consumo de 12,6 %.

## Resultados D

### Variación emisiones, energía y trabajo 2020-2030

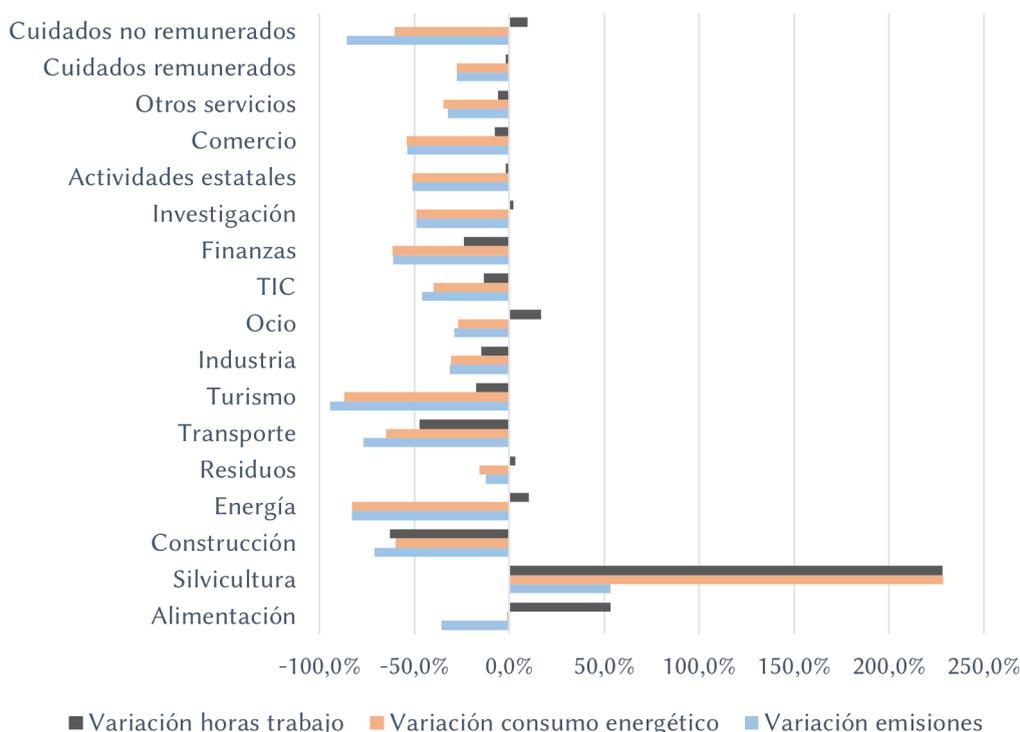


Figura 7: Variación del consumo energético y de las emisiones entre 2020 y 2030 según los resultados del escenario GND

#### 4.3.4. Comparación entre resultados de escenarios

Para analizar y comparar los resultados obtenidos, lo primero que debemos hacer es recordar las limitaciones iniciales de las que partíamos. Al estar trabajando con unos datos recopilados según el *principio residencial* en lugar del habitual *principio territorial*, existen ciertas discrepancias con respecto a los datos de organismos estatales oficiales. Si bien en la tabla 15 hemos podido realizar la “traducción” para los datos de consumo de energía primaria, no nos aventuramos a realizar una conversión similar para los resultados obtenidos para 2030 según los tres escenarios, pues son varios los parámetros de los que no tenemos los datos necesarios. Por este motivo, las comparaciones en el consumo de energía primaria las realizaremos con respecto al valor de consumo energético total obtenido en las simulaciones.

Lo que encontramos es que mientras el escenario BAU experimenta un incremento del consumo de energía primaria del 12,6% en el periodo estudiado, tanto el escenario GND como el D experimentan una reducción del 38,0% y 61,2% respectivamente. En ambos casos, este descenso energético está gobernado por las transformaciones estructurales realizadas sobre el sector de la energía, el de los cuidados no remunerados y el del transporte. En los dos escenarios, el sector de la silvicultura experimenta una gran variación interna positiva, sin embargo su peso sobre el valor absoluto de la reducción de consumo es muy reducido. En el escenario GND también se experimenta un incremento interno positivo en el sector TIC, aunque también con poco peso sobre el total.

El resto de sectores experimentan variaciones internas negativas sobre su consumo energético para ambos escenarios.

El incremento del consumo energético del sector de la silvicultura debe ser interpretado como una consecuencia directa del fuerte aumento de las horas trabajadas en este sector para ambos escenarios, exactamente en los mismos porcentajes. Dado que en el informe original no se aplicó ningún factor de ajuste adicional sobre este sector, se mantiene el cociente constante entre consumo energético y horas de trabajo durante el periodo estudiado. Sin embargo, podríamos considerar que el consumo energético inicial no escalaría de forma directa con las horas de trabajo para este caso, pues dentro de las transformaciones descritas se consideran unos trabajos que usen menos maquinaria y un aumento del uso de la fuerza física humana, sobretodo para el escenario D. Como el enfoque de este trabajo es replicar los cálculos del informe original, no realizados ninguna modificación al respecto, pero en un análisis posterior debería considerarse.

Por otro lado, consideramos importante realizar alguna aclaración con respecto a los incrementos del consumo energético del sector TIC. Si bien hemos indicado que las variaciones positivas en el consumo energético de este sector para los escenarios BAU y GND no tienen un gran peso con respecto a la variación total, debemos recordar las limitaciones que suponen trabajar con un análisis territorial/residencial. En el caso de las TIC, este enfoque deja fuera el consumo energético de la infraestructura de las tecnologías de información que están ubicadas fuera de las fronteras estatales, especialmente los centros de datos. De esta forma, lo que representa unos pequeños incrementos en el consumo energético estatal, estaría colaborando al proceso general de digitalización de la sociedad, impulsando así la ampliación de dichas infraestructuras, muy intensivas energéticamente. Estudios como el de Belkhir y Elmeligi [58] advierten del elevado impacto que pueden tener en el futuro las tendencias actuales del sector TIC, con un los centros de datos siendo responsables de la mayor parte del mismo. Por esos motivos, un análisis posterior debería profundizar en estas relaciones y ampliar el foco del cálculo para representar las consecuencias reales de estos incrementos en el sector TIC sobre el consumo energético mundial.

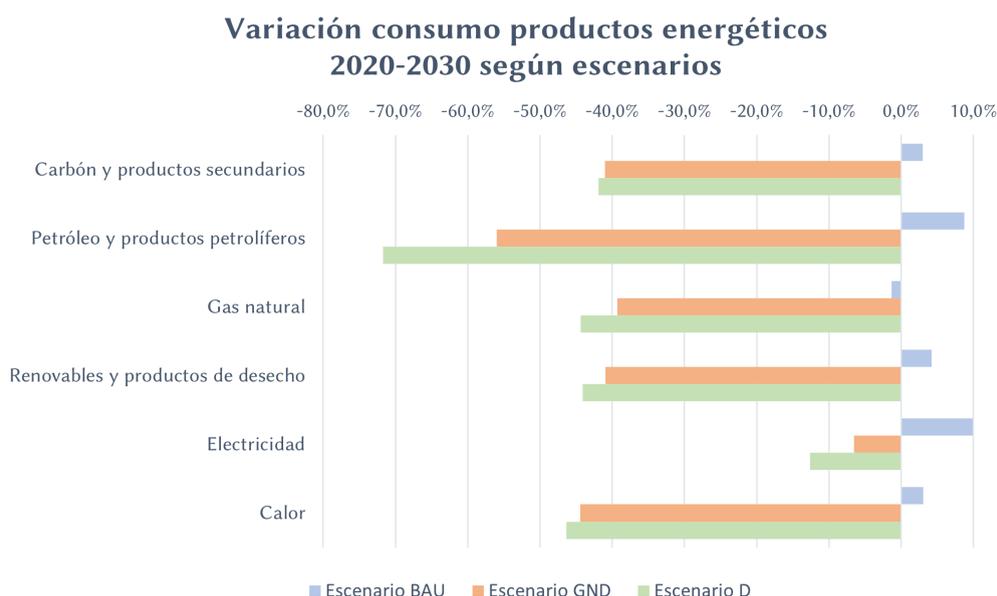


Figura 8: Variación del consumo total de productos energéticos entre 2020 y 2030 según los escenarios BAU, GND y D

Para ambos escenarios de transición ecológica, se comprueba como el consumo de productos petrolíferos disminuye su centralidad en los sectores de cuidados no remunerados y transporte. Siendo estos dos de los sectores con mayor peso sobre el descenso energético total. Mientras que en el escenario D esto también ocurre para los sectores del turismo y de la alimentación. Las mayores reducciones en el consumo de productos petrolíferos tienen lugar bajo el escenario D, con una reducción del 71,7%, mientras que la reducción en el escenario GND es del 56,0%. Recordando las previsiones de producción de petróleo mencionadas en la sección 1, podríamos comparar esos valores con una reducción de en torno al 60% en 2040, si esta se repartiera de forma equitativa a nivel mundial. Así mismo, tanto en el escenario GND como en el D, disminuye el consumo total de electricidad, en un 6,5% y 12,6% respectivamente. En la figura 8 se representa la variación que experimenta el consumo total de cada producto energético según los escenarios.

Para realizar un análisis de los productos energéticos y del consumo de energía final resultante para 2030 según los tres escenarios necesitaremos realizar una adaptación. Hemos indicado anteriormente que nuestra intención era evaluar los porcentajes de variación obtenidos para el consumo de productos energético, más que los valores absolutos obtenidos. Esto es así porque los datos iniciales de los que partíamos no nos aportaban la información de consumo de energía final de forma directa, sino que hemos tenido que extraerlo de algunos otros parámetros, y existen ciertas discrepancias. Sin embargo, si partimos de los valores oficiales del *Libro de la Energía* [34] podemos traducir los porcentajes de variación obtenidos para cada uno de los productos energéticos en valores absolutos de consumo de energía final de cada uno de los escenarios para el año 2030. Esto es lo que hemos representado en la figura 9.

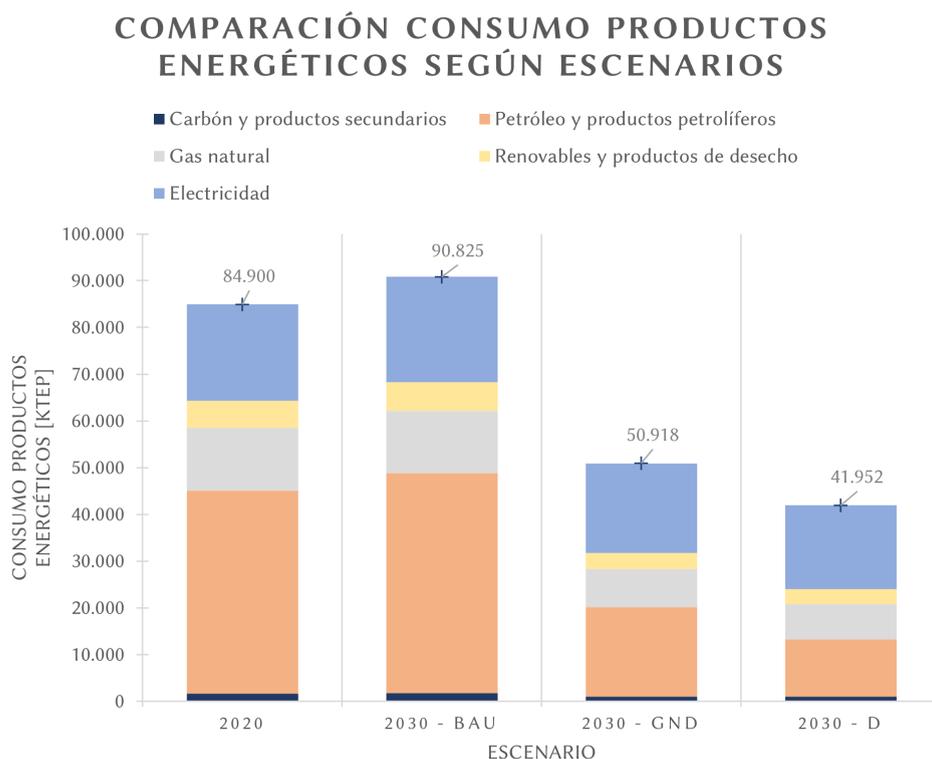


Figura 9: Comparación entre el consumo de productos energéticos según los diferentes escenarios

De esta forma, obtendríamos un consumo de productos energéticos, equivalente al consumo de energía final, de 90.825 ktep, 50.918 ktep y 41.952 ktep respectivamente para 2030 según los escenarios BAU, GND y D. Si calculamos la relación entre estos valores de consumo de energía final y consumo de energía primaria, los valores de 61,1 %, 62,2 % y 81,8 % para los escenarios BAU, GND y D respectivamente. Lo que esto significa es que las transformaciones estructurales definidas lograrían una mejora de la eficiencia global en el proceso de transformación energético bajo el escenario D. La forma en la que esto ocurriría sería a partir de una reducción del porcentaje del uso de combustibles fósiles, que tienen grandes pérdidas energéticas en su proceso de conversión a energía eléctrica. Esto está directamente relacionado con el gran peso que ocupa la variación del consumo del sector de la energía sobre la variación total en este escenario. Recordamos que hemos considerado equivalentes los valores de consumo de energía primaria y consumo de energía final para todos los sectores a excepción de Energía 1, Energía 2, Industria 4 e Industria 7, pues son aquellos en los que se realiza la transformación de productos energéticos primarios en productos energéticos secundarios.

Tabla 6: Conjunto de resultados principales para los tres escenarios

	BAU	GND	D
<b>Consumo energía primaria</b>	13 %	-38 %	-61 %
<b>Consumo energía final</b>	7 %	-40 %	-51 %
<b>Emisiones totales</b>	21 %	-55 %	-80 %
<b>Emisiones sin absorción forestal</b>	21 %	-45 %	-68 %
<b>Tiempo de trabajo</b>	6 %	2 %	1 %

A partir de estos resultados, podemos obtener los porcentajes de reducción tanto del consumo de energía primaria como del consumo de energía final. En la tabla 6 presentamos estos resultados, acompañados de los resultados principales hallados en el informe original.

Para comparar estos resultados con las consideraciones realizadas en las secciones previas de este trabajo, presentamos los valores de consumo de energía primaria y de energía final a valores per cápita. Para ello, hacemos uso de las proyecciones demográficas aportadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) para el año 2030, que consideran una población de 47,75 para ese año [35]. En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos para los tres escenarios evaluados.

Tabla 7: Consumo de energía primaria y final per cápita en 2030 según los tres escenarios

	BAU	GND	D
<b>Consumo energía primaria [GJ/cap]</b>	130.3	71.8	44.9
<b>Consumo energía final [GJ/cap]</b>	79.6	44.6	36.8

Nuestra intención es comparar estos resultados con el umbral definido en secciones anteriores como el objetivo de descenso energético que alcanzar en 2050. Recordemos que el umbral definido en secciones anteriores establecía el mínimo consumo anual de energía final per cápita en 15,8 GJ y el máximo en 31,0 GJ, para el caso del estado español. Por lo tanto, ninguno de los tres escenarios logra un descenso que sitúe al consumo de energía final per cápita en ese umbral, pero

debemos recordar que estos valores son los obtenidos para las transformaciones realizadas entre 2020 y 2030. Lo que vemos es cómo el consumo anual de energía final 36,8 GJ per cápita obtenido para el escenario D se aproxima considerablemente al umbral definido. Sobre el valor de 44,6 GJ per cápita obtenido para el escenario GND podemos indicar que avanza en la dirección adecuada. No podemos realizar una comparación directa con los valores presentados anteriormente en la figura 3, pues ahí se estaba midiendo la huella de energía final, mientras que nuestros resultados son de ámbito territorial.

Por lo tanto, estos resultados puestos en el contexto global señalan que las transformaciones estructurales descritas por el escenario D serían las que más nos aproximarían al descenso energético que le corresponde al estado español. En ambos escenarios, las reducciones experimentadas por ambos escenarios son muy considerables. Más todavía teniendo en cuenta que el marco temporal en el que se sitúa el umbral de consumo anual de energía final per cápita con el que estamos realizando la comparación es el de 2050. Por lo que, en caso de llevarse a cabo estas transformaciones, todavía quedarían 20 años para profundizar el descenso energético. La diferencia entre ambos escenarios tiene más que ver con las consideraciones en las que se basan. Mientras que el escenario GND describe una modernización de alta tecnología, así como un incremento de las energías renovables industriales y las TIC, el escenario D describe una transformación hacia economías más rurales, locales y destecnologizadas. Lo que habría que evaluar es si el escenario descrito para el GND sería realmente compatible con los descensos del consumo energético que aquí hemos obtenido. Al basarse en un enfoque político nekeynesiano, la fuerte inversión pública prevista podría verse especialmente comprometida por la reducción del crecimiento económico que acompañaría a estos descensos en el consumo energético.

En cuanto a la forma en la que se conseguirían estas reducciones en la demanda energética, podemos diferenciar tres enfoques diferentes a partir de los resultados obtenidos. En primer lugar, tenemos las transformaciones realizadas sobre el sector de la energía, en el que se experimenta el 27,5 % y el 41,0 % del descenso total según los escenarios GND y D. Para explicar esto acudimos al Anexo 6 y observamos los resultados de este sector desagregados. Comprobamos cómo tanto en GND y en D se reduce el consumo del sector Energía 1, correspondiente a “coquerías y refino de petróleo”, desde 9.087,7 ktep hasta 1.559,6 ktep. Lo cual es coherente con la fuerte reducción en el consumo de productos petrolíferos en ambos escenarios, y con la perspectiva de un descenso mundial de la producción de petróleo. En el caso del sector Energía 2, correspondiente a “suministro de energía eléctrica no renovable, vapor y aire acondicionado”, el escenario GND reduciría el consumo de energía primaria desde 30.774,2 ktep en 2020 hasta 24.626,7 ktep en 2030, mientras que el escenario D lo reduciría hasta 5.281,5 ktep. Dado que en ambos escenarios el consumo de eléctrica descende, pero no existen grandes diferencias en los valores absolutos resultantes para 2030, podríamos interpretar esto como un uso mucho mayor de las energías renovables para la producción de electricidad en el escenario D. Aunque es cierto que este resultado debería revisarse con más profundidad en análisis posteriores, pues una de las características del escenario GND era un incremento de las tecnologías de energías renovables modernas.

En segundo lugar, nos fijamos en los resultados desagregados del sector del transporte presentados en el Anexo 6. Este sector ocupa un 17,7 % y un 16,3 % del descenso total de energía primaria según las transformaciones de los escenarios GND y D. La mayor diferencia entre ambos escenarios la encontramos en el sector Transporte 9, correspondiente a “navegación internacional”. Pasarían de un consumo de 6,681,8 ktep en 2020 hasta 3,808,6 ktep y 1.135,9 ktep en 2030 según los escenarios GND y D. Esto representa una reducción muy considerable de unas cadenas de suministro globalizadas, que son muy intensivas energéticamente y también dependientes de unos productos

petrolíferos que disminuirán su disponibilidad en ese periodo. Las transformaciones descritas para el escenario D lograrían una mayor reducción de la dependencia con respecto a estas cadenas de suministro, al estar enfocado hacia una economía más local. Así mismo, ambos escenarios experimentan una fuerte reducción en el sector Transporte 10, correspondiente a “transporte aéreo”, pasando de 1.359,1 ktep en 2020 a 174,0 ktep para ambos escenarios. En el caso del sector Transporte 7, correspondiente a “transporte terrestre por carretera”, se reduce desde los 8.301,1 ktep consumidos en 2020 hasta 3.287,4 ktep y 2.037,2 ktep según los escenarios GND y D. Por último, en ambos escenarios el sector Transporte 5, correspondiente a “transporte terrestre por ferrocarril con motor eléctrico”, experimentan un aumento que hace que el consumo de energía pase de 432,4 ktep en 2020 hasta los 1.420,2 ktep en 2030 para ambos escenarios. De esta forma, las transformaciones aquí descritas, que lograrían estos descensos, tienen que ver con abandonar la dependencia con cadenas de suministro globalizadas y desarrollar unos sistemas sociotécnicos que permitan abandonar la necesidad del uso masivo del transporte por carretera, aumentando el uso del transporte público colectivo basado en ferrocarriles eléctricos.

Por último, analizamos brevemente las transformaciones que posibilitan un fuerte descenso en el consumo energético del sector de cuidados no remunerados. Las variaciones en este sector representan un 33,8 % y un 23,6 % del descenso energético de los escenarios GND y D respectivamente. Recordamos que este sector es el que normalmente es presentado como consumo energético en hogares, e incluye usos energéticos de transporte, climatización y otros usos. A este sector se le han realizado unas transformaciones específicas, independientes el modelo de cálculo, que puede encontrarse explicadas en el Anexo 5. Observaremos los valores presentados en la tabla 24. Ahí encontramos como el consumo energético atribuido al apartado de transporte del sector de cuidados no remunerados pasa de 16.197,9 ktep en 2020 hasta 3.873,9 ktep y 1.739,2 ktep según los escenarios GND y D. Mientras que el apartado de climatización desciende desde los 9.278,92 ktep en 2020 hasta los 4.639,46 ktep en ambos escenarios. La forma en la que podemos comprender el primer descenso pasa por unas transformaciones sociotécnicas que permitan desarrollar unos entornos y unas prácticas sociales que requieran una movilidad mucho menor. En el caso del segundo descenso, la reducción en el consumo energético de climatización tiene que ver con el desarrollo de unas medidas de suficiencia energética que permitan cubrir las necesidades de mantener unas temperaturas adecuadas con métodos que no pasen necesariamente por el uso de dispositivos muy intensivos energéticamente.

De esta forma vemos cómo los descensos energéticos que se obtienen como resultado de las transformaciones estructurales descritas por los escenarios de transición ecológica GND y D, se relacionan con los factores que hemos descrito en secciones anteriores. Estos escenarios deberán abordar una contracción de la esfera económica que reduzca la producción y el consumo, unas transiciones sociotécnicas a gran escala que permitan salir de unas dependencias muy intensivas energéticamente, especialmente en el caso del transporte, una reducción progresiva de la dependencia de las cadenas globalizadas de suministros y unas medidas de suficiencia energética que permitan satisfacer las necesidades básicas para una vida digna mediante procesos que consuman mucha menos energía.

## 5. Conclusiones y discusión

En este trabajo hemos partido de una lectura que interpreta la situación global presente y futura en términos de *crisis civilizatoria*, en la que estamos viviendo los efectos de diferentes fracturas metabólicas, causadas por el actual modelo económico y de desarrollo. Nos hemos centrado en la cuestión de la demanda energética porque juega un papel clave tanto en los procesos de transición ecológica como en las transformaciones de la esfera económica. Para ello, hemos recorrido diferentes consideraciones que nos guían en el descenso energético de las próximas décadas, que posteriormente hemos completado con un análisis de caso para diferentes escenarios de transición ecológica en el estado español entre 2020 y 2030. Podemos resumir las conclusiones de este trabajo en seis puntos:

1. **Reducción del consumo global:** Partimos de la base de que necesitamos limitar las peores consecuencias del calentamiento global sin depender de tecnologías de emisiones negativas, cuya efectividad está muy en duda. Necesitamos sustituir la matriz energética fósil por una basada en energías renovables, pero eso no puede implicar llegar hasta el agotamiento de los minerales necesarios para estas tecnologías, ni unos severos daños sobre la biodiversidad y las comunidades locales de las regiones donde se lleva a cabo el extractivismo. Para lograr ambas cosas, se impone la condición de una reducción en el consumo de energía a nivel global. Sin embargo, la previsible disminución en la producción de petróleo y las bajas tasa de retorno energético de las tecnologías de captación de energías renovables hacen que este descenso deje de ser una opción a elegir, y corra el riesgo de convertirse en un declive energético impuesto.
2. **El consumo energético actual no se corresponde al bienestar:** Un descenso energético no debería suponer un empeoramiento de las condiciones de vida. Lo que se observa es cómo el consumo energético se desacopla de la satisfacción de necesidades humanas a partir de cierto nivel de saturación. Esto hace que aquellos países que más energía consuman puedan reducir considerablemente esa demanda sin que ello se traduzca en que sus habitantes vivan peor. Lo contrario ocurriría en aquellos países que actualmente consumen menos energía, un ligero aumento en la demanda podría traducirse en una mejora significativa de las condiciones de vida. El nivel de consumo energético actual a nivel mundial es muy superior al que sería necesario para garantizar unas condiciones de vida digna al conjunto de la población mundial, ambos factores están desacoplados.
3. **Umbral de consumo mínimo y consumo máximo:** A partir de las dos conclusiones anteriores, podemos definir el umbral bajo el que debería regirse el descenso energético de las próximas décadas. El objetivo de consumo de energía final mínima para 2050 sería de 149 EJ, correspondiéndose con el nivel necesario para asegurar una vida digna al conjunto de la población mundial. El objetivo de consumo de energía final máximo para 2050 se situaría en los 245 EJ, correspondiente a la demanda energética con la que se podrían realizar las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con los presupuestos de carbono que limitarían el calentamiento global a 1,5 °C. Presentados en términos de consumo anual de energía final per cápita, para el caso del estado español, este umbral iría desde 15,8 GJ como mínimo hasta 31,0 GJ como máximo.
4. **Redistribución en el descenso energético:** El consumo energético actual es profundamente desigual. La minoría de la población con más ingresos es responsable de la mayor parte de la demanda energética. Esta desigualdad se acentúa especialmente en categorías como el transporte. El descenso energético debe ser un proceso en el que se corrijan estas desigualdades y se redistribuya el acceso a la energía. Son los países del Norte global los que deben asumir la mayor parte de las reducciones en el consumo. En términos de huella energética,

el 77 % con menos ingresos de la población mundial ya se encuentra dentro del umbral que define un consumo anual de energía final máximo en 31,0 GJ. Así mismo, el 38 % con menos ingresos de la población mundial se encuentra por debajo del valor mínimo. El proceso del descenso energético deberá ser asumido por el 23 % más rico de la población mundial, y deberá permitir que aumenten su consumo energético aquellos sectores que no llegan actualmente al nivel mínimo para una vida digna. Según el análisis de la huella de energía final por tramos de ingresos para el caso del estado español, el 20 % con menos ingresos de la población (Q1) se encontrarían ya dentro del umbral máximo definido en este trabajo. Por lo que la reducción en la huella de energía final que debería asumirse sería del 69,2 % para 20 % con más ingresos de la población (Q5), del 57,4 % para el Q4, del 47,4 % para el Q3 y del 30,5 % para el Q2.

5. **Transformaciones estructurales para llevar a cabo el descenso:** Para lograr llevar a cabo estas profundas reducciones en el consumo energético de los países del Norte global es necesario rechazar el marco impuesto del crecimiento económico y avanzar hacia una contracción de la esfera económica que reduzca la producción y el consumo. Serán necesarias transiciones sociotécnicas a gran escala que dismantelen las infraestructuras y relaciones sociales que establecen una fuerte dependencia hacia usos muy intensivos energéticamente. El enfoque de la eficiencia energética se ha mostrado incapaz de lograr reducciones efectivas de la demanda, y puede llegar a ser contraproducente al reproducir y perpetuar unas concepciones de servicios energéticos que no se pueden mantener. Frente a ello, deberán llevarse a cabo transformaciones hacia la suficiencia energética, que realicen un análisis no neutral de las actuales tecnologías industriales y estén en encaminadas hacia sociedades más convivenciales.
6. **El descenso energético en el estado español:** Aproximarse a estos niveles de descenso energético sería posible en el estado español a partir de transiciones ecológicas disruptivas. Este es el caso de los escenarios analizados de Green New Deal y de Decrecimiento. Los resultados obtenidos definen un consumo anual de energía final per cápita de 44,6 GJ y 36,8 GJ para 2030 según cada uno de los escenarios respectivamente. Esto se aproxima bastante al umbral que hemos definido como objetivo, y aun restarían dos décadas para terminar de recorrer el camino. Se reduce en ambos casos el consumo de productos petrolíferos de forma severa y el consumo de electricidad de forma ligera. Estas reducciones se consiguen fundamentalmente por fuertes reducciones en el consumo de los sectores de energía, transporte y cuidados no remunerados. Estas transformaciones se corresponden con estrategias de transiciones sociotécnicas a gran escala, medidas de suficiencia energética, reducción del combustibles fósiles en el mix eléctrico y reducción de la dependencia de cadenas de suministros globalizadas.

Consideramos que estas conclusiones determinan la forma en la que se deberían abordar las transiciones ecológicas y energéticas en las próximas décadas. El análisis de los resultados cuantitativos para 2030 de los escenarios GND y D exige cierta cautela, dadas las limitaciones del cálculo y de la fuente de datos. Así mismo, reiteramos que sería necesario un análisis completo en términos de huella energética que nos facilite una comprensión más profunda del metabolismo de la economía del estado español, inserto en unas cadenas de comercio internacional. A pesar de estas limitaciones, el trabajo aquí presentado apunta hacia los escenarios y estrategias de descenso energético que deberán recorrerse en el futuro próximo, señalando los retos cuantitativos y cualitativos de este proceso. Estos resultados nos permiten analizar con rigurosidad las decisiones y sendas de transición ecológica iniciadas desde el presente.

Los escenarios, comprensiones y paquetes de políticas públicas que dominan actualmente el ámbito de la transición ecológica en la Unión Europea representan un enfoque que profundiza las

fuertes desigualdades mundiales existentes, mantiene la lógica del crecimiento económico y profundiza los procesos extractivistas de recursos minerales en el Sur global [59]. Así mismo, ya han empezado a surgir en el estado español diversos conflictos territoriales por la imposición desde grandes empresas de grandes infraestructuras de tecnologías de captación de energías renovables sobre medio rural [60]. La lógica de la transición que se presenta actualmente como dominante es la *verde y digital*, aunque aquello resulte un oxímoron [61].

Las décadas que tenemos por delante son absolutamente vitales para limitar las peores consecuencias de la crisis ecológica y empezar a remediar las rupturas metabólicas sobre las que se han asentado las sociedades actuales. Para ello, desde los países del Norte global, se deben asumir las responsabilidades históricas sobre la situación actual y abordar reducciones severas en su consumo energético. Aquí hemos tratado de presentar una primera aproximación a esta tarea.

### 5.1. Futuras líneas de investigación

Las limitaciones de este trabajo han hecho que hayamos tenido que tomar algunas simplificaciones y realizar el cálculo mediante un modelo que no llega a considerar la complejidad que realmente supondría una transición de estas características. Así mismo, se podría profundizar mucho más en cada una de las cuestiones presentadas en las tres secciones iniciales. Por ello, presentamos a continuación algunas líneas que consideramos interesantes para reforzar y profundizar sobre esta primera aproximación a la cuestión de escenarios y estrategias de descenso energético:

- Realizar el cálculo de los escenarios mediante herramientas de dinámica de sistemas, como puede ser el caso del modelo MEDEAS.
- Complementar los resultados con un análisis del metabolismo energético del estado español.
- Profundizar sobre la cuestión de las transiciones sociotécnicas a gran escala que reduzcan la dependencia de altos consumos energéticos.
- Obtener más información sobre la aplicación de los enfoques de la suficiencia energética más allá de ámbitos de consumo doméstico.
- Cuantificar la huella energética de las actuales cadenas de suministro globales de las que depende el estado español y señalar vías de reducción.

## Anexo 1

### Ampliación: Razones para un descenso energético

En este anexo presentamos la ampliación de la recopilación bibliográfica realizada sobre las razones que justifican abordar con urgencia las transformaciones que nos conduzcan a un descenso energético a nivel mundial. En primer lugar, examinaremos el papel que juega la demanda energética en la viabilidad de los escenarios de mitigación del cambio climático. En segundo lugar, examinaremos los límites que imponen unos recursos minerales finitos ante el despliegue masivo de las tecnologías de captación de energías renovables. Por último, nos adentraremos en los motivos que nos indican la posibilidad de que el futuro próximo sea el de un declive energético, lo elijamos o no.

### Descenso energético para frenar el cambio climático

Los siete últimos años han sido los siete años más calurosos desde la era pre-industrial. En abril de 2021 se superaba por primera vez en la historia de la humanidad la cifra de las 420 partes por millón (ppm) de  $CO_2$  en la atmósfera, estando ya muy lejos de la barrera de las 350 ppm considerada como el “límite de seguridad”. La acumulación de  $CO_2$  en la atmósfera como consecuencia del uso masivo de combustibles fósiles hace que nos dirijamos a un equilibrio climático diferente para el planeta. La intensidad y frecuencia con la que ya hemos empezado a vivir fenómenos meteorológicos extremos es muestra de ello. Pero existen grandes diferencias entre lograr limitar dicho calentamiento en ciertos niveles o superarlos. La magnitud y velocidad con la que se realice la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es lo que establecerá las posibilidades de lograr un equilibrio climático compatible con la vida de los seres humanos.

El informe especial publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 2018 (SR1.5) sobre la diferencia entre limitar el calentamiento global a 1,5 °C en lugar de a 2°C lo dejaba claro: “*Limitar el calentamiento global a 1,5 °C requeriría cambios rápidos, de gran alcance y sin precedentes en todos los aspectos de la sociedad*” [11]. En este informe se fijaba un *presupuesto de carbono*, como aquella cifra que no debe superarse en los próximos años, siendo que el ritmo de emisiones anuales actual es de 42  $GtCO_2$ . El presupuesto de carbono sería de 580  $GtCO_2$  para el caso de limitar el calentamiento a los 1,5 °C con una probabilidad del 50 %, y de 420  $GtCO_2$  para hacerlo con una probabilidad del 66 %.

Los escenarios de reducción de emisiones presentados en este informe por el IPCC son calculados a partir de modelos híbridos, climáticos y económicos, conocidos como *Modelos de Evaluación Integrada (MEI)*. A medida que las emisiones GEI aumentaban año tras año, a pesar de las advertencias científicas sobre los riesgos del cambio climático, las sendas de mitigación que estos modelos tenían que trazar se volvían cada vez más complicadas. Y, dado que al cálculo se le impone el cumplimiento de parámetros de crecimiento económico, la complicación aumenta. La inmensa mayoría de lo que sabemos actualmente sobre cambio climático ya se sabía en la década de 1980 [62], pero desde la *Cumbre de la Tierra* que tuvo lugar en de Río de Janeiro en 1992 hasta el momento actual, las emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera han sumado el 46 % del conjunto de las emisiones de la historia de la humanidad.

Para que los MEI obtengan resultados que cumplan tanto las exigencias de crecimiento económico como de los cada vez más reducidos presupuestos de carbono marcados, se le ha dado un rol

cada vez más central a las llamadas *Tecnologías de Emisiones Negativas*. Estas tecnologías, que empezaron a desarrollarse a partir de procesos realizados por la industria petrolífera, se basan en capturar el carbono producido en diversos usos y almacenarlo en emplazamientos subterráneos, u otros. Todos los escenarios evaluados en el SR1.5 del IPCC asumen la captura de  $CO_2$ , en un rango que varía entre las 100 y las 1000  $GtCO_2$  entre el presente y 2100. Principalmente, a partir de *Captura y Almacenamiento de Carbono Bioenergético (BECCS)*, y en mucha menor medida a partir de la *aforestación y reforestación (AR)*.

Sin embargo, existe una gran controversia e incertidumbre acerca de cuál es la capacidad real de estas tecnologías para llevar a cabo esas reducciones netas de  $CO_2$ . En un informe publicado por el *European Academies Science Advisory Council* en 2018 se determinaba que el potencial de retirada de  $CO_2$  de la atmósfera por parte de estas tecnologías es bastante limitado [12]. Afirman que en ningún caso se puede considerar que se pueda llegar a la escala de varias gigatoneladas anuales, tal y como se describe en estos escenarios climáticos. Además de la viabilidad técnica del despliegue a gran escala de estas tecnologías, nos encontramos con los impactos en ecosistemas terrestres y marinos. En el caso de la BECCS, se considera que se podrían eliminar 12  $GtCO_2$  anuales para conseguir limitar el aumento de temperatura a 1,5 °C con un 66 % de probabilidades. Esto supondría una plantación masiva de árboles y cultivos bioenergéticos. Se ha estimado que la demanda de tierra podría alcanzar entre el 25 % al 80 % de toda la tierra actualmente cultivada. Lo cual, obviamente, tendría un severo impacto sobre la biodiversidad, al tratarse de cultivos recolectados en intervalos frecuentes.

Por estos motivos, es fundamental trazar escenarios y sendas de reducción de emisiones que no dependan de unas tecnologías que no tenemos claro que puedan funcionar en la escala en la que se están planteando. Es más, en caso de que fuera posible, todavía quedaría preguntarse si es deseable. Como advierten ya diversos investigadores, la idea detrás del “cero neto” y de estas tecnologías de emisiones negativas es la de “*quema ahora, paga después*”, genera la ilusión de que es posible retrasar hacia el futuro las profundas reducciones de emisiones necesarias en el presente más inmediato [13]. Este es un enfoque imprudente y que puede dar pie a justificar en el futuro el uso de tecnologías aún más controvertidas y con mayores riesgos, como aquellas que se agrupan bajo el concepto de la georingeniería. Un ejemplo de estas investigaciones para gestionar artificialmente la radiación solar es la inyección de millones de toneladas de ácido sulfúrico en la estratosfera para reflejar parte de la energía proveniente del Sol.

La única forma de cumplir con los presupuestos de carbono que permitan mantener el calentamiento en niveles seguros, sin depender de la aplicación a gran escala de estas tecnologías de emisiones negativas, es reducir el consumo energético. Aun contando con estas tecnologías, es imprescindible evitar que el consumo energético evolucione al ritmo de las últimas décadas. Rogelj et al. evaluaron en 2015 varios escenarios que limitaban el calentamiento a los 1,5 °C y llegaban a la conclusión de que este objetivo era irrealizable si no se limita el consumo de energía final a un valor anual medio de 400 EJ [10] para este siglo. Así mismo, se describieron cómo una baja demanda energética permite reducir los costes de las estrategias de mitigación.

Uno de los escenarios considerados en el SR1.5 del IPCC avanza en esta línea. Se trata de “*Escenario de baja demanda de energía*” (LED), definido por Grubler et al. en 2018 [14]. Este escenario sitúa el consumo de energía final a nivel mundial en 245 EJ para 2050. Bajo las transformaciones descritas, se reduciría la demanda de energía final en un 53 % en el Norte global y en un 32 % en el Sur global, lo cual resulta en una reducción del 40 % a nivel mundial. Se afirma que sería posible alcanzar estos descensos en la demanda energética a partir de medidas de eficiencia tecnológica,

de la digitalización y de la electrificación. Así mismo, excluye de forma explícita las tecnologías de emisiones negativas para cumplir con el objetivo de emisiones marcado por el presupuesto de carbono. La importancia que tiene este escenario es mostrar que sería posible cumplir los objetivos de mitigación que limiten el calentamiento a 1,5 °C sin depender de dichas tecnologías, mediante una fuerte reducción de la demanda energética. Además, señala cómo las inversiones económicas de la transición energética para suministrar esta energía serían entre 2 y 3 veces menores que las necesarias en el resto de escenarios que cumplen este objetivo climático.

Sin embargo, aún la consideración del LED en el SR1.5 deja dudas abiertas acerca de si sería posible alcanzar este descenso en la demanda energética mediante las transformaciones planteadas. Lo que este escenario plantea de fondo, es la confianza en un desacoplamiento entre consumo energético y crecimiento económico, cuestión sobre la que entraremos en detalle más adelante. Una confianza en que a través de la digitalización y mejoras en la eficiencia tecnológica se podrá reducir el consumo energético mientras se aumentan los niveles de crecimiento económico. En una investigación publicada recientemente por Keysser y Lenzen se cuestiona que esto sea realista y se evalúan por primera vez diferentes escenarios de reducción de emisiones bajo una lógica de *decrecimiento* [16]. En ninguno de los 222 escenarios evaluados en el SR1.5 del IPCC se considera una reducción del Producto Interior Bruto (PIB) mundial, y por tanto del crecimiento económico. El estudio realiza los cálculos de escenarios con un modelo simplificado que vincula energía y emisiones. Los consumos energéticos establecidos para los escenarios de decrecimiento son equivalentes a los del escenario LED de Grubler et al., pero considerando que no se da un desacoplamiento energía-PIB. De esta forma, estas trayectorias de reducción de emisiones con un descenso del consumo energético no dependen de unas mejoras en la eficiencia tecnológica que posibiliten el desacoplamiento, lo cual es improbable que ocurra [15].

Así mismo, este estudio aporta un nuevo elemento de gran importancia, que no se encontraba presente de forma central en el resto de aproximaciones. Se trata de la necesidad de una redistribución entre el consumo energético en el Norte global y el Sur global. Desde la perspectiva de la justicia climática y ecológica [63], para llevar a cabo una reducción de la esfera económica y de consumo de recursos a nivel mundial, son aquellos países con mayor responsabilidad histórica quienes deben asumir la mayor parte de este descenso. Para aproximarse a las consecuencias de esta redistribución, se calcula cuál sería un reparto equitativo a nivel mundial de la demanda energética de 2050 bajo dos de los escenarios. Considerando una población mundial de 10 mil millones de personas, el consumo de energía final por habitante en el Norte global se reduciría de 118 GJ/año en 2017 a 31 GJ/año en 2050, mientras que en el Sur global se pasaría de 36 GJ/año en 2017 a 31 GJ/año en 2050. Siendo este nivel de consumo energético por habitante en 2050 suficiente para la satisfacción de las necesidades humanas.

De esta forma, el estudio de Keysser y Lenzen supone un avance considerable a la hora de abordar los escenarios de reducción de emisiones bajo principios de justicia global, y mediante unas importantes consideraciones sobre las transformaciones que realmente son posibles de llevar a cabo. Lo que hacen estos escenarios es minimizar los riesgos sobre la viabilidad y sostenibilidad de las sendas de reducción de emisiones. Las trayectorias tecno-optimistas consideran un gran desacoplamiento entre consumo energético y PIB, la eliminación a gran escala de gigatoneladas de  $CO_2$  presentes en la atmósfera y una transición energética a gran escala y a gran velocidad que sustituya por completo la matriz fósil por energías renovables. Dado que muchas de estas cuestiones son controvertidas, dudosas o simplemente no se ha demostrado todavía que puedan funcionar en la escala que se plantea, lo más sensato, razonable y prudente es no depender de ellas para lograr los objetivos climáticos.

De esta forma, un fuerte descenso en la demanda energética de los países industrializados del Norte global se muestra como la alternativa más realista a la hora de afrontar los retos climáticos que tenemos por delante.

### Descenso energético para limitar el agotamiento de minerales

Los procesos de descarbonización descritos para la mitigación del calentamiento global pasan por la sustitución de una matriz energética fósil por una basada en fuentes de energía renovables. Sin embargo, lo que conocemos actualmente como energías renovables son dispositivos no renovables de captación y uso de energía renovable: ni los materiales que emplean, ni las ubicaciones geográficas idóneas para conseguir rendimientos confiables, son ilimitadas. De esta forma, aparecen nuevos límites a la demanda energética que es posible suministrar mediante la extensión masiva de estas tecnologías. La dependencia de los escenarios de transición energética con respecto a ciertos minerales críticos con riesgo de escasez es una cuestión que cada vez genera más preocupación, y son múltiples los estudios realizados al respecto. A continuación repasaremos algunos de ellos.

Valero et al. publicaron en 2018 un estudio que analizaba 31 materias primas presentes en las tecnologías de una transición hacia escenarios bajos en carbono [17]. De aquellas, identificaron 13 de ellas como críticas, con un riesgo alto o muy alto, de forma que podrían suponer un impedimento a dicha transición. El estudio parte de los escenarios trazados por la Agencia Internacional de la Energía en su informe *Energy technology perspectives 2017*, de forma que establece una expansión de la potencia instalada de renovables para 2050 de 3.500 GW de fotovoltaica, 2.500 GW de eólica y 900 GW de solar térmica. Además, se considera también la expansión de la movilidad eléctrica, con vehículos eléctricos, tanto híbridos enchufables (PHEV) como eléctricos de baterías (BEV). Se trabaja con la hipótesis de que la demanda de materiales por el resto de sectores industriales se mantendrá constante a los niveles actuales, lo cual es una hipótesis muy conservadora que ayuda a identificar el límite inferior en lo que se refiere a los límites materiales que potencialmente se puedan encontrar en esta transición. Comparando la demanda de los minerales analizados con la curva de Hubbert que se estima que siga la producción de estos minerales según las reservas y recursos, se logran evaluar las restricciones según tres categorías de riesgo.

De esta forma, se encuentra cómo el telurio presenta un riesgo muy alto, pues su demanda acumulada entre 2016 y 2050 superaría los actuales recursos conocidos de este mineral. A este le siguen 12 elementos clasificados como de riesgo alto, ya que la demanda acumulada de ellos en el escenario evaluado superaría las reservas conocidas. Estos elementos son plata, cadmio, cobalto, cromo, cobre, galio, indio, litio, manganeso, níquel, estaño y zinc. Estas restricciones afectarían a la expansión de los vehículos eléctricos y de las tecnologías fotovoltaica, eólica y solar térmica. En un estudio posterior que profundiza en el análisis de estos 13 minerales críticos, Calvo y Valero identifican al cobalto, litio, telurio y níquel como aquellos elementos más críticos de todos ellos, y aquellos que van a experimentar el incremento de la demanda más significativo en las próximas décadas, comparado con los niveles actuales [18].

Por otro lado, Dominish et al. realizaron en 2019 el informe *Responsible Minerals Sourcing for Renewable Energy*, desde el Institute for Sustainable Futures (ISF) y la Universidad Tecnológica de Sydney (UTS) [20]. Este estudio se centra en la demanda de minerales para las tecnologías de energías renovables y de almacenamiento, según un ambicioso escenario hasta 2050 compatible con limitar el cambio climático a 1,5 °C. Este escenario, que fue definido por ISF y UTS junto al Centro Aeroespacial Alemán (DLR), logra limitar las emisiones acumuladas entre 2015 y 2050 a 450 GtCO<sub>2</sub>

[19]. El consumo de energía primaria pasa de 556 EJ en 2015 a 412 EJ en 2050, mientras que el consumo de energía final pasa de 342 EJ en 2015 a 253 EJ en 2050. Las energías renovables suponen el 92 % de la energía primaria, ya que algunos usos no-energéticos siguen incluyendo combustibles fósiles, y el 100 % de la energía eléctrica. La demanda de electricidad pasa de 24.300 TWh en 2015 a 65.300 TWh en 2050, que se suministran a partir de una potencia instalada de 25.700 GW. En esta potencia estarían incluidos 7.850 GW de eólica, 12.300 GW de fotovoltaica y 2.060 GW de solar térmica, lo cual permite que el 65 % de la electricidad sea producida a partir de fuentes energéticas intermitentes en 2050.

El informe analiza el incremento de la demanda de minerales según cinco escenarios con diferentes niveles de mejora en las tecnologías de fabricación que permiten una menor intensidad de materiales, así como diferentes niveles de reciclaje. De esta forma, se identifican las restricciones y limitaciones futuras que se puedan encontrar. Se encuentra que la demanda por parte de las tecnologías de energías renovables y almacenamiento superarían las reservas de cobalto, litio y níquel, y alcanzarían el 50 % de las reservas de indio, plata y telurio. Es el rápido incremento de la demanda de cobalto, litio y tierras raras lo que genera más preocupación. Así mismo, se estima que la demanda de litio y tierras raras superaría las tasas de producción en 2022, mientras que esto ocurriría para el caso del cobalto y níquel en 2030. En el caso del cobalto, litio, tierras raras y telurio, la demanda en 2050 directamente relacionada con las tecnologías de energías renovables ocupa un porcentaje muy significativo de la demanda total. La mayor preocupación acerca de riesgos de suministro se centra en el cobalto, debido a una producción y unas reservas altamente concentradas, así como por la rapidez con la que las baterías de vehículos eléctricos supondrían el principal uso de este mineral en unos pocos años.

Por último, un tercer estudio recientemente publicado a este respecto es el realizado por la propia Agencia Internacional de la Energía. El informe *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* estudia el incremento de la demanda de minerales bajo el escenario “Net Zero by 2050 (NZE)”, también recientemente publicado [21]. En este escenario las emisiones acumuladas entre 2020 y 2050 serían de 500  $GtCO_2$ , lo cual sería se encaminaría a limitar el calentamiento global a 1,5 °C con una probabilidad del 50 % [6]. Las emisiones capturadas desde el uso de combustibles fósiles serían de 3,5  $GtCO_2$  en 2050, y el  $CO_2$  retirado de la atmósfera a partir de tecnologías BECCS y de captura directa de aire (DACCS) alcanzaría las 1,9  $GtCO_2$ , lo cual está por debajo de los valores considerados por el IPCC. El consumo de energía primaria desciende hasta los 550 EJ en 2030, lo que supone una reducción del 7 % con respecto a 2020. Posteriormente, mantendría una tendencia prácticamente estacionaria, siendo el consumo de energía primaria global de 2050 equivalente al de 2010, a pesar del incremento de población. Se considera que sería posible lograr esto con un ritmo de crecimiento económico del 3 % anual, de forma que la esfera económica tendría más del doble de tamaño en 2050, con respecto a 2020. Las tecnologías de energías renovables suministrarían el 66 % de la energía, con las fuentes divididas entre solar, eólica, hidráulica, biomasa y geotérmica.

Según este estudio, la transición energética descrita por el NZE supondría que en 2040 la demanda de minerales haya aumentado hasta seis veces el consumo actual de los mismos. El litio experimenta el crecimiento más rápido en su demanda, seguido por el grafito, el cobalto y el níquel. Estas previsiones de un fuerte y rápido incremento en la demanda de minerales críticos, muy superiores a cualquier aumento ocurrido en el pasado, hacen que se plantee seriamente la preocupación acerca de la disponibilidad y la fiabilidad del suministro. Las limitaciones y restricciones que pueda encontrar la demanda de estos minerales podría provocar una considerable volatilidad de precios que dificulte y retrase el desarrollo de la transición energética y el cumplimiento de los objetivos climáticos. Así mismo, señalan cómo, según su análisis, los proyectos mineros necesitan una media

de 16 años entre el descubrimiento de las reservas y el inicio de la producción. A ello se le suma la constatación de un declive en la calidad de los recursos debido a unas menores leyes minerales. Se pone el ejemplo de cómo en Chile la ley mineral de cobre ha descendido un 30% en los últimos 15 años. Lo que supone la extracción de elementos con una baja ley mineral es que se requiera más energía, los costes de producción sean más elevados, se tengan asociadas unas mayores emisiones GEI y se produzcan unos volúmenes de residuos mayores.

A la confirmación del declive en las leyes minerales [22] se le suma la comprensión desarrollada por Valero y Valero sobre el capital mineral de la tierra y el concepto de *Thanatia* [64]. Según esta comprensión, los yacimientos minerales son una rareza geológica y debe considerarse la exergía que diferencia dichas concentraciones con respecto a un estado de dispersión absoluto y un planeta completamente degradado (*Thanatia*). De esta forma, la extracción de estos minerales no tiene únicamente el coste energético del propio proceso minero, sino que al estar aprovechándose de una “rareza termodinámica” concentrada de forma natural, se debería considerar el *Coste de Reposición*. Este coste representa el valor exergético acumulado que sería necesario para reconcentrar el mineral desde un estado de dispersión completa (*Thanatia*) hasta las condiciones de concentración y composición halladas en el yacimiento, a partir de la tecnología actualmente predominante.

Ante la acumulación de evidencias que aumentan la preocupación acerca de las restricciones minerales a la transición energética, son diferentes las recomendaciones y estrategias esbozadas para minimizar los riesgos de escasez y suministro. Valero et al. abogan por una mejora en las tasas de reciclaje de un 0,1% a un 4,6% anual [17]. Calvo y Valero señalan cómo actualmente prácticamente no existen procesos viables ni rentables económicamente para el reciclaje de los elementos escasos o críticos a partir de los dispositivos modernos de tecnologías renovables [18]. Dominish et al. abogan por una reducción de la demanda de minerales a partir de una mayor eficiencia material, la sustitución por elementos más abundantes y el aumento del reciclaje [20]. La AIE, por su parte, recomienda que se asegure la inversión económica necesaria para aumentar la producción, una diversificación de las fuentes de suministro, la promoción de la innovación tecnológica y un aumento del reciclaje [21]. Por otro lado, Moreau et al. señalan cómo los aumentos en el reciclaje de las tecnologías renovables actualmente producidas mostrarán sus efectos pasado el plazo de la vida útil de estos dispositivos (20-25 años), mientras que el marco temporal en el que es necesario desplegar la nueva matriz energética global es de apenas 30 años [65]. Por eso, se incide en que el incremento en la demanda de la mayoría de estos minerales no se vería compensada por unas altas tasas de reciclaje. Es por esto por lo que en su investigación fijan la prioridad en la sustitución de minerales escasos por otros más abundantes, aunque ello signifique una pérdida de eficiencia.

Por otro lado, investigaciones recientes apuntan hacia los impactos negativos sobre la biodiversidad que tendría al gran aumento de la extracción de los minerales asociados con estos escenarios de transición hacia las tecnologías de captación de energías renovables. Sonter et al. analizaron cómo las zonas que quedarían afectadas por la expansión del extractivismo minero derivado de las energías renovables se solaparían en diferente grado con Áreas Protegidas, Áreas Claves de Biodiversidad y zonas vírgenes [23]. El estudio señala que es necesario realizar una planificación estratégica de estos nuevos procesos extractivos para evitar que las amenazas a la biodiversidad causadas por la expansión de las energías renovables no sean incluso superiores a las del propio cambio climático. Así mismo, War on Want junto a London Mining Network publicaron en 2019 el informe *A Just(ice) Transition is a Post-Extractive Transition* en el que recorren las diferentes consecuencias ecológicas y sociales de estos procesos extractivos, y cómo todas estas pueden incrementarse fuertemente a causa de la transición hacia las energías renovables [24]. Entre las propuestas que se presentan en este informe, se señala la necesidad establecer límites en la demanda energética, con especial

énfasis en reducir el consumo excesivo tanto de energía como de materiales por parte de los países del Norte global.

De esta forma, el descenso en el consumo energético se muestra como una estrategia necesaria para hacer posible una transición energética que minimice los riesgos de escasez y suministro de los minerales necesarios para la fabricación de estos dispositivos, y también para minimizar los impactos ecológicos y sociales que tienen dichos procesos extractivos.

### **Descenso energético para navegar el declive energético**

El tercer elemento que justifica la necesidad de un descenso en el consumo energético tiene que ver con una previsión de declive energético en el futuro próximo. Es decir, que ya no solo se trata de que el descenso energético sea la opción más razonable, prudente y deseable, sino que deja de ser una opción sobre la que podemos elegir y parece imponerse como hecho físico. Los elementos que están de fondo son el cénit del petróleo convencional y unas bajas Tasas de Retorno Energético (TRE) de las tecnologías modernas de captación de energías renovables.

En el año 2010, la AIE reconoció en su World Energy Outlook (WEO) que la producción de petróleo crudo convencional alcanzó su pico entre 2005 y 2006, con casi 70 millones de barriles diarios (Mb/día) [27]. Posteriormente, dicha producción ha caído lentamente. Desde ese momento, el crecimiento de la demanda ha sido cubierto con un gran aumento en la extracción de los llamados “petróleos no convencionales”, entre los que destaca el petróleo de fractura hidráulica (*fracking*). De esta forma, a finales de 2018, la cifra media de un consumo de 93 Mb/día se cubría con 67 Mb/día provenientes de petróleo crudo convencional y 26 Mb/día de petróleo no convencionales [26]. Ha sido este fuerte incremento en la producción de petróleo no convencionales, con el *fracking* estadounidense en una posición central, lo que ha amortiguado el pico del crudo convencional. Sin embargo, la actividad productiva del *fracking* ha sido posible únicamente gracias a fuentes de financiación barata y un alto endeudamiento de las compañías, lo que ha generado una burbuja financiera y especulativa. La deuda es una construcción social con consecuencias físicas, que en este caso ha permitido extraer nuevos yacimientos de petróleo a un elevado coste, aumentando así la producción total [28]. De esta forma, al haberse mantenido durante más de una década perforaciones escasamente productivas, actualmente se corre el riesgo de experimentar un acusado descenso como consecuencia de un proceso de quiebras en cadena y desinversión en el sector.

El escenario planteado en el WEO de 2020 de la AIE apunta en esa dirección [25]. Se certifica que la inversión en petróleo y gas ha disminuido desde el año 2014, momento en el que alcanzó su máximo. Las compañías petroleras están disminuyendo su inversión en la búsqueda de nuevos yacimientos y las inversiones se centran en los campos de extracción actualmente en funcionamiento. Esto ocurre tras la constatación de que a inicios de la década de 2010, a pesar de un gran aumento de las inversiones, el ritmo de descubrimientos de nuevos yacimientos de petróleo fue de 16.000 Mb/año, mientras que el consumo fue de 31.000 Mb/año [4]. De esta forma, la AIE afirma que, en el caso de que las compañías petroleras no incrementen en absoluto sus inversiones, la producción descendería desde los 98 Mb/día de 2019 hasta unos 20 Mb/día en 2040. En el caso de que las compañías inviertan únicamente en los pozos existentes, la caída en la producción llegaría a los 40 Mb/día en 2040. Esto dibuja las primeras líneas de un escenario futuro con mucha menos energía disponible.

Dada la urgencia de sustituir el uso de combustibles fósiles por fuentes renovables para limitar las peores consecuencias del cambio climático, las previsiones de un fuerte descenso en la produc-

ción de petróleo para 2040 podrían sonar como una buena noticia. Sin embargo, la dificultad de llevar a cabo esta transición en los plazos marcados y manteniendo el actual nivel de consumo energético, hacen que la alegría no sea tal. Se han desarrollado cientos de investigaciones profundas acerca de un sistema energético 100 % renovable, y las más tecno-optimistas de ellas afirman que no existen impedimentos insalvables para una transición rápida. A continuación, nos centraremos en cuatro cuestiones que problematizan al respecto y apuntan hacia la necesidad de una reducción en la demanda energética total para hacer posible una transición energética a fuentes renovables.

**Tasa de Retorno Energética (TRE):** La TRE es la medida que nos permite conocer la cantidad de energía de una determinada fuente que puede ser aprovechada para hacer trabajo útil. No es un valor estático, sino que varía con el tiempo, ya que depende de las infraestructuras, la tecnología disponible o la calidad de la energía obtenida. Para TRE altas (mayores a 20:1), la energía neta y la bruta son similares. Pero a partir de una TRE de 10:1, se entra en lo que se llama el “*precipicio energético*”, y la energía neta obtenida por unidad de energía invertida cae de forma exponencial [4]. En 1960, la TRE media del petróleo a nivel mundial rondaba los 45:1, mientras que actualmente se situaría en los 18-20:1. Por su parte, la TRE del gas natural sería de 10-20:1 y la del carbón estaría en 46:1. En el caso de las renovables, estos valores son significativamente menores, estando en varios casos por debajo de los 10:1. Como hemos dicho, esto no es algo estático, y se ha comprobado que puede mejorar, como se ha visto en el caso de las células fotovoltaicas, o a medida que aumentaba el tamaño de las turbinas eólicas. Sin embargo, para el futuro más inmediato, que es en el que se necesita realizar la transición energética, partimos de una sustitución de unos combustibles fósiles con una TRE cercana a 20:1 por unas tecnologías que aprovechan los flujos renovables con una TRE que ronda los 10:1. Así mismo, como hemos visto en el apartado anterior, el aumento en la extracción de minerales podría provocar un progresivo agotamiento de las reservas, que derive en una disminución progresiva de las leyes minerales. De forma que aumentaría el consumo energético necesario para obtener estos minerales, y disminuiría la TRE general de la tecnología producida.

Tabla 8: Características de fuentes energéticas renovables: TRE y potencial teórico máximo. Datos de la tabla obtenidos de [4]

	TRE	Energía primaria [% en 2015]	Potencial teórico máximo [TW-año]
<b>Hidroeléctrica</b>	20-84:1 ligada al pet.	2.4	0,5 - 1,8
<b>Eólica</b>	10-20:1 ligada al pet.		0,5 - 2 (+0,5)
<b>Fotovoltaica</b>	0,8-3:1 ligada al pet.		2 - 4
<b>Termoeléctrica</b>	4-20:1 ligada al pet.	1.4	
<b>Geotérmica</b>	9:1 ligada al pet.		0,06 - 0,2
<b>Marinas</b>	1:1 ligada al pet.		0,06 - 0,7
<b>Biomasa y residuos</b>	10-80:1	10.3	0,9 - 3,3
<b>Total renovables</b>	-	14.1	4,5 - 12

**Potencial teórico máximo:** Existe una limitación en el potencial teórico máximo para el aprovechamiento de los flujos renovables con estas tecnologías. Se trata de una cuestión con gran controversia, y los valores publicados varían bastante entre unas investigaciones y otras. Teniendo en

cuenta los límites físicos, una compilación de diferentes investigaciones llega a cifrar este potencial en el intervalo de 4,5-12 TW-año (142-378 EJ), siendo que en 2015 el suministro de energía primaria mundial fue de 18 TW-año (567 EJ) [4]. De forma que, según estas estimaciones, la energía disponible a partir del aprovechamiento de fuentes renovables podría oscilar entre el 26 y el 66 % del consumo energético de 2015. En la tabla 8 se muestran los valores recopilados tanto para TRE como para el potencial teórico máximo según diferentes tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables. En esa tabla se señala como en la mayor parte de los casos, la TRE de las tecnologías de energías renovables esta ligada a la disponibilidad de petróleo.

**Dependencia del sistema fósil:** En el momento actual, las energías renovables modernas funcionan en base a una dependencia de los combustibles fósiles a lo largo de su ciclo de vida. Los procesos extractivos de los minerales necesarios y el procesado de determinados compuestos se realizan a partir del petróleo. Así mismo, unas cadenas de suministro y fabricación distribuidas por todo el planeta hacen que dependan fuertemente de un transporte internacional que funciona a partir del petróleo [29]. Es concebible, teóricamente, que todos estos procesos se pudieran llevar a cabo a partir de electricidad producida con energías renovables, pero esa no es la situación de la que se parte. De este modo, una reducción en la producción de petróleo, o una volatilidad de precios a consecuencia de ello, tendrá consecuencias sobre las renovables. El coste, tanto económico como energético, de la producción de estas tecnologías se verá afectado por las fluctuaciones y encarecimiento que previsiblemente experimentará el petróleo en el futuro próximo. Por último, la integración de las renovables en los sistemas eléctricos actuales ha sido posible en gran parte porque suponen un pequeño porcentaje del consumo energético total, sostenido por un modelo fósil. A medida que desaparezca ese apoyo y funcionen de forma independiente, aumentarán las dificultades relacionadas con la necesidad de almacenamiento o de una potencia instalada muy superior a utilizada, lo cual aumentaría los costes energéticos de la tecnología y reduciría la TRE [4].

**Coste energético de la sustitución:** En el periodo de transición, en el que se sustituiría la matriz energética fósil por una renovable, es necesario extraer los materiales necesarios para estas tecnologías, procesarlos, transportarlos, fabricar los dispositivos, transportarlos a los emplazamientos elegidos y llevar a cabo la construcción. Es en todo este proceso donde se produce el consumo energético asociado a estas tecnologías, que después se recuperará durante el funcionamiento. Sin embargo, la naturaleza no adelanta el crédito energético, no es posible fabricar un aerogenerador con la energía de mañana [4]. Si se sustituye una potencia instalada fósil por renovables con una TRE de 10:1 y una vida útil de 40 años, se necesitará una inversión energética inicial equivalente a 4 veces la producción anual. De esta forma, al sustituir un 2 % de potencia fósil por renovables, se experimentará un descenso en la energía disponible del 8 % [4]. Cuanto mayores sean los porcentajes de sustitución, mayor tendrá que ser la inversión energética y mayor será la caída de la energía total disponible para otros usos. De esta forma, el propio proceso de transición energética hacia las fuentes renovables puede ser la causa de un declive en la energía disponible.

Todas estas cuestiones nos permiten problematizar sobre cómo de plausible se presenta una sustitución de la matriz energética fósil por el aprovechamiento de fuentes renovables. Floyd et al. señalan algunos otros factores, entre los que se encuentran las dificultades en la electrificación de usos, la integración de la variabilidad de las fuentes o la densidad energética [29]. Así mismo, diferentes autores nos recuerdan que los ejemplos de transición energética ocurridos en el pasado (biomasa-carbón, carbón-petróleo) han sido lentos, siempre añadiendo nuevas fuentes en lugar de sustituyendo, con fuentes que tenían una TRE similar o mayor y con un aumento del consumo energético. El proceso de transición energética al que nos tenemos que enfrentar como sociedad en las próximas décadas no tiene equivalente histórico, y las incertidumbres al respecto son múltiples [4]. Por lo que conviene acogerse a lo que Floyd et al. denominan *humildad de conocimientos* acerca

de cuáles pueden ser los escenarios reales, frente a los modelos teóricos que pronostican una sustitución del conjunto de los combustibles fósiles sin apenas variaciones en el consumo.

De esta forma, la previsible caída en la producción de petróleo y las limitaciones existentes en el desarrollo de las tecnologías de captación de energías renovables nos inducen a pensar en un escenario futuro de declive energético. Esto no quiere decir que la sustitución de la matriz energética fósil por una renovable no sea urgente y deseable, sino que para poder llevar a cabo esta transformación debemos asumir que la energía disponible será menor. Cuanto mayor sea la demanda energética, menor será la probabilidad de que las renovables puedan cubrirla. Además, justamente, ante la posibilidad de un declive energético, planificar las formas de transicionar hacia sociedades que reduzcan considerablemente su demanda energética es lo que nos puede permitir superar este declive sin que ello suponga un gran traumatismo.

## Anexo 2

### Ampliación: La distribución del descenso energético

En este anexo presentamos la ampliación de la recopilación bibliográfica realizada sobre la distribución actual del consumo energético y la forma en la que debe llevarse a cabo la redistribución global en el descenso energético. Presentamos tres elementos centrales para responder a cuáles serían las consecuencias de este descenso. En primer lugar, nos aproximaremos a la profundas desigualdades existentes en el reparto de este consumo energético. En segundo lugar, examinaremos cuál es la vinculación entre la demanda y la satisfacción de necesidades humanas. Por último, responderemos a cuál es el consumo energético mínimo necesario para el desarrollo de una vida digna.

#### El reparto del consumo energético

Hasta ahora, hemos hablado de consumo energético en términos globales, pues es en esa escala donde se desarrollan las consecuencias biofísicas del actual modelo económico y de desarrollo. Sin embargo, este consumo no se reparte por igual en todos los países, al igual que las responsabilidades sobre la devastación ecológica se concentran en aquellos países que más recursos han consumido y emisiones generado. De forma equivalente, el consumo energético no se reparte equitativamente entre los diferentes segmentos de población, sino que depende en gran medida de su posición económica. Hablar de descenso energético en abstracto, en un mundo en el que 940 mil millones de personas (13 % de la población mundial) no tiene acceso a la electricidad, resulta desaprensivo [66]. Las fuertes desigualdades presentes tanto a nivel mundial como dentro de los países, deben ser tenidas en cuenta. Y las estrategias de descenso energético deben cumplir también con una función redistributiva que reduzca dichas desigualdades.

Una primera consideración para analizar esta cuestión tiene que ver con la forma en la que se mide el consumo energético. Como señalan Capellan y Arto, en el contexto actual de globalización, una medida territorial del consumo se queda escasa para medir la energía que realmente está consumiendo un país [36]. Frente a ello, se incide en la necesidad de medir la huella energética, que representa la energía derivada del conjunto de bienes y servicios consumidos por un país (energía embebida), independientemente de en qué territorio ha sido utilizada. A partir de este parámetro se puede detectar la forma en la que los procesos de deslocalizaciones industriales y de especialización de los países del Norte global en sectores económicos de alto valor añadido únicamente han desplazado territorialmente el lugar donde se realiza el consumo energético derivado de su consumo. Para el caso del Estado español, la huella energética fue en 2008 un 34 % superior a la demanda energética territorial, alcanzando los 170 GJ per cápita. Según los cálculos de los investigadores, la huella energética de la Unión Europea, Norteamérica, Australia y Japón fue de media en 2008 un 13 % superior con respecto al uso de energía primaria dentro de sus fronteras. Como contrapartida, en las economías emergentes de Brasil, Rusia, India, Indonesia y China, la huella energética fue de media un 16 % inferior al consumo energético territorial.

El reparto del consumo energético territorial ya presenta grandes desigualdades, pero cuando se analizan las huellas energéticas, estas se profundizan todavía más. Oswald et al. analizaron la huella de energía final de 86 países, diferenciando entre varios segmentos de ingresos económicos de la población, y sus resultados cuantifican esta gran desigualdad [30]. Se encuentra cómo la huella energética del 5 % más rico de la población mundial es superior a la correspondiente al 50 % con

menos ingresos, que apenas llega al 20 % de la energía final. Mientras que el 10 % más rico de la población mundial consume el 39 % de la energía final, el 10 % más pobre consume 20 veces menos, un 2 % de la energía final. Así mismo, se comprueba cómo al mismo tiempo que la huella energética per cápita para rentas altas se encuentra por encima de los 200 GJ anuales, el 77 % con menos ingresos de la población mundial consume menos de 30 GJ anuales, y el 38 % no llega a los 10 GJ anuales. Lo que esto muestra es cómo los segmentos más ricos son responsables de un consumo energético que en absoluto podría ser universalizable al conjunto de la población mundial. Si todo el mundo tuviera la misma huella energética que el 0,01 % más rico de Armenia, la energía final se multiplicaría por 27.

La investigación que llevan a cabo Oswald et al. analiza cómo se reparte esta huella energética según diferentes servicios de uso final. La energía no se utiliza por sí misma, sino que se hace para satisfacer determinados servicios. Algunos de ellos son esenciales para la supervivencia o mantener cierto bienestar, como cocinar, calentar el espacio o el acceso a infraestructuras de educación y sanidad. Mientras que otros de ellos pueden ser deseables, pero no esenciales, o simplemente pueden ser considerados como lujos. A partir de esta diferenciación entre servicios de uso final de energía, se pueden identificar aquellas categorías en las se encuentran las mayores desigualdades. Aunque, en todas estas categorías existe una gran descompensación entre las huellas energéticas de la que son responsables los segmentos más ricos de la población frente a los segmentos con menos ingresos. En el caso de la alimentación o los usos energéticos residenciales, son ligeramente menos desiguales que la media, mientras que las mayores desigualdades están en los usos relacionados con el transporte. El 10 % más rico de la población mundial consume el 55 % de la energía relacionada con movilidad, lo cual representa el 13,5 % de la demanda global de energía final y en su mayor parte proviene de combustibles fósiles. Este segmento de la población utiliza el 45 % de la energía del transporte terrestre y el 75 % de la del transporte aéreo. Mientras tanto, el 50 % con menos ingresos utiliza apenas el 10 % de la energía del transporte terrestre y el 5 % del aéreo.

Por último, esta investigación incluye una evaluación de cuáles serían estos resultados siguiendo en 2030 y 2050, siguiendo las proyecciones de crecimiento del PIB de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y las del crecimiento de población por parte de Naciones Unidas. De esta forma, la huella energética mundial sería el doble que la actual en 2030, y el triple en 2050, con la mitad de este crecimiento ocurriendo en China e India. El 31 % del incremento en la huella energética se atribuiría al uso de combustible para vehículos y el 33 % para usos de calor y electricidad, mientras que los usos directamente relacionados con la subsistencia, como vestimenta o alimentación, contribuirían únicamente a un 7 % de este incremento. El índice general de desigualdad energética evaluado en el estudio se mantendría prácticamente estable para este periodo, y empeoraría para algunas de las categorías.

De esta forma, investigaciones como la de Oswald et al. nos permiten conocer como la huella energética está muy lejos de repartirse de forma equitativa, y como existen enormes variaciones entre países y entre segmentos de ingresos económicos. Esta profunda desigualdad en la distribución del consumo de energía es un obstáculo a la hora de llevar a cabo la transición ecológica y avanzar hacia una senda de reducción de emisiones. Es una pequeña porción de la población mundial quien es responsable de una huella energética que supera lo excesivo, mientras que amplias mayorías situadas en los segmentos más bajos de ingresos económicos apenas son responsables de un pequeño porcentaje del consumo energético mundial. Esto es algo que debe estar muy presente a la hora de pensar en el descenso energético que es necesario asumir en las próximas décadas. Una mejora y una garantía pública del acceso a servicios básicos como educación, sanidad y alimentación beneficiaría a mayorías sociales, disminuiría la desigualdad observada y no supondría un gran incremento en el

consumo energético. Mientras que una eliminación o sustitución de usos energéticamente intensivos, como el transporte individual o la aviación, por soluciones colectivas o de bajo consumo energético, permitiría una gran reducción en el consumo energético y disminuiría la desigualdad presente en estas categorías.

### **El vínculo entre el consumo energético y la satisfacción de necesidades humanas**

Como hemos mencionado anteriormente, el consumo de energía se realiza para satisfacer determinados servicios. Algunos de los cuales, son fundamentales para la supervivencia y para llegar a unos niveles básicos de bienestar. De esta forma, existe una vinculación entre la demanda energética de una sociedad y la satisfacción de necesidades humanas. Lo que queremos evaluar en este apartado es justamente esta vinculación, cómo de estrecha es, y si justifica por sí sola el conjunto de la demanda energética actual.

La investigación realizada en 2010 por Steinberger y Roberts estudia esta vinculación, realizando un análisis longitudinal entre 1975 y 2005 [32]. Desarrollan un modelo en el que se evalúan los datos de los países que incluyen al 81-91 % de la población mundial durante este periodo. Se realiza una regresión lineal entre los datos de consumo de energía primaria de cada país y un conjunto de indicadores de desarrollo humano, entre los que se encuentran la esperanza de vida, la alfabetización, los ingresos y el propio Índice de Desarrollo Humano (IDH). Lo que muestran los resultados obtenidos es cómo parámetros de desarrollo humano se han ido desacoplando del consumo energético per cápita. Esto se observa que ocurre a nivel global, pero con diferentes comportamientos según países.

Para los países más empobrecidos y con un menor consumo per cápita, se ve cómo un pequeño incremento en el consumo energético se traduce en grandes mejoras en los parámetros de desarrollo humano. Sin embargo, para aquellos países con mayor consumo per cápita, se observa cómo se alcanza un punto de “*saturación*”, en el que los incrementos en el consumo energético apenas se traducen en una mejora en los parámetros de desarrollo humano. Investigaciones posteriores, como la de Arto et al. encuentran resultados similares, ubicando ese punto de saturación para consumos anuales de energía primaria per cápita superiores a 100 GJ [33]. En la figura 10 se puede observar la evolución de la relación entre IDH y consumo de energía primaria per cápita para el caso de India, China, Costa Rica, España, Japón y Estados Unidos. Se puede ver de forma clara cómo el mismo nivel de IDH se alcanza con niveles de consumo energético muy diferentes, lo que ejemplifica el desacoplamiento mencionado. Así mismo, podemos ver cómo el consumo energético de España prácticamente se ha duplicado entre 1975 y 2005 sin que ello se tradujera en una gran mejora del IDH. Mientras tanto, en el mismo periodo, el IDH de India ha aumentado fuertemente con apenas un ligero incremento del consumo de energía primaria per cápita.

El desacoplamiento hallado en la investigación de Steinberger y Roberts implica que el consumo energético necesario para unos niveles adecuados de desarrollo humano ha ido disminuyendo progresivamente en el tiempo. Mientras que en 1975, una esperanza de vida de 70 años estaba vinculada con un consumo de energía primaria de 100 GJ per cápita y el consumo medio estaba en la mitad de esa cifra, en 2005 el requerimiento se situaba en los 40 GJ y el consumo per cápita medio era de 74 GJ. Si la tendencia observada se mantuviera, en 2030 la cifra podría llegar a descender a 24 GJ per cápita, lo cual sería tres veces inferior a las proyecciones de consumo energético medio. Así mismo, el estudio apunta cómo se pueden observar altos niveles de alfabetización vinculados a niveles de consumo energético considerablemente bajos. Para el caso de alcanzar un alto IDH (superior a 0,8) en 1975 se requería un consumo de 100 GJ per cápita, que descendería a los 60 GJ en 2005, y podría llegar a los 40 GJ en 2030.

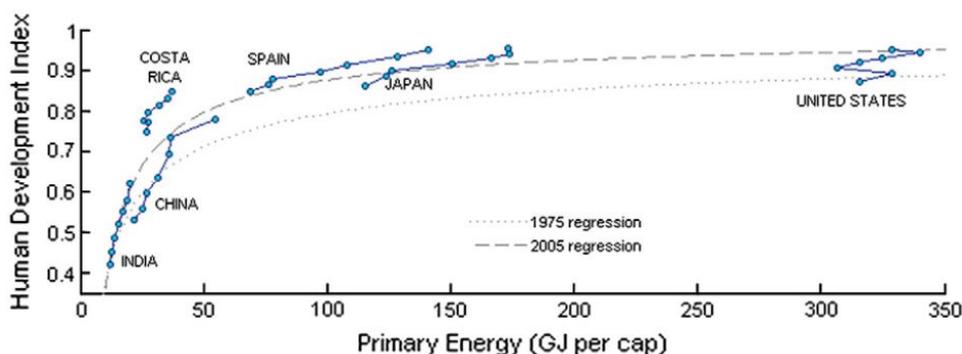


Figura 10: Evolución de las trayectorias del IDH de China, Costa Rica, India, Japón, España y Estados Unidos con respecto al consumo de energía primaria, entre 1975 y 2005. Extraído de Steinberger et al. 2010 [32]

De esta forma, Steinberger y Roberts determinan el nivel de consumo energético por debajo del cual no se pueden alcanzar unos niveles adecuados en los factores de desarrollo humano. Estos niveles han ido disminuyendo, mientras que el consumo energético ha ido aumentando. Lo que se encuentra es cómo la cantidad total de energía primaria consumida es más que suficiente para obtener estos altos niveles de desarrollo humano para toda la población mundial. El hecho de que esto no haya ocurrido se debe a un reparto desigual del consumo energético, tal y como hemos visto en el apartado anterior. Mediante una reestructuración que corrija esta desigualdad y redistribuya el consumo energético, los países altamente desarrollados podrían utilizar únicamente una porción de su consumo actual sin que ello suponga una pérdida en la satisfacción de necesidades humanas. Mientras que un descenso considerable en la demanda energética de los países que más consumen apenas tendría efecto sobre los parámetros de desarrollo humano, un pequeño incremento del consumo per cápita en los países más empobrecidos podría suponer una mejora muy considerable en dichos parámetros.

### El consumo energético mínimo para una vida digna

Hemos visto cómo el consumo energético está distribuido de una forma profundamente desigual y cómo a partir de cierto nivel su incremento se desacopla de una mejora en la satisfacción de necesidades humanas. Esto nos conduce a pensar en que un descenso energético durante las próximas décadas no supondría unas peores condiciones de vida, si se lleva a cabo bajo una gran redistribución. Por lo tanto, si el consumo actual es varias veces superior al nivel de consumo suficiente para satisfacer las necesidades humanas, ¿cuánto sería posible reducirlo asegurando unas condiciones de vida digna para toda la población mundial? ¿cuál es el consumo energético mínimo para una vida digna?

Esta es la cuestión que abordan Millward-Hopkins et al. en una magnífica investigación publicada en 2020 [31]. El objetivo de su estudio es cuantificar el escenario de consumo energético mundial que garantiza condiciones materiales de vida digna y servicios básicos para toda la población mundial, un escenario de vida digna (DLE). Para ello, desarrollan un enfoque de modelización ascendente en el que parten de las necesidades humanas básicas que necesitan ser cubiertas para luego definir los requerimientos materiales que satisfacen esas necesidades. Mientras que las necesidades son universales, los satisfactores de estas son específicos de contextos culturales. Las categorías de necesidades consideradas son nutrición, vivienda y condiciones de vida, higiene, vesti-

menta, sanidad, educación, comunicaciones y acceso a la información, y movilidad. Las variaciones según países en los requerimientos materiales y energéticos para satisfacer estas necesidades se deben a cuestiones como estructura de edad, acceso al agua, temperaturas medias, o densidades de población.

Se decide evaluar el consumo de energía final en lugar del consumo de energía primaria. La energía final proporciona servicios energéticos, por lo que se considera que es el parámetro más adecuado para reflejar los requerimientos energéticos de la sociedad y de la actividad económica. De esta forma, la investigación realiza cálculos específicos sobre un conjunto de 119 países para así hallar la energía final necesaria para un nivel de vida digna a partir de tecnologías actuales y una fuerte redistribución. Los resultados muestran que el umbral de consumo anual de energía final para lograr estos objetivos se sitúa en los 13-18,4 GJ per cápita, con una media global situada en los 15,3 GJ per cápita anuales. Las variaciones entre países se deben a diferentes factores climáticos o demográficos. En el caso del estado español, se estima que la energía final necesaria para cumplir estos objetivos de vida digna se sitúa en los 15,8 GJ per cápita anuales. Las categorías de necesidades con unos mayores requerimientos energéticos son nutrición y movilidad, que alcanzan los  $\sim 3$  GJ per cápita anuales cada una. Por su parte, las categorías de vivienda y condiciones de vida, sanidad e higiene requieren un consumo de  $\sim 1.5$  GJ per cápita anual cada una. En la figura 11 se muestra el desglose de requerimientos energéticos según satisfactores, para los casos de la media global, Ruanda, Uruguay y Kirguistán.

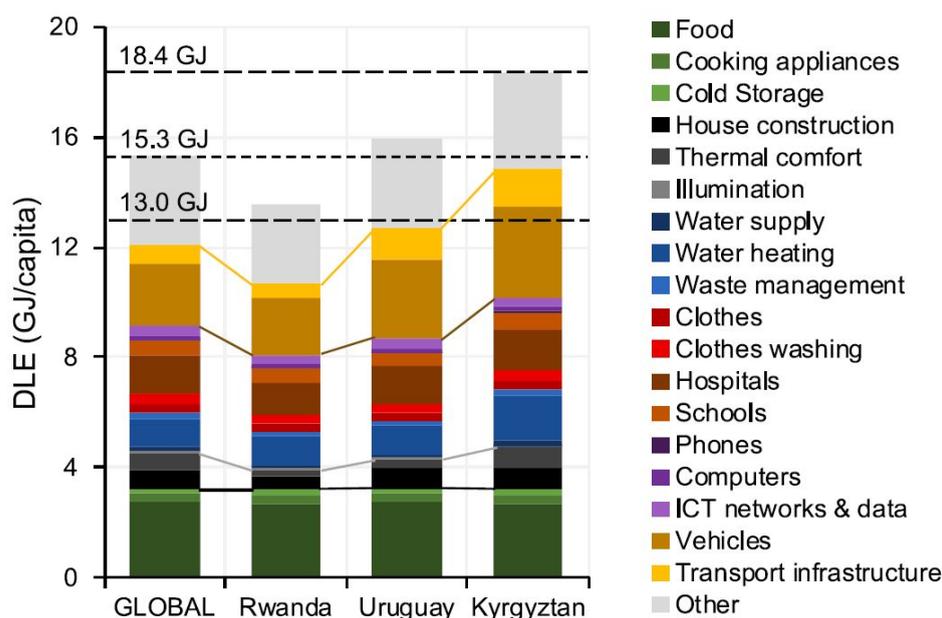


Figura 11: Energía final per cápita para una vida digna, diferenciando en categorías de consumo, para Ruanda, Uruguay, Kirguistán y la media global. En línea discontinua se indican los valores mínimos, medios y máximos. Extraído de Millward-Hopkins et al. 2020 [31]

Una vez establecidos estos niveles de energía mínima necesaria, se encuentra como la gran mayoría de los países evaluados, en torno a 100, tienen un consumo considerablemente superior a estos valores. Aquí, se recuerda que este hecho no quiere decir que el conjunto de la población de estos países esté disfrutando de la satisfacción de necesidades aquí descrita, y por tanto de una vida

digna. Más bien, la constatación de que esto no se cumple, reafirma que una de las problemáticas centrales a la hora de abordar el descenso energético es lograr una fuerte redistribución del consumo dentro de los países. La forma en la que un país transforma la energía final que está consumiendo en los servicios energéticos que permiten satisfacer las necesidades humanas para una vida digna de su población, es una cuestión de organización socio-política y económica. Lo que esta investigación muestra es cómo las fuertes desigualdades existentes se traducen en una *eficiencia social* del consumo energético muy baja.

Si estos resultados se trasladan a una estimación de demanda energética global para 2050, para una población mundial de  $\sim 10$  mil millones, se llega a un consumo de energía final de 149 EJ. Esto supone una reducción del 60 % con respecto a la demanda energética actual, y es un 40 % inferior a los 245 EJ definidos por Grubler et al. en su escenario LED, sobre el que ya hemos hablado [14]. Si comparamos esta demanda con la energía final aportada por fuentes renovables, encontramos que los 70 GJ actualmente aportados por estas fuentes llegarían a cubrir prácticamente el 50 % de los 149 GJ en 2050. Por lo tanto, la investigación de Millward-Hopkins et al. demuestra que lograr una reducción del impacto ecológico y el cumplimiento de los objetivos climáticos a partir de una fuerte reducción de la demanda energética no choca en absoluto con la extensión de unos estándares de vida digna para el conjunto de la población mundial. Los retos que deberán resolverse para lograr esto no tienen que ver con soluciones tecnológicas, sino con profundas transformaciones económicas y sociopolíticas. Esto viene a reforzar las conclusiones ya apuntadas en la investigación de Steinberger y Roberts [32]. Los países del Norte global y aquellos con mayores consumos energéticos per cápita podría disminuir muy considerablemente la demanda energética sin que ello suponga unas peores condiciones de vida. Por estos motivos, es fundamental que se diferencie dentro de la demanda actual entre el consumo de lujo, el de despilfarro y el de suficiencia.

## Anexo 3

### Ampliación: Estrategias de reducción de la demanda energética

En este anexo presentamos la ampliación de la recopilación bibliográfica realizada sobre las estrategias que son necesarias abordar para lograr los descensos del consumo energético marcados para los países del Norte global. Nos adentraremos en la estrecha relación entre consumo energético y crecimiento económico, presentaremos algunas comprensiones sobre los procesos mediante los cuales se constituye la demanda energética, y terminamos con una crítica a los actuales enfoques de eficiencia energética que nos conducirá a introducir algunas nociones sobre el enfoque de la suficiencia energética.

#### La necesidad de cuestionar el crecimiento económico

Podemos afirmar sin riesgo a equivocarnos que la principal causa de aumento de la demanda energética durante el último siglo ha sido el crecimiento económico. Son múltiples las investigaciones que muestran la estrecha correlación entre ambos parámetros. Una investigación que examinaba los datos de 220 países durante 24 años mostró cómo, en término medio, cada aumento del 1 % de la riqueza per cápita se asociaba a un incremento del 0,76 % del consumo de energía per cápita [38]. Análisis históricos muestran que el aumento del consumo energético no es una consecuencia del crecimiento económico, sino más bien al contrario, es justamente la disponibilidad de energía barata lo que ha impulsado y ha sido causa del crecimiento económico [4]. En apartados anteriores, ya hemos visto cómo este incremento en la demanda energética se desacopla de la satisfacción de necesidades humanas a partir de cierto nivel de saturación. Sin embargo, la obligación de mantener el crecimiento económico, por la necesidad de la reproducción ampliada del capital, ha hecho que la demanda siga creciendo hasta alcanzar unos niveles que actualmente no se pueden sostener.

Esto no es un secreto para nadie, y a medida que las evidencias acerca de las nefastas consecuencias medioambientales del actual modelo productivas y de desarrollo se acumulaban, se han lanzado diferentes teorías económicas para dar respuesta. Hace unas décadas la respuesta pasaba por la teoría de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), según la cual se llegaría a un punto de renta per cápita a partir de la cual los sucesivos aumentos reducirían los impactos medioambientales. Una teoría sostenida totalmente en contra de las evidencias empíricas que la contradecían [67].

Más recientemente, la teoría con la que se intenta dar respuesta a los retos de la crisis ecológica es la del *desacoplamiento* entre el crecimiento económico y diversos impactos medioambientales o el consumo de energía y materiales. Lo que se afirma es que se pueden mantener tasas de crecimiento económico elevadas al mismo tiempo que se reducen dichos impactos o consumos. Esta teoría está presente en los informes y recomendaciones de organismos internacionales de alto nivel como la OCDE, la Comisión Europea, el Banco Mundial o el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Así mismo, está incluida en la meta número 4 del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 8, aquel que persigue “promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible” [68]. Como hemos visto en secciones anteriores, a esta teoría se le confía la capacidad de lograr los descensos energéticos que permitan grandes reducciones de emisiones, como en el caso de la consideración del escenario LED de Grubler et al. [14] en los informes del IPCC, o en el escenario de emisiones cero-netas para 2050 de la AIE [6].

Ante la importancia que adquiere la teoría del desacoplamiento en el diseño de estrategias de transición ecológica, y concretamente ante la confianza en su capacidad de lograr reducciones en la

demanda energética, se hace necesaria una evaluación de las posibilidades reales de que esto pueda llegar a ocurrir. Para ello, presentaremos algunas de las conclusiones del informe “*Decoupling debunked*”, desarrollado por Parrique et al. en 2019 por encargo del European Environmental Bureau (EEB) [15]. En este informe se describen cuáles son los requisitos que deberían ser satisfechos por esta teoría para responder adecuadamente a los retos medioambientales que tenemos que abordar con urgencia, se analiza la falta de evidencias empíricas en el pasado acerca del cumplimiento de estos requisitos y se evalúan los motivos que dificultan la posibilidad de que esta situación cambie siguiendo el actual modelo de desarrollo basado en el crecimiento. En el informe se analizan diferentes estudios de desacoplamiento para materiales, energía, consumo de agua, emisiones GEI, uso de tierra, contaminantes del agua y pérdida de biodiversidad. Aquí nos centraremos en lo relativo a la vinculación entre demanda energética y crecimiento económico.

En primer lugar, debemos clarificar a qué nos referimos cuando hablamos de desacoplamiento. Cuando se habla de desacoplamiento entre crecimiento económico y consumo energético, el parámetro que se toma es la intensidad energética, medido como el cociente entre la energía primaria y el PIB. De esta forma, si este parámetro desciende, se considera que está ocurriendo un desacoplamiento *relativo* entre consumo energético y PIB. Sin embargo, lo que suele ocurrir es que una tasa de crecimiento del PIB superior a la del descenso de este parámetro impulsa un aumento del consumo de energía total, aunque la intensidad energética disminuya. Por eso nos interesa hablar de desacoplamiento *absoluto*, como aquel que experimentaría una tasa de crecimiento positiva junto a un descenso en la demanda energética. Así mismo, a la diferenciación entre desacoplamiento relativo o absoluto, se le deben añadir las diferenciaciones entre si estamos midiendo demanda territorial o huella energética, si el ámbito de análisis es local o global, si el desacoplamiento observado es temporal o se mantiene de forma permanente en el tiempo, y si dicho desacoplamiento logra los objetivos de reducción marcados con la velocidad necesaria. Es decir, la validez de esta teoría para el caso de las estrategias de descenso energético se comprobaría en el caso de que se pudiera lograr un desacoplamiento absoluto de la huella energética de forma permanente, que cumpliera con los objetivos marcados de reducción de la demanda energética y que lo hiciera en el periodo temporal necesario.

En la recopilación de estudios realizada por Parrique et al. vemos cómo esto no es algo que haya ocurrido en el pasado. Análisis realizados con datos de 180 países entre 1950 y 2014 muestran que la intensidad de energía primaria se ha mantenido constante a pesar del fuerte crecimiento económico. Mientras que algunas investigaciones hablan de un desacoplamiento, relativo y absoluto, del consumo energético territorial de Reino Unido durante los últimos 15 años con respecto al crecimiento económico, otras muestran cómo la gran parte estas mejoras en la intensidad energética no se deben a una mejora en la eficiencia, sino al proceso de deslocalizaciones de múltiples industrias. Así mismo, un análisis sobre el caso de Suiza entre 2000 y 2014 muestra cómo un descenso de un 44 % en la intensidad de energía final consumida territorialmente ha sido compensada por un aumento en la energía incorporada en las importaciones. Si esto se tiene en cuenta, la intensidad energética medida en términos de huella energética se mantendría prácticamente constante. Además, en términos absolutos el consumo energético aumentó en un 1 % según términos territoriales y en un 24,5 % según huella energética. Es relevante que muchos de estos análisis muestran la ausencia de evidencia empírica que valide la teoría del desacoplamiento sobre países europeos, pues esta teoría ha estado presente en la elaboración de sus políticas públicas durante las dos últimas décadas. De esta forma Parrique et al. afirman que más allá de algunas excepciones que muestran desacoplamientos relativos o absolutos, temporales, limitados espacialmente y considerando únicamente indicadores territoriales, no existe ninguna prueba empírica en el pasado que demuestre la viabilidad de cumplir objetivos medioambientales a partir de esta teoría.

Sin embargo, a pesar de que el desacoplamiento que buscamos no haya ocurrido en el pasado, podría existir la posibilidad de que ocurra en el futuro con las transformaciones o políticas públicas adecuadas. Parrique et al. afirman que esto es muy improbable que ocurra, si no imposible, y lo justifican con siete motivos de peso. Destacamos tres de ellos para el caso que nos ocupa. En primer lugar se indica cómo a medida que un recurso se extrae, aumenta el gasto de recursos y energía, pues primero se han utilizado las opciones más baratas. Esto es algo sobre lo que ya hemos hablado en secciones anteriores, y que se traduce en una reducción de la tasa de retorno energético. Si se quiere mantener el crecimiento con una baja TRE, lo que ocurrirá es que cada vez más energía deberá destinarse a los propios procesos de producción y aprovechamiento de energía. Si el consumo se mantiene constante en el resto de sectores de actividad económica, eso se traduciría en un aumento de la demanda energética.

En segundo lugar, la posibilidad de que ocurran los llamados efectos de rebote (paradoja de Jevons) hace que una mejora en la eficiencia energética pueda ser compensada parcial o totalmente por un aumento del consumo energético. Esto puede ocurrir tanto en la escala de hábitos individuales, como en la estructural. Por ejemplo la mejora en la eficiencia del consumo de combustible de los coches puede reforzar un modelo de movilidad basado en el automóvil individual, lo cual deriva en un aumento del consumo energético de movilidad total. Sobre esta cuestión profundizaremos más adelante.

En tercer lugar, destacamos el subestimado impacto energético que tiene el sector servicios. En la retórica del desacoplamiento se suele mencionar cómo una “terciarización” y “desmaterialización” de la economía, con un incremento del peso de la actividad económica del sector servicios, puede traducirse en una reducción del impacto ecológico y del consumo de recursos y energía. Sin embargo, esto lo único que hace es ocultar cómo estos impactos o consumos se han desplazado a otras regiones mediante deslocalizaciones industriales. Los servicios no existen al margen de la economía material, sino que lo hacen sobre ella, pues no pueden generarse sin la extracción de materias primas, el consumo de energía o la construcción de infraestructuras. Así mismo, se observa cómo son justamente aquellos países con un alto grado de terciarización, con más de un 70 % del valor añadido generado en el sector servicios, aquellos que tienen una mayor huella ecológica, por lo que es complicado que se obtengan mejoras derivadas de este proceso.

El conjunto de motivos presentados por Parrique et al. demuestran como la hipótesis de que se diera en el futuro un desacoplamiento adecuado para cumplir los objetivos de transición ecológica parece completamente irreal. Otras investigaciones, como la de Haberl et al., que realiza una revisión sistemática de 835 artículos científicos, llegan a conclusiones equivalentes [69]. Por lo tanto, confiar en que este desacoplamiento ocurrirá y seguir impulsando el crecimiento económico es una apuesta extremadamente arriesgada e irresponsable. La insistencia por parte de organismos internacionales de defender la estrategia del desacoplamiento como la forma de solucionar los retos ecológicos aparece como amenaza, pues lo más probable es que veamos cómo esto nunca se materializa, y la crisis ecológica no haya hecho más que aumentar en ese periodo.

Frente a ello, para abordar una estrategia efectiva de reducción de la demanda energética, lo primero que debemos hacer es cuestionar el crecimiento económico [70]. Bajo este marco, no será posible ningún descenso que no sea más que un mero malabarismo contable. Y, aunque fuera posible lograr el desacoplamiento adecuado para el caso del consumo energético, el crecimiento económico todavía seguiría siendo el impulsor del consumo de recursos materiales y otros procesos con un gran impacto ambiental, que también deben disminuir. Las estrategias de descenso energético deberán

pasar por una contracción planificada de la esfera económica, una reducción de la producción y del consumo, repartido de forma socialmente justa. En resumen, un proceso conocido como decrecimiento [42].

### Comprender la demanda energética para poder transformarla

Antes hemos mencionado el hecho de que 940 mil millones de personas viven en el mundo sin acceso a la electricidad, y también hemos visto cómo se podrían cumplir unos estándares de vida digna en el estado español reduciendo el consumo anual de energía final hasta 15,8 GJ per cápita. Pero estos dos elementos presentados de forma aislada no nos permiten comprender las formas en las que la demanda energética está entrelazada en las estructuras sociales, económicas y culturales que definen nuestras sociedades. Existen lugares en el planeta en el que vivir sin electricidad no significa un impedimento para llevar a cabo una vida plena. Al mismo tiempo, mientras que en 1950 un apagón apenas afectaba a la iluminación y los sistemas de ventilación de las oficinas de Estados Unidos, de forma que el trabajo podía continuar sin grandes problemas, actualmente grandes partes del país se convertirían en inhabitables en el caso de un corte del suministro eléctrico prolongado [39].

Afirmar, tal y como hemos afirmado en este trabajo, que los países del Norte global que más energía consumen podrían descender radicalmente su demanda y mantener unos estándares de vida dignos no quiere decir que eso sea posible bajo la forma en la que estas sociedades se estructuran actualmente. La demanda energética tiene relación con la forma en la que se satisfacen ciertas necesidades, pero dicha forma está condicionada por un contexto concreto: social, material e históricamente determinado. Comprender las dinámicas según las que evoluciona la demanda energética es fundamental para empezar a pensar cómo transformarla, para así lograr los fuertes descensos que son necesarios lograr en los países del Norte global. Para ello, en esta sección recorreremos varias de las investigaciones llevadas a cabo desde el centro de investigación *DEMAND (Dinámicas de la energía, la movilidad y la demanda)*, de la Universidad de Lancaster, en Reino Unido.

Si partimos del acuerdo de que cualquier persona tiene el derecho de acceder a aquellos bienes y servicios que le posibilitan disfrutar de una vida digna en sociedad, llegamos a la conclusión de que para ello debe tener el derecho de consumir la energía necesaria para tener acceso a estos bienes y servicios. La energía aquí se presenta como un *bien instrumental* que posibilita que determinadas necesidades sean cubiertas a partir de determinados satisfactores. Aquellas personas que no tengan acceso a la energía mínima necesaria para ello, estarán viviendo bajo *pobreza energética*. Pero ¿cuáles son esos bienes y servicios mínimos necesarios para un contexto social concreto? ¿en qué demanda energética se traducen? Esta es la cuestión que abordan Walker et al. en su investigación, basándose en los procesos deliberativos de los “Estándares de ingresos mínimos” (MIS) llevados a cabo en Reino Unido entre 2008 y 2014 [71]. Estos procesos han recopilado información acerca de cuáles son los bienes y servicios que distintos grupos sociales consideran esenciales para cubrir las necesidades básicas para la vida diaria, aquellos que permitan formar parte de la sociedad de forma adecuada. Se hace énfasis en que las personas participantes incluyan únicamente aquellos elementos que consideran necesarios para unos estándares mínimamente aceptables, dejando a un lado aquellos de los que les gustaría disponer pero no consideran esenciales. Esto permite desarrollar un enfoque en el que se asume que aquellos bienes y servicios considerados como esenciales son un constructo social, determinado por un entendimiento común de la sociedad. Un elemento se convierte en una “necesidad” cuando se percibe socialmente como tal.

Seis de las categorías de servicios definidas para este proceso requieren un consumo energético:

calefacción, iluminación, entretenimiento y comunicación, alimentación, limpieza y cuidado personal, jardinería y movilidad. Así mismo, algunos de los razonamientos utilizados para justificar la elección de bienes y servicios se agrupan bajo las categorías de salud y bienestar, participación e interacción social, desarrollo y oportunidades, y vivir la vida de forma práctica. Los resultados muestran que algunos electrodomésticos como nevera, congelador, aspiradora, lavadora, cocina y plancha son incluidos por todos los grupos durante todo el periodo estudiado. Esto ya establece un cierto nivel de consumo energético, pero resultan especialmente interesante otros resultados y la forma en la que se justifican. Por ejemplo, los participantes adultos justificaron que no tener acceso a internet supone una gran desventaja, ya que actualmente resulta necesario para poder llevar a cabo la búsqueda de empleo. Así mismo, la evolución de algunas respuestas por parte de determinados grupos durante el periodo de estudio es especialmente ilustrativa. En 2008, 2010 y 2012, las personas jubiladas consideraron que estaría bien tener un ordenador personal en casa, pero no lo consideraban como una necesidad, ya que podían utilizarlo en una biblioteca pública. Sin embargo, en 2014, todos los grupos de personas jubiladas consideraron que se debería incluir el ordenador como algo necesario. Este cambio ocurrió después de que se llevaran a cabo cierres y recortes en el presupuesto de las bibliotecas públicas. De forma similar, tras un encarecimiento del transporte público y un empeoramiento del servicio, las familias participantes en este proceso afirmaron que tener un coche era una necesidad, pues sin él les resultaría imposible llevar a cabo la crianza y una vida familiar adecuada con el poco tiempo del que disponían.

De esta forma, vemos cómo algunos elementos que inicialmente no se consideran esenciales para cubrir las necesidades básicas del día a día, pasan a serlo por las consecuencias de políticas de austeridad. Así vemos cómo el desmantelamiento de servicios públicos de infraestructuras provoca que las alternativas de propiedad y uso privado se establezcan socialmente como la expectativa que debe ser satisfecha para lograr una vida digna. Lo cual, en último término, se traduce en un incremento tanto de la demanda energética total como de la cantidad de energía necesaria para cubrir las necesidades básicas de la vida diaria.

La dinámica según la cual aumenta la demanda energética como consecuencia de políticas que no están directamente enfocadas hacia cuestiones energética ha sido algo bastante común. Entender cómo se desarrollan estas dinámicas es fundamental para abordar las sendas de descenso energético. Royston et al. analizaron aquello que denominan como “políticas energéticas invisibles” [40]. En su investigación observan cómo la demanda energética está fuertemente determinada por procesos y prioridades políticas, que en su mayoría no tienen entre sus objetivos modificaciones del consumo energético. Esto se puede ver en cómo la liberalización de los mercados laborales ha contribuido a incrementar las distancias de desplazamientos diarios, o en cómo el apoyo para la construcción de centros comerciales y grandes supermercados fuera de las ciudades ha supuesto un incremento de la demanda energética relacionada con el transporte. Así mismo, la firma de acuerdos de libre comercio ha facilitado el traslado de la producción industrial pesada europea a países en los que el proceso se realiza con un mayor consumo energético. Las decisiones que tienen estas consecuencias son tomadas a múltiples niveles, desde organismos internacionales, a gobiernos estatales o locales, pasando por instituciones como escuelas u hospitales. Mientras que objetivos como el crecimiento económico, la austeridad del sector público o la mercantilización, compartidos a múltiples niveles, afectan sobremanera a la demanda energética.

La forma en la que esto ocurre no es inmediata, sino que es un proceso largo en el que este incremento de la demanda energética queda sedimentado a partir de la construcción de infraestructuras y la cristalización de prácticas sociales. Serán estas infraestructuras y convenciones sociales las que creen fuertes dependencias en la demanda energética que son muy difíciles de revertir. Así mismo,

será esta dependencia la que impulse y justifique los futuros incrementos. Esto es algo que se ve claramente en la forma en la que el vehículo individual ha moldeado las ciudades hasta el punto en el que para algunas personas puede resultar imposible vivir y trabajar en ellas sin su uso. Este proceso fue descrito por Ivan Illich con el concepto de “monopolio radical”, que describe la forma en la que aquellas prácticas que inicialmente aparecían como una opción se acaban convirtiendo en una obligación [41]. Estos monopolios parten de una infraestructura física ya construida, tienen poderosos intereses económicos detrás e instauran convencionalismos y prácticas sociales, por lo que resulta enormemente difícil que puedan ser revertidos o que otras alternativas puedan extenderse [4]. De esta forma, mediante procesos que se traducen en infraestructuras y prácticas sociales se generan lo que podríamos denominar como “entornos energívoros”, que contribuyen a establecer una dependencia de un alto consumo energético. Lo que nos corresponde actualmente es buscar las formas en las que se pueden diseñar, construir y establecer socialmente espacios que minimicen las necesidades energéticas.

En este sentido, Geels et al. enfocan el descenso energético desde su comprensión de los *sistemas sociotécnicos*, como aquellos en los que los servicios energéticos se presentan a través de infraestructuras a gran escala, intensivas en capital y de larga duración, que coevolucionan con las tecnologías, instituciones, habilidades, conocimientos y comportamientos [37]. Son estos sistemas, físicos y sociales, los que permiten o limitan las preferencias, actitudes, expectativas y comportamientos. Sorrel describe cómo estos sistemas geográficamente extensos tienen una considerable inercia, y como una vez establecidos, bloquean o dificultan la implantación de tecnologías o comportamientos alternativos a los dominantes [38]. Así que para lograr llevar a cabo una reducción de la demanda energética se necesitarán transiciones sociotécnicas, que lleven a cabo transformaciones a gran escala sobre estos sistemas. Estas transiciones deberán superar la inercia y las tendencias establecidas durante los dos últimos siglos, y deberán hacerlo con la velocidad suficiente para limitar las peores consecuencias de la crisis ecológica. En el caso del sistema de movilidad, esto pasaría por una planificación del uso del suelo que minimice las necesidades de desplazamiento, por una mejora y extensión del sistema de transporte público y por la priorización de la bicicleta y los desplazamientos a pie en los desarrollos urbanísticos.

Así mismo, también podemos encontrar en el pasado ejemplos de cómo en situaciones de escasez energética se llevaron a cabo políticas públicas que lograron reducir el consumo energético. Es el caso de Japón en 2005, en el que el gobierno llevó a cabo una iniciativa para flexibilizar los códigos de vestimenta en las oficinas para así reducir la demanda de aire acondicionado. O el caso de Estados Unidos durante la crisis del petróleo en 1974, cuando se estableció el límite de velocidad en 55 millas por hora (88,5 km/h) para reducir el consumo de gasolina. También se ha visto cómo Brasil, California, Ontario y Noruega han logrado reducciones del consumo de hasta el 20 % de forma mantenida durante varios meses, debido a periodos de escasez de electricidad [46]. Pero en estos casos las medidas están orientadas hacia cambios conductuales que permitan reducir la demanda durante cortos periodos de crisis. Una vez se resuelve la situación que estaba detrás de la escasez, el consumo vuelve a los niveles históricos [44]. Un caso diferente del que se pueden extraer algunos aprendizajes es el del “Periodo Especial” de Cuba, entre los años 1991 y 2000. Como consecuencia de la caída de la Unión Soviética, las importaciones de petróleo se redujeron de forma brusca y el país tuvo que transformar y reverdecer su economía para adaptarse a la situación [72]. En todos estos casos, vemos cómo los usos energéticos que son percibidos socialmente como necesarios se pueden moldear hacia reducciones de la demanda.

Tal y como afirman Shove y Walker, debido a la forma en la que la energía está entrelazada con las prácticas sociales y el entorno las moldean, la demanda energética es una cuestión dinámica,

social, cultural, política e histórica [39]. Es a partir de esta comprensión desde la que debemos aproximarnos a la cuestión del descenso energético. La realización de cualquier práctica de la vida cotidiana depende de la existencia y disponibilidad de una serie de fuentes de energía, infraestructuras y dispositivos. Y, mientras que las prácticas sociales ocurren en el presente, la esfera de material de infraestructuras que las hace posible existe de forma previa y posterior a ellas. Es tanto un prerequisite como un impulsor. Esta esfera material moldea tanto las prácticas actuales como las infraestructuras y prácticas que todavía no existen pero que podrán hacerlo en el futuro. Hasta ahora, la demanda y los medios materiales que la hacen posible (centrales eléctricas, redes de carreteras, ordenadores, sistemas de calefacción, coches, etc.) se han constituido mutuamente hacia un incremento del consumo energético, la producción de cada vez más infraestructuras y dispositivos y la instauración de prácticas y convenciones sociales que cristalizan en una dependencia energética insostenible.

El problema ante el que nos encontramos es que muchos de los bienes y servicios que son percibidos y en el Norte global como socialmente esenciales, tienen un alto impacto en la demanda energética y representan unos “modos de vida occidentales” profundamente insostenibles. Esto es así por la forma en la que esta demanda se ha construido a partir de procesos históricos, sociales y culturales. Por lo tanto, no nos basta con afirmar que 15,8 GJ per cápita anuales son suficientes para una vida digna en el estado español. Sino que debemos actuar sobre aquellas dependencias, aquellos “monopolios radicales”, aquellos “entornos energívoros” y aquellos sistemas sociotécnicos que mantienen atrapada a nuestra sociedad en una vorágine de consumo excesivo. Por ejemplo, desmantelando ciertas infraestructuras y desarrollando otras que constituyan prácticas sociales que permitan satisfacer las necesidades para una vida digna a partir de mucha menos energía. Pero también poniendo el foco en la forma en la que todas aquellas “políticas energéticas invisibles” han colaborado a aumentar la demanda, y buscar la forma de actuar en el sentido contrario.

### **Pasar del enfoque de la eficiencia energética al de la suficiencia**

Las estrategias de gestión de la demanda llevadas a cabo hasta ahora abordan el objetivo de reducir el consumo energético a partir de la eficiencia tecnológica y de cierta modificación de los patrones de uso mediante mecanismos basados en el mercado [40], como diferentes tramos horarios en la factura eléctrica. Durante las últimas décadas, la eficiencia energética ha estado en el centro de las agendas de reducciones de emisiones de los grandes organismos internacionales. En el World Energy Outlook (WEO) de 2012 de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), se le atribuían a las medidas de eficiencia energética la mayoría de las reducciones de emisiones del “escenario 450”, definido en 2009. Según este escenario, que limitaría la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera en las 450 ppm, la eficiencia energética lograría el 71 % de la reducción de emisiones con respecto al escenario tendencial en el periodo hasta 2020, y el 48 % en el periodo hasta 2035 [73]. La forma en la que la AIE ha tratado a la eficiencia energética es considerándola como “energía evitada”. En el informe sobre el mercado de la eficiencia energética de 2015, la AIE afirmaba que el conjunto de las inversiones en este sector generaron desde 1990 un consumo evitado de 256 EJ [45]. Sin embargo, estas estimaciones no están referenciadas al consumo inicial, no son reducciones absolutas, sino que se refieren a reducciones con respecto al uso de energía proyectado según los escenarios tendenciales. De esta forma, vemos cómo mientras los informes se llenan de una descripción de los éxitos de la eficiencia energética, la demanda y la huella total de energía continúa aumentando.

En las últimas cuatro décadas, la eficiencia energética ha aumentado considerablemente en los países de la OCDE [47]. Pero este aumento se ha mostrado incapaz de lograr los niveles de descenso

energético y la reducción de emisiones que son necesarios para afrontar la responsabilidad del Norte global ante la crisis ecológica. Los motivos que justifican esta incapacidad se pueden resumir en tres cuestiones, aunque están interrelacionadas entre sí:

1. El efecto rebote, según el cual un aumento de la eficiencia en un servicio energético puede traducirse en un aumento de la demanda de dicho servicio, o de otros
2. El incremento del tamaño y potencia de los dispositivos, así como el aumento de los estándares de comodidad y la creación de nuevas necesidades, anulan los efectos de un incremento de la eficiencia energética
3. El propio concepto de eficiencia energética es contraproducente ya que reproduce y perpetúa unas comprensiones de servicios cada vez más intensivos en energía que son insostenibles

Sobre la primera cuestión ya hablamos brevemente en el apartado correspondiente al desacoplamiento. Se denomina efecto rebote al fenómeno según el cual los beneficios de las mejoras de la eficiencia son parcial o totalmente anulados por el crecimiento del consumo que ha sido posible como consecuencia de dichas mejoras de la eficiencia [42]. Este fenómeno también toma el nombre de “Paradoja de Jevons”, pues fue William Stanley Jevons quien primero escribió en 1865 sobre ello, analizando el caso del consumo de carbón en Reino Unido. Según la forma en la que se desarrolle, el efecto rebote puede ser directo, indirecto, o macroeconómico y estructural [42]. El efecto rebote directo describe la forma en la que una mejora de la eficiencia desencadena un aumento potencial de la demanda del servicio energético concreto sobre el que se produjo la mejora. Por ejemplo, al reducirse el gasto en combustible con coches más eficientes, se conducen distancias más largas. En el caso del efecto rebote indirecto, se produce el aumento potencial de la demanda de otros bienes o servicios que necesitan energía para ser producidos. Por ejemplo, el ahorro experimentado gracias a una climatización eficiente en el hogar es gastado en un viaje en avión. Y el efecto rebote que afecta a toda la economía es aquel en el que la reducciones de consumo obtenidas a partir de la eficiencia energética se traducen en un reequilibrio del sistema económico a través de los precios y las cantidades de bienes y servicios.

En la investigación que Freire-González llevó a cabo en 2017, se estimó cuantitativamente el efecto rebote directo e indirecto de la eficiencia energética en los hogares para los países de la UE-27 [43]. Se encuentra cómo un efecto rebote directo bajo puede desencadenar efectos rebote indirectos elevados, según las prácticas sociales y la estructura económica. Los resultados muestran como siete países (Chipre, Polonia, Bélgica, Bulgaria, Lituania, Suecia, Dinamarca y Finlandia) han sufrido un efecto rebote directo e indirecto superior al 100 %, lo que significa que las mejoras en eficiencia energética se han traducido en un aumento absoluto de la demanda energética. El resto de países están por debajo de ese valor, pero la mayoría de ellos superan el umbral del 50 %, de forma que la mitad del ahorro energético previsto por las medidas de eficiencia se habría visto contrarrestado por este efecto rebote. Estos valores establecen serias dudas acerca de las políticas de eficiencia energética europeas, y hacen necesario diseñar y aplicar medidas adicionales para así lograr reducir el consumo global de energía.

Los ejemplos en los que se desarrolla este fenómeno los podemos encontrar en diversos ámbitos. En Reino Unido, el consumo de energía del sector del transporte se mantuvo estable desde 2005, y aumentó desde 2014, a pesar de que los nuevos coches se han vuelto más eficientes en un 28 % para el caso de diésel y en un 32 % para el de gasolina [40]. Así mismo, también en Reino Unido, la temperatura media en el interior de los hogares aumentó desde los 13 °C en la década de 1970 hasta los 17,7 °C en 2011, como consecuencia del uso de calefacción en un mayor número de habitaciones.

A esto, se le suma la forma en la que las propias especificaciones de eficiencia energética impulsan a la fabricación de dispositivos más grandes y más potentes.

Esto fue analizado por Chris Calwell, en un informe realizado en 2010 para el “Consejo europeo por una economía eficiente energéticamente” (ECEEE) [44]. Mientras que el concepto de eficiencia persigue que un determinado servicio sea proporcionado con una menor cantidad de energía, lo que se observa es cómo lo que ha ocurrido es lo contrario: se proporciona un nivel más elevado de servicio a partir de la misma cantidad de energía. Así, se aumenta la eficiencia energética, pero no se reduce el consumo absoluto. Las deficiencias en el diseño de mecanismos de etiquetado de eficiencia energética de productos ha colaborado a este fenómeno. La medida de la eficiencia energética bajo parámetros como lúmenes/vatio o vatios/metro cuadrado, han favorecido al aumento del tamaño y la potencia de los dispositivos puestos en el mercado, pues gracias a este aumento les ha resultado más sencillo a los fabricantes lograr las mejoras en eficiencia. De esta forma, productos más grandes y potentes son etiquetados como eficientes. El resultado es que, por ejemplo, muchos de los televisores comprados hoy en día son tan grandes y con tantas prestaciones que van a consumir más electricidad que los dispositivos que sustituyen, independientemente de su eficiencia. Pero, incluso en aquellos dispositivos en los que las mejoras en la eficiencia han supuesto verdaderas mejoras, el consumo sigue aumentando, como en el caso de las neveras. Un nevera tenía en 1970 un consumo medio de 1.600 kWh/año, mientras que en 2010 este consumo había descendido hasta los 500 kWh/año, a pesar de que el volumen interior medio creció un 17%. Sin embargo, lo que se encuentra en los datos globales es que el consumo energético global asociado a las neveras ha aumentado durante este periodo, tanto por el incremento de hogares en el Norte global que tienen una segunda nevera, como por el incremento del acceso a la electricidad en regiones como China, Indonesia, Tailandia y Filipinas. De esta forma, si aun en uno de los casos más exitosos de eficiencia energética se sigue aumentando el consumo ¿cuál es la esperanza que se puede depositar en este enfoque?

Elizabeth Shove defiende que no se trata únicamente de que se necesite más eficiencia, sino que la cuestión es que el propio enfoque de la eficiencia energética es parte del problema [45]. En el momento en el que el objetivo es prestar servicios similares pero con menos energía, este enfoque, lejos de ser “neutral”, desempeña un papel importante en la reproducción del status quo [39]. Las estrategias de eficiencia energética reproducen muchas concepciones específicas de servicios, como confort, iluminación o movilidad, que no son sostenibles a largo plazo. Lo hacen separando la demanda energética de las necesidades que este consumo busca cubrir, centrándose únicamente en la forma concreta en la que actualmente se satisfacen. De esta forma, se abstrae y “purifica” a la energía con respecto a las situaciones y prácticas sociales en las que se utiliza y transforma. Pero, como hemos visto en el apartado anterior, la demanda está configurada y entrelazada por un conjunto relaciones materiales, históricas y sociales. Cuando los programas de eficiencia se centran en satisfacer las expectativas de los consumidores pero con menos energía, lo que están haciendo es perpetuar y estabilizar tanto estas concepciones establecidas de comodidad, e incluso de necesidad, como las formas de dependencia que están asociadas a ellas. En la búsqueda de ser capaces de ofrecer un servicio equivalente con un menor consumo, se legitiman, sostienen y aumentan unos modos de vida y unos sistemas sociotécnicos cada vez más intensivos en energía. Al hacerlo, estas políticas refuerzan también la creación de patrones de alta demanda energética en el futuro, de forma que su enfoque nos conduce y nos ata involuntariamente a un futuro insostenible. Por estos motivos, Shove apunta hacia un enfoque diferente, en el que se puedan crear edificios y dispositivos que no satisfagan las expectativas actuales ni ofrezcan servicios equivalentes, pero sí permitan sostener modos de vida mucho menos intensivos energéticamente. Cambiando el foco hacia las necesidades, como mantener caliente a la gente en invierno, se puede pensar en las reducciones en la demanda energética que se lograrían utilizando calderas modernas para calentar una sola habitación, o si se

utilizaran para mantener una temperatura de 16 °C en lugar de 19 °C.

Esta nueva forma de aproximarse a la cuestión del ahorro energético está representada por el enfoque de la suficiencia energética. Como afirma Samuel Alexander, para aprovechar el aumento en la eficiencia energética, necesitamos una economía de la suficiencia que dirija el aumento de la eficiencia hacia la reducción del impacto ecológico, en lugar de aumentar el crecimiento [42]. Señala cómo las tecnologías que aumentan la productividad laboral deben conducir hacia una disminución de las horas de trabajo, no a un aumento de la producción, de igual forma que las tecnologías que aumentan la eficiencia energética no deben utilizarse para “hacer más con los mismos insumos”, sino para “hacer lo suficiente con menos insumos”. Sarah Darby describió en 2010 como se puede definir la suficiencia energética en términos generales de dos maneras: una cualitativa y una cuantitativa [46]. Según la cualitativa, la suficiencia significa lograr el propósito de satisfacer una necesidad y que se alcance un estado óptimo. Según la cuantitativa, se definirían unos umbrales de aceptabilidad que permitan satisfacer dicha necesidad. De esta forma, la suficiencia cuantitativa establece unos “suelos” para cubrir lo necesario, y unos “techos” que indican el punto en el que un consumo es excesivo para la seguridad o el bienestar a largo o corto plazo. Darby desglosa el concepto de la suficiencia en tres aspectos: suficiencia ecológica, suficiencia de consumo energético y suficiencia de servicios energéticos. El primero de ellos examina si la actual provisión de servicios energéticos amenaza la capacidad del planeta de sostener a las sociedades humanas, manteniendo una biodiversidad suficiente y unos ecosistemas en buen estado. De esta forma, bajo el enfoque de la suficiencia, se establecen unas normas mínimas tanto para los servicios y las tecnologías que satisfacen las necesidades, como para los impactos medioambientales máximos que se pueden asumir. Ejemplos concretos que se mencionan para avanzar en este sentido pasan por reducir las horas de trabajo y los horarios de apertura de los comercios, o una mejora de infraestructuras para la movilidad a pie y en bicicleta.

Entre 2013 y 2016 se desarrolló, con la financiación del Ministerio de Investigación de Alemania, el proyecto “Energiesuffizienz” (Suficiencia energética: estrategias e instrumentos para una transformación técnica, sistémica y cultural hacia una restricción sostenible de la demanda energética en el ámbito de la construcción y la vida cotidiana). En este proyecto se examinó qué es realmente la suficiencia energética y las formas en las que se podría aplicar este enfoque al ámbito del consumo doméstico. Thomas et al. describen algunas de las conclusiones a las que llegaron, para el caso del consumo de electricidad en hogares [47]. El objetivo de su trabajo era determinar qué pueden hacer las familias, pero también los fabricantes y las autoridades locales, para lograr que el uso de la electricidad en el hogar sea más suficiente. El hilo conductor que les guía es la búsqueda de cómo se pueden satisfacer las demandas, necesidad y otros deseos, con dispositivos más pequeños, con un uso menos intensivo o utilizando diferentes formas de satisfacer las necesidades con un menor consumo de energía. De este modo, se presenta un método según el cual la suficiencia se lograría con una combinación de medidas de reducción, sustitución y ajuste. En la figura 12 se muestra el proceso según el cual estas medidas interactuarían tanto sobre la forma en la que ciertas necesidades básicas se transforman en necesidades y deseos concretos, a partir de medidas de sustitución, como sobre la cantidad de energía consumida en los dispositivos técnicos utilizados para satisfacer esas necesidades y deseos, a partir de medidas de reducción.

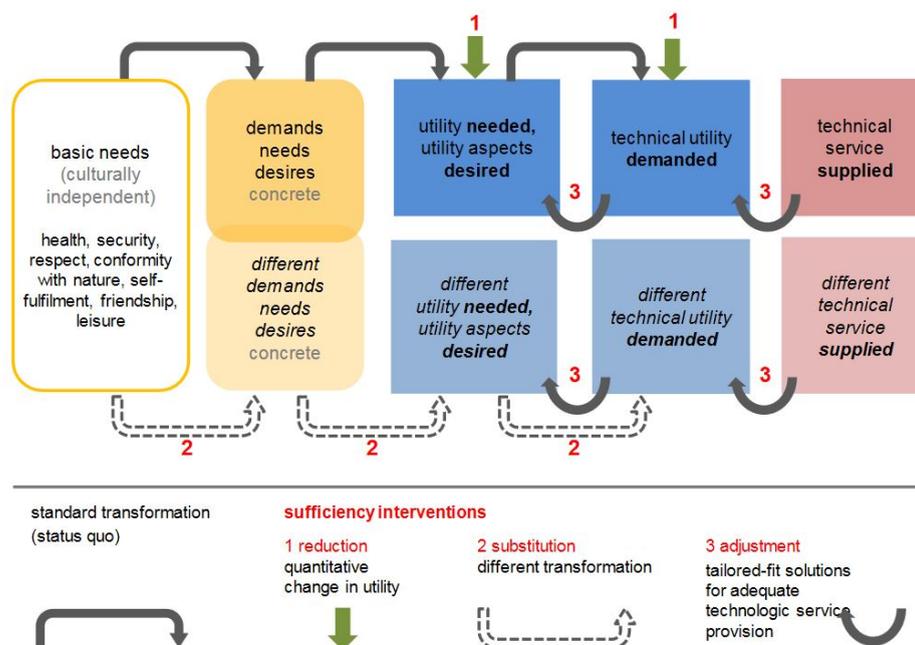


Figura 12: Representación de la cadena de transformaciones entre las necesidades básicas y el consumo de energía final, con las intervenciones de suficiencia señaladas. Extraído de Thomas et al. 2015 [47]

Bajo este esquema, se ve de forma clara cómo el objeto del análisis en la búsqueda de mayores niveles de suficiencia energética en el hogar no es un único producto que consume energía, sino que el punto de partida está en las necesidades básicas y en la forma en la que estas acaban traducándose en la demanda de unos servicios técnicos concretos. En su análisis, consideran que es poco probable que los objetivos de suficiencia se cumplan bajo una lógica de mercado, por lo que proponen que se lleven a cabo paquetes de políticas públicas que lo hagan posible. Estos paquetes deberían hacer posible que se lleven a cabo las transformaciones hacia la suficiencia, eliminando las restricciones que existan, haciendo la suficiencia lo más fácil y atractiva posible, y en última instancia, convirtiendo estos usos de suficiencia energética en la norma. Así mismo, Thomas et al. ponen especial énfasis en la necesidad de tener en cuenta la forma en la que las tareas reproductivas y de cuidados en el hogar tienen todavía una fuerte desigualdad de género, y en cómo las medidas de suficiencia energética que se decidan llevar a cabo no deben suponer una carga demasiado elevada para las personas encargadas de estas tareas. Esto establece dos dimensiones para evaluar la sostenibilidad de las transformaciones llevadas a cabo: social y medioambiental. La dimensión social se ocuparía de que el ahorro de energía no ocurra a costa de una externalización significativa del trabajo adicional sobre las tareas reproductivas y de cuidados, teniendo en cuenta si las acciones propuestas son aceptables o no para las personas que llevan a cabo estas tareas. La dimensión medioambiental se ocuparía de garantizar que estas transformaciones se traduzcan en un impacto positivo neto en el medio ambiente.

Thomas et al. desarrollan un ejemplo concreto de análisis, enfocado hacia la higiene de la ropa. En este caso, dentro de las diferentes opciones sustitutivas de los servicios energéticos actuales que consideran, descartan el lavado manual debido a la carga de trabajo que requiere, la cual no sería aceptable en términos sociales hacia las personas que llevan a cabo dichas tareas de cuidados. Señalan también cómo debería abordarse el hecho de que la capacidad de carga de las lavadoras que

dominan el mercado hayan aumentado hasta los 6, 7 y 8 kg, con especificaciones de eficiencia energética, mientras que hace 20 años la capacidad más común era de 5 kg. En este sentido, se debería exigir a las empresas fabricantes que produzcan lavadoras de menor tamaño que permitan avanzar hacia unos usos de suficiencia energética. Por último, se identifica como algunas de las opciones alternativas evaluadas necesitarían superar ciertas restricciones para poder llevarse a cabo. Este es el caso de lavanderías comunitarias en los edificios de viviendas habitados por varias familias o lavanderías de barrio. Se señala cómo los paquetes de políticas públicas deberían orientarse hacia superar estas restricciones y desarrollar estas infraestructuras y servicios.

De esta forma, vemos cómo los enfoques de la eficiencia energética aplicados mediante mecanismos basados en el mercado son incapaces de lograr el descenso energético por sí mismos. Para afrontar las transformaciones necesarias, tenemos que cambiar el enfoque de la eficiencia hacia la suficiencia energética, poniendo el foco en las necesidades básicas y en el proceso mediante el cual su satisfacción se realiza mediante dispositivos o servicios energéticos concretos. Esto no quiere decir que no haya que mejorar la eficiencia energética de dispositivos, edificios y servicios, sino que el foco no debe estar en una acumulación de mejoras incrementales. El foco debe estar puesto en buscar las formas en las que aquellas necesidades socialmente percibidas como tal se puedan cubrir mediante usos que reduzcan el consumo energético, aunque no se mantenga la equivalencia de servicio con respecto a la forma en la que esto ocurre actualmente. Aquí hemos presentado algunas de las investigaciones realizadas sobre este enfoque, de las que podemos extraer aprendizajes.

Sin embargo, muchos de estos enfoques siguen limitados al ámbito del consumo doméstico, el cual únicamente representa una porción de la demanda energética. Como recuerda Steve Sorrel, la mayor parte de la energía consumida por los hogares está incorporada en los bienes y servicios no energéticos [38]. Por lo tanto, el enfoque de la suficiencia energética también debería ser capaz de abordar la energía consumida en la producción y distribución, en las diferentes etapas de las cadenas de suministro globales. De hecho, esto representa otro problema del enfoque de la eficiencia energética. Si para obtener mejoras incrementales en la eficiencia energética de ciertos dispositivos se utilizan cada vez más soluciones de alta tecnología, que dependen de una mayor cantidad y diversidad de minerales y su fabricación involucra a unas cadenas de suministro global cada vez más extensas, lo que estamos haciendo es profundizar los sistemas sociotécnicos que nos anclan, tanto en el presente como en el futuro, a un consumo de energía excesivo. Cualquier análisis y estrategia de descenso energético deberá tener esto en cuenta, junto a un fuerte enfoque de la suficiencia en todos los ámbitos.

## Anexo 4

### Datos iniciales y adaptaciones consumo energético

En este anexo se presenta una descripción detallada de la recopilación de datos de partida con los que se realizan los cálculos posteriores. Así mismo, se describen los ajustes realizados para aquellos datos de consumo energético que no se correspondían de forma directa con los sectores considerados en el informe. Para empezar, presentamos en la siguiente tabla la descripción de cada uno de los sectores de actividad económica con los que trabajaremos.

Tabla 9: Descripción sectores actividad económica

Sector	Descripción
Alimen1	Agricultura y ganadería industriales
Alimen2	Agricultura y ganadería ecológicas
Alimen3	Absorción cultivos industriales
Alimen4	Absorción cultivos ecológicos
Alimen5	Pesca y acuicultura
Alimen6	Industrias de la alimentación, fabricación de bebidas e industria del tabaco
Alimen7	Captación, depuración y distribución de agua
Silvic1	Silvicultura y explotación forestal
Silvic2	Absorción sector forestal
Silvic3	Absorción praderas
Silvic4	Absorción humedales
Silvic5	Absorción otras tierras
Constru1	Industria de la madera y el corcho
Constru2	Absorción recogida madera
Constru3	Fabricación de otros productos minerales no metálicos salvo vidrio
Constru4	Extracción de minerales, piedra, arena y arcilla
Constru5	Construcción
Constru6	Emisión artificialización del suelo
Constru7	Actividades inmobiliarias
Constru8	Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería
Cuidad1	Fabricación de productos farmacéuticos
Cuidad2	Educación
Cuidad3	Sanidad
Cuidad4	Servicios sociales
Cuidad5	Reparación de ordenadores, efectos personales y artículos domésticos
Cuidad6	Otras actividades personales
Cuidad7	Personal doméstico empleado
Cuidad8	Cuidados no retribuidos y vida doméstica
Energ1	Coquerías y refino de petróleo
Energ2	Suministro de energía eléctrica no renovable, vapor y aire acondicionado
Energ3	Suministro de energía eléctrica renovable
Energ4	Extracción de combustibles fósiles
Resid1	Depuración de agua
Resid2	Recogida y tratamiento de residuos

Resid3	Incineración de residuos
Resid4	Compostaje y digestión anaerobia
Transp1	Fabricación de vehículos de motor, remolques y semirremolques
Transp2	Fabricación de otro material de transporte
Transp3	Venta y reparación de vehículos de motor y motocicletas
Transp4	Transporte terrestre por ferrocarril con motor fósil
Transp5	Transporte terrestre por ferrocarril con motor eléctrico
Transp6	Transporte por tubería
Transp7	Transporte terrestre por carretera
Transp8	Transporte marítimo y por vías navegables interiores
Transp9	Navegación internacional
Transp10	Transporte aéreo
Transp11	Almacenamiento y actividades anexas a los transportes
Turism1	Servicios de alojamiento
Turism2	Servicios de comida y bebida
Turism3	Agencias de viaje y operadores turísticos
Turism4	Aviación internacional
Indus1	Industria textil, confección de prendas de vestir e industria del cuero y del calzado
Indus2	Industria del papel
Indus3	Artes gráficas y reproducción de soportes grabados
Indus4	Industria química
Indus5	Vidrio
Indus6	Caucho y plástico
Indus7	Metalurgia, fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones
Indus8	Fabricación de productos metálicos, excepto maquinaria y equipo
Indus9	Fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos
Indus10	Fabricación de material y material eléctrico
Indus11	Fabricación de maquinaria y equipo n.c.o.p.
Indus12	Fabricación de muebles, otras industrias manufactureras
Indus13	Reparación e instalación de maquinaria y equipo
Ocio1	Edición
Ocio2	Cine, música, televisión y radio
Ocio3	Actividades de creación, artísticas y de espectáculos; actividades de bibliotecas, archivos, museos y otras actividades culturales; juegos de azar y apuestas
Ocio4	Deporte y actividades recreativas
Tic1	Telecomunicaciones
Tic2	Programación, consultoría y otros actividades relacionadas con la informática servicios de información
Finan1	Servicios financieros, excepto seguros y fondos de pensiones
Finan2	Seguros, reaseguros y fondos de pensiones, excepto seguridad social obligatoria
Finan3	Actividades auxiliares a los servicios financieros y a los seguros
Inves1	Investigación y desarrollo
Estado1	Administración pública, defensa y seguridad social

Comer1	Comercio al por mayor e intermediarios
Comer2	Comercio al por menor
Comer3	Publicidad y estudios de mercado
Otros1	Actividades postales
Otros2	Actividades jurídicas, de contabilidad y de consultoría de gestión empresarial
Otros3	Diseño, fotografía, traducción, veterinaria y otros
Otros4	Alquiler
Otros5	Actividades relacionadas con el empleo
Otros6	Actividades de seguridad e investigación; servicios a edificios y actividades de jardinería; actividades administrativas de oficina y otras actividades auxiliares a las empresas
Otros7	Actividades asociativas
Otros8	Actividades de organismos internacionales

### Validación de la hipótesis del modelo de cálculo

El artículo *Finance, energy and the decoupling: an empirical study*, publicado en 2017, nos permite encontrar una comprobación empírica de la hipótesis sobre la que se basa el modelo de cálculo [54]. En el informe original se trabajó considerando que el cociente entre emisiones y tiempo de trabajo se puede tomar como constante a lo largo del periodo estudiado. En este estudio se analiza el cociente entre el consumo de productos energéticos y las horas de trabajo en el conjunto de sectores de actividad económica. Este cociente es calculado para 14 países de la Unión Europea entre los años 1995 y 2013. Lo que se observa es cómo este cociente se ha mantenido prácticamente constante durante todo este periodo. En la figura 13 podemos observar este resultado ilustrado en la representación del cociente para los diferentes países a lo largo del periodo estudiado.

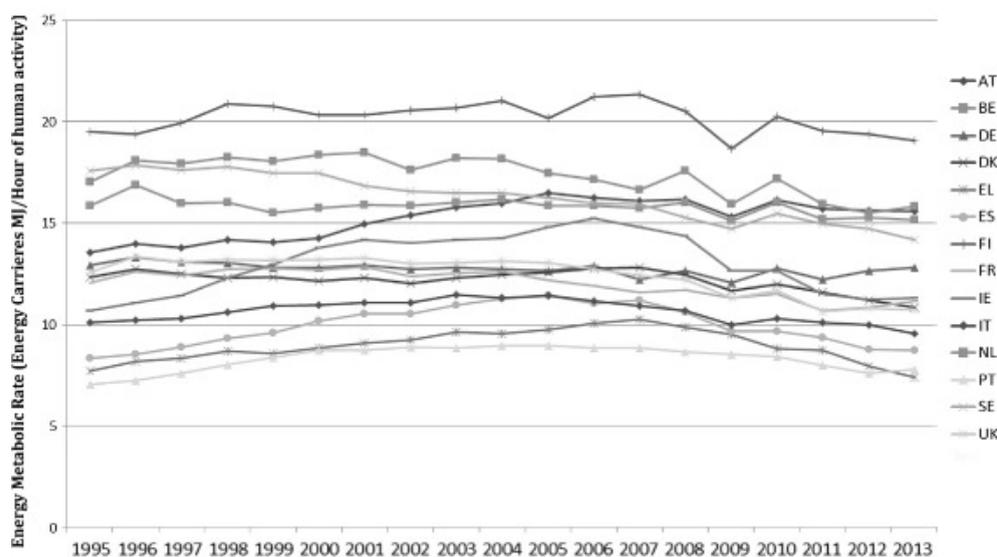


Figura 13: Tasa metabólica energética de la economía doméstica, excluyendo el sector financiero y el gobierno, para 14 países de la Unión Europea en el periodo 1995- 2013. Extraído de Kovacic et al. 2017 [54]

Lo que aquí se comprueba es que no ha habido una disminución en el consumo energético por hora trabajada en estos países durante este periodo. España, Grecia, Austria y Portugal aparecen como excepciones, con un pequeño incremento en la tasa metabólica energética analizada. Sin embargo, la justificación de esto se encuentra en las inversiones para la construcción de grandes infraestructuras realizadas por estos países antes de la crisis económica de 2008. Por lo tanto, consideramos que esta variación no es algo que pueda contradecir la tendencia general constante observada para este cociente, sobre todo aplicado a la década en la que centramos nuestro análisis. De esta forma, consideramos que se puede afirmar que existe una equivalencia entre el supuesto relativo a emisiones con el que se realizaba el cálculo en el informe original y el supuesto relativo a consumo energético que necesitamos para replicar dicho cálculo en este trabajo.

### Recopilación de los datos

Para realizar la adaptación de este modelo de escenarios al cálculo de consumos energéticos necesitamos localizar los datos de consumo energético desagregados según los sectores considerados en el informe original. Aunque el punto de partida es 2020, en el informe se trabaja con los datos recopilados para 2017, por lo que aquí haremos lo mismo. Se trata de 86 sectores definidos a partir de la agrupación de diferentes categorías de la *Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE)*. La única fuente de datos actualmente existente con un nivel de desagregación equivalente está en las *Cuentas de los flujos físicos de la energía*.

Las *Cuentas de los flujos físicos de la energía*, PEFA por sus siglas en inglés, se trata de una herramienta estadística creada por la *Oficina Europea de Estadística (Eurostat)* siguiendo la estructura y los principios definidos por el *Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica* [74]. Enmarcada en la *Contabilidad Medioambiental (CMA)*, PEFA registra los flujos de energía entre el medioambiente y el sistema económico de un país. La estructura contable utilizada es la de tablas de origen y destino físico adaptadas a partir de las tablas de origen y destino monetario usadas en

los sistemas de *Cuentas Nacionales*. De esta forma, no se trata de una contabilidad creada a partir de la obtención de nuevos datos específicos, sino a partir de la adaptación de diferentes contabilidades tradicionales ya existentes.

La fuente principal de datos utilizada para la construcción de PEFA son los *Cuestionarios anuales de estadísticas energéticas* establecidos de forma conjunta por la *Agencia Internacional de la Energía (IEA)* y *Eurostat*. Estas estadísticas son recopiladas y elaboradas cada año por las oficinas estadísticas de cada país. En ellas, podemos encontrar la distinción entre 13 industrias de fabricación, 5 industrias del sector energético y una única categoría para el sector de servicios. Sin embargo, la *Cuenta de los flujos físicos de la energía* aporta los datos energéticos según el nivel de desagregación mucho mayor en el que se distingue según las categorías de dos cifras CNAE. Por lo tanto, en la adaptación de los datos para la creación de PEFA se hace uso de fuentes adicionales de datos como las tablas de origen y destino monetario de los sistemas de Cuentas Nacionales, las estadísticas estructurales de empresas o la balanza de pagos del país en cuestión.

De esta forma, en PEFA se construyen las tablas que contabilizan tres tipos genéricos de flujos físicos (insumos naturales, productos y residuos) según las categorías de industrias, hogares, acumulación, resto del mundo y medio ambiente. Esto se hace manteniendo en todo momento la premisa de la *identidad suministro-uso* y de la *identidad origen-destino*, para asegurar la consistencia y evitar dobles contabilidades. Así mismo, la contabilidad que realiza PEFA se lleva a cabo siguiendo el *principio residencial*, lo que supone una diferencia con respecto a las estadísticas energéticas tradicionales, que se basan en el *principio territorial*. Es decir, contabilizan aquellos flujos de energía asociados a unidades domésticas que residan en el territorio, con independencia de dónde se tengan lugar esos flujos. Por su parte, las estadísticas energéticas tradicionales contabilizan aquellos flujos energéticos realizados en el interior del territorio, con independencia de si la responsabilidad de ese flujo es de una unidad doméstica que resida en el territorio o un agente extranjero que no resida en el territorio. Esta diferencia en el principio contable tiene especial influencia en actividades como el transporte de mercancías.

La información contenida en PEFA es mucha y no merece la pena extendernos demasiado al respecto. Para el caso que nos ocupa, son tres las tablas con las que vamos a trabajar:

- *ENV\_AC\_PEF04*: Principales indicadores de las cuentas de flujo de energía física por actividad CNAE. Concretamente, el indicador principal número 6 correspondiente al *uso neto de energía doméstica* [56].
- *ENV\_AC\_PEF05*: Cuentas de flujos de energía física que se unen a los totales de los balances energéticos, también llamada *tabla puente* [75].
- *ENV\_AC\_PEFASU*: Suministro y uso de energía por actividad CNAE. Concretamente, la tabla correspondiente al uso de energía final con los productos energéticos consumidos desglosados [57].

De la primera tabla obtenemos los datos de *uso neto de energía doméstica* para cada una de las categorías CNAE de dos cifras. Este indicador se define como:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Uso neto de energía doméstica} \\
 &= \textit{Residuos generados por las industrias} \\
 &+ \textit{Residuos generados por los hogares} \\
 &+ \textit{Acumulación de residuos en la economía}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Es decir, por un lado estamos incluyendo los residuos energéticos derivados de la producción y del consumo de los hogares con respecto a la energía física suministrada desde el medio-ambiente a través de entradas energéticas naturales y los productos energéticos resultantes de la producción doméstica así como aquellos importados. Por otro lado, estamos incluyendo la acumulación de residuos en el interior de la economía (por ejemplo, vertederos). Los dos primeros términos equivalen a la cantidad de energía que se utiliza de forma neta con fines energéticos por actividades económicas de las unidades residentes en el periodo de referencia.

Para clarificar y comprender mejor el significado de este indicador, acudimos a la *tabla puente*, en la que encontramos la siguiente relación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Energía doméstica usada por unidades residenciales (suma total del indicador 6)} \\
 & - \text{Actividades de residentes nacionales en el extranjero} \\
 & + \text{Actividades de no residentes en el territorio} \\
 & \pm \text{Otros ajustes y discrepancias estadísticas} \\
 & = \text{Consumo interior bruto de energía}
 \end{aligned} \tag{2}$$

De esta forma, vemos cómo el indicador 6 se corresponde con el consumo interior bruto de energía una vez se realizan las adaptaciones derivadas de la diferencia entre el principio contable *residencial* con respecto al *territorial*. Lo que esto quiere decir es que los valores de *uso neto de energía doméstica* para cada una de las categorías de actividad económica se corresponde con la porción de energía primaria de cuyo consumo es responsable. Esto no resulta intuitivo, pues lo que esperaríamos es que los datos desagregados por sectores de actividad económica se correspondieran con la energía final consumida por cada una de ellos. Sin embargo, esta correspondencia entre el indicador 6 con el consumo de energía final sí que se puede derivar de forma aproximada para todas aquellas categorías CNAE que no incluyan procesos de transformación de energía en el sentido clásico. En el caso de aquellas categorías CNAE que albergan procesos de transformación que convierten los *productos energéticos primarios* en *productos energéticos secundarios*, el indicador 6 se corresponderá efectivamente con el consumo de energía primaria asociado. Este segundo caso afecta a las categorías C19, C20, C24 y D35, que tienen su correspondencia con los sectores Energía 1, Industria 4, Industria 7 y Energía 2 respectivamente según la clasificación del informe.

Por último, de la tabla de *Suministro y uso de energía por actividad CNAE* presenta el conjunto de aportes energéticos naturales, productos energéticos y residuos energéticos que son suministrados, transformados, usados y consumidos en uso final para cada una de las categorías CNAE de dos cifras. Esta tabla nos interesa para conocer una aproximación a la distribución de productos energéticos consumidos en el uso final por cada sector. Esto será posible para aquellos sectores que no incluyan procesos de transformación de energía. En ellos, el *uso neto de energía doméstica* se puede considerar equivalente al consumo de energía final, por lo que podremos tomar por correcto el desglose de productos energéticos presentado por esta tabla para estas categorías. Los valores obtenidos de esta forma para el reparto de productos energéticos en los diferentes sectores se tomarán para dar una referencia cualitativa, pues dada la falta de equivalencia directa, encontramos algunas discordancias entre la suma total de productos energéticos consumidos con respecto a los datos oficiales aportados por organismos estatales.

### **Adaptaciones datos consumo energético a los sectores establecidos**

Como hemos indicado, Algunos de los sectores establecidos en el informe original no se corresponden de forma directa con la división NACE bajo la que se aportan los datos de las *Physical*

*Energy Flow Accounts (PEFA)* de Eurostat. Obtenemos una correspondencia directa para 62 de los 86 sectores. Los 24 restantes requerirán de una adaptación que nos permita determinar el consumo energético de estos sectores. Para ello haremos uso de estadísticas energéticas complementarias, otras fuentes de datos o algunos supuestos considerados.

En primer lugar, nos encontramos con algunos sectores que están presentes en el informe por su importancia en la emisión o absorción de emisiones, pero que no tienen unas horas de trabajo asociadas. En estos casos, consideramos que tampoco hay consumo energético asociado. Se trata de los siguientes sectores:

- Alimen3: Absorción cultivos industriales
- Alimen4: Absorción cultivos agroecológicos
- Silvicul2: Absorción sector forestal
- Silvicul3: Absorción praderas
- Silvicul4: Absorción humedales
- Silvicul5: Absorción otras tierras
- Constru2: Absorción recogida madera
- Constru6: Emisión artificialización del suelo

En segundo lugar, nos encontramos con algunos datos de consumo energético que se corresponden con varios de los sectores de actividad económica considerado. Por lo tanto, necesitaremos establecer algún método para repartir este consumo energético entre los diferentes sectores que lo componen. A continuación describimos las adaptaciones llevadas al cabo.

### **Adaptación Alimen1-Alimen2**

La diferenciación entre agricultura y ganadería industrial y ecológica se introduce desde el informe, las estadísticas no suelen recoger dos categorías diferentes al respecto. Por lo tanto, PEFA nos da un valor para la categoría NACE A01 correspondiente a “*Producción agrícola y animal, caza y actividades de servicios conexas*”. Seguimos la metodología aplicada en el informe para separar estas dos categorías: Se toma como base la ratio entre energía y tiempo de trabajo para determinar el consumo energético atribuible al sector Alimen2. A partir de ese dato, le aplicamos una reducción del 24 %, ya que el consumo energético no renovable por hectárea de la agricultura ecológica es un 24 % inferior al de la agricultura industrial [76]. Una vez obtenido el consumo energético atribuible al sector Alimen2, obtenemos el correspondiente a Alimen1 sustrayendo este valor del de la categoría NACE A01. De esta forma, la adaptación realizada es la siguiente:

$$Energía\ Alimen2 = Horas\ Alimen2 \cdot \left[ \frac{Energía\ A01}{Horas\ Alimen1 + Alimen2} \cdot (1 - 0,24) \right]$$

$$Energía\ Alimen1 = Energía\ A01 - Energía\ Alimen2$$

En cuanto al reparto de productos energéticos, mantenemos los porcentajes obtenidos en la categoría A01 para ambos sectores.

### Adaptación Constr3-Indus5

En PEFA se recoge el valor de consumo energético asociado a la categoría NACE C23 “Fabricación de otros productos minerales no metálicos”. Sin embargo, en el informe se realiza una diferenciación entre:

- Constr3: Fabricación de otros productos minerales no metálicos salvo vidrio (NACE: 232, 233, 234, 235, 236, 237, 239)
- Indus5: Fabricación de vidrio y productos de vidrio (NACE: 231)

Por lo tanto, debemos encontrar la forma de dividir el consumo energético de C23 entre esos dos sectores. Para ello nos basamos en el informe “Contribución económica, ambiental y social del sector del vidrio en España” publicado por Vidrio España, la asociación que integra a los productores responsables del 98 % de la producción española de vidrio. Según este informe, la producción anual de vidrio en 2016 fue de 3.731 kilo toneladas, y la intensidad energética de la producción de vidrio durante ese año fue de 1,89 MWh/tonelada [77]. De esta forma, tomaremos el valor de 606,32 ktep para el consumo energético asociado a la producción de vidrio. Por lo tanto, dividiremos las dos categorías según:

$$\text{Energía Indus5} = 606,32 \text{ ktep} = 17,77\% \text{ Energía C23}$$

$$\text{Energía Constr3} = \text{Energía C23} - \text{Energía Indus5} = 82,23\% \text{ Energía C23}$$

Mantenemos los porcentajes de productos energéticos obtenidos en la categoría C23 para ambos sectores.

### Adaptación Constr4-Energ4

En PEFA se recoge el valor del consumo energético asociado a la categoría NACE B “Minas y canteras” (CNAE 05-09). Sin embargo, en el informe se diferencia entre:

- Constr4 formado por:
  - Extracción de minerales de hierro (CNAE 071)
  - Extracción de minerales metálicos no férricos (CNAE 071)
  - Extracción de piedra, arena y arcilla (CNAE 081)
  - Industria extractiva n.c.o.p. (CNAE 089)
  - Actividades de apoyo a otras industrias extractivas (CNAE 099)
- Energ4 formado por:
  - Extracción de antracita y hulla (CNAE 051)
  - Extracción de lignito (CNAE 052)
  - Extracción de crudo de petróleo (CNAE 061)
  - Extracción de gas natural (CNAE 062)
  - Actividades de apoyo a la extracción de petróleo y gas natural (CNAE 091)

Para lograr una división de estas categorías acudimos a las estadísticas energéticas de Eurostat para obtener datos complementarios. En los *Balances energéticos completos* encontramos los consumos energéticos asociados a la minería de carbón y a las actividades extractivas de gas natural y petróleo. Los valores para estas actividades en el año 2017 fueron de 47,1 y 75,9 ktep respectivamente [78]. Por lo tanto, asumimos que el consumo energético de Energ4 será la suma de ambos. De modo que tendremos:

$$\text{Energía Energ4} = 123,0 \text{ ktep} = 18,17\% \text{ Energía B}$$

$$\text{Energía Construa} = \text{Energía B} - \text{Energía Energ4} = 81,83\% \text{ Energía B}$$

Mantenemos los porcentajes de productos energéticos obtenidos en la categoría B para ambos sectores.

### Adaptación Cuidados8

El informe realiza gran énfasis en la importancia de contabilizar de forma adecuada los cuidados, tanto aquellos retribuidos como los no retribuidos. El sector Cuidados8 representa los cuidados no retribuidos y vida doméstica. No hay una categoría NACE en PEFA que se corresponda con esto, sin embargo, sí que se presenta la categoría de “*Total de actividades de los hogares*” compuesta por:

- Actividades de calefacción/refrigeración en los hogares
- Actividades de transporte de los hogares
- Otras actividades de los hogares

Consideramos que esta categoría es atribuible al sector Cuidados8 en su conjunto. El valor para 2017 fue de 31.498,46 ktep. Las transformaciones a las que se somete el sector en los diferentes escenarios considerará una evolución independiente para cada uno de los tres consumos que conforman el sector.

### Adaptación Energ3

En el informe se establece una categoría diferenciada en el sector energético: Energ3 “*Producción eléctrica con renovables*”. Sin embargo, esta categoría no está vinculada con ningún sector NACE, y por lo tanto no aparece en PEFA. Está claro que existe un consumo energético relacionado con la construcción y operación de parques de energías renovables, sin embargo, quizás podemos considerar que este consumo se encuentra ya recogido en otras de las categorías presentes. Así mismo, podemos considerar que los consumos directamente asociados con el funcionamiento de las tecnologías son cubiertos por la producción, siendo el resultado final de esta el de una producción neta. De esta forma, al igual que se hizo en el informe original con las emisiones, consideramos que no hay un consumo energético asociado a este sector:

$$\text{Energía Energ3} = 0$$

### **Adaptación Resid1-Resid2-Resid3-Resid4**

En PEFA se incluye la categoría NACE E37-39 “Alcantarillado, gestión de residuos, actividades de saneamiento”. Sin embargo, en el informe se diferencia entre:

- Resid1: Recogida y tratamiento de aguas residuales (CNAE 370)
- Resid2: Recogida de residuos (CNAE 381); Tratamiento y eliminación de residuos (CNAE 382); Actividades de descontaminación y otros servicios de gestión de residuos (CNAE 390)
- Resid3: Valorización (CNAE 383)
- Resid4: Compostaje y digestión anaerobia

En primer lugar, consideramos que no hay un consumo asociado al sector Resid4. Esto no es del todo cierto, desde luego, pero dada la gran dificultad para obtener datos específicos sobre el consumo energético de esta actividad y un peso relativamente pequeño con respecto al resto, asumimos el pequeño error que se pueda derivar de esta consideración. En segundo lugar, dado que no hemos encontrado datos sobre el reparto del consumo entre los tres primeros sectores, decidimos realizar el reparto según los valores orientativos de los pesos porcentuales que representan según las horas de trabajo asociadas y las emisiones de las que son responsables. Establecemos un reparto en 15 %, 70 % y 15 %. Por lo que finalmente obtendremos:

$$\text{Energía Resid1} = 15 \% \text{ Energía E37 - 39}$$

$$\text{Energía Resid2} = 70 \% \text{ Energía E37 - 39}$$

$$\text{Energía Resid3} = 15 \% \text{ Energía E37 - 39}$$

$$\text{Energía Resid4} = 0$$

Mantenemos los porcentajes de productos energéticos obtenidos en la categoría E37-39 para ambos sectores.

### **Adaptación Transp4-Transp5-Transp6-Transp7**

En PEFA se recoge el consumo energético de la categoría NACE H49 “Transporte terrestre y transporte por tuberías”. El valor recogido para esta categoría durante el año 2017 es de 9.498,91 ktep. Sin embargo, en el informe esta categoría está dividida en cuatro sectores:

- Transp4: Transporte terrestre por ferrocarril con motor fósil
- Transp5: Transporte terrestre por ferrocarril con motor eléctrico
- Transp6: Transporte por tubería
- Transp7: Transporte terrestre por carretera

Aquí debemos recordar que la categoría H49 no recoge el conjunto del consumo energético del transporte, sino aquellos consumos relacionados específicamente con servicios de transporte. El resto del consumo energético del transporte está repartido en aquellas actividades económicas que requieren del transporte para desarrollar su producción y en las actividades de movilidad atribuidas al ámbito doméstico. En este sentido, no podemos distribuir el consumo energético de la categoría

H49 en estos cuatro sectores mediante los porcentajes que podemos encontrar a partir de datos oficiales para el conjunto del consumo energético del transporte. Pues al representar únicamente una porción del total, no tenemos ninguna garantía de que se mantengan los porcentajes globales dentro de esta porción. Por este motivo, nos aproximamos a esta cuestión desde otra perspectiva.

Haremos uso del reparto de productos energéticos dentro de cada uno de los sectores. Este es un reparto que sí que podemos considerar que se mantiene equivalente para la porción del consumo que estamos analizando. De esta forma, podremos plantear un sistema de ecuaciones que establezca el reparto de la categoría H49 en los diferentes sectores considerados en el informe. Presentamos a continuación una tabla con el reparto de productos energéticos obtenida a partir de datos de los *Balances energéticos completos* de Eurostat [78].

Tabla 10: Reparto productos energéticos transporte

	Transporte por ferrocarril	Transporte por carretera	Transporte por tubería
<b>Consumo final [ktep]</b>	393.01	28,052.81	70.94
<b>Prod. Petrolíferos [ktep]</b>	79.08	26,648.74	0.00
<b>Prod. Petrolíferos [%]</b>	20.12 %	94.99 %	0.00 %
<b>Electricidad [ktep]</b>	313.93	4.99	21.75
<b>Electricidad [%]</b>	79.88 %	0.02 %	30.67 %
<b>Gas natural [ktep]</b>	0.00	114.70	49.18
<b>Gas natural [%]</b>	0.00 %	0.41 %	69.33 %

Por otro lado, presentamos la tabla con el reparto de productos energéticos de la categoría H49 en PEFA.

Tabla 11: Reparto productos petrolíferos categoría H49

	[ktep]	[%]
<b>Productos energéticos</b>	9,498.50	-
<b>Petroleo y productos petrolíferos</b>	8,105.90	85.30 %
<b>Gas natural</b>	495.2	5.20 %
<b>Renovables y productos de desechos</b>	254.9	2.70 %
<b>Electricidad</b>	639.6	6.70 %
<b>Calor</b>	2.8	0.00 %

Con estos datos podemos plantear un sistema de ecuaciones a partir de los porcentajes de reparto de los productos energéticos para los diferentes tipos de transporte. Para el cálculo en el sistema de ecuaciones agrupamos Transp4 y Transp5 en una misma categoría de transporte por ferrocarril, posteriormente dividiremos ambos sectores.

$$\begin{cases} [Electricidad] : 0,7988 \cdot Transp_{4-5} + 0,3067 \cdot Transp_6 + 0,00018 \cdot Transp_7 = 639,6 \\ [Productos petrolíferos] : 0,2012 \cdot Transp_{4-5} + 0,9499 \cdot Transp_7 = 8,105,9 \\ [Gas natural] : 0,6933 \cdot Transp_6 + 0,0041 \cdot Transp_7 = 495,2 \end{cases}$$

De los resultados obtenidos extraeremos los porcentajes sobre el conjunto y les aplicamos la división entre  $Transp_4$  y  $Transp_5$  a partir del reparto de productos energéticos productos petrolíferos y electricidad. De esta forma, obtenemos los siguientes resultados:

$$Energía Transp_4 = 20,12\% \cdot 5,69\% \cdot Energía H49 = 1,147\% \cdot Energía H49$$

$$Energía Transp_5 = 79,88\% \cdot 5,69\% \cdot Energía H49 = 4,552\% \cdot Energía H49$$

$$Energía Transp_6 = 6,91\% \cdot Energía H49$$

$$Energía Transp_7 = 87,39\% \cdot Energía H49$$

En estos resultados nos llama la atención el porcentaje significativo atribuido al consumo energético del transporte por tubería, lo cual da lugar a un valor absoluto considerablemente superior al recogido en la tabla 10. La explicación que le atribuimos a este hecho es la diferencia en la contabilidad según el principio residencial, frente al principio territorial. De esta forma, los consumos energéticos en transporte por tubería llevados a cabo por unidades residenciales fuera del territorio son los que explican esta diferencia.

Para completar esta adaptación, realizamos algunos ajustes adicionales en los porcentajes de distribución de los productos energéticos. En la siguiente tabla presentamos los porcentajes finalmente fijados para los productos energéticos de estos cuatro sectores.

Tabla 12: Porcentajes iniciales productos energéticos en transporte

	<b>Petróleo y productos petrolíferos</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Renovables y productos de desecho</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Calor</b>
Transp4	100.000 %	0.000 %	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Transp5	0.000 %	0.000 %	0.000 %	100.000 %	0.000 %
Transp6	0.000 %	69.330 %	0.000 %	30.760 %	0.000 %
Transp7	96.340 %	0.484 %	3.071 %	0.064 %	0.034 %

### Adaptación Transp9

El sector asociado en el informe a Trans9 es el de la “*Navegación internacional*”. Esta categoría no está recogida en PEFA. Sin embargo, sí que la podemos encontrar en los *Balances de Energía Completos* de Eurostat como “*Búnkeres marítimos internacionales*” [78]. Por lo tanto, tomamos el valor de esta categoría para Transp9:

$$\text{Energía Transp9} = 6,681,78 \text{ ktep}$$

Asumimos que todo el consumo energético se da en forma de productos petrolíferos.

### Adaptación Transp10-Turism4

El sector Transp10 se corresponde con “*Transporte aéreo*” y el sector Turism4 se corresponde con “*Aviación internacional*”. En PEFA, ambas categorías se recogen en la división NACE H51, que para 2017 toma un valor de 4.234,06 ktep. En estas categorías, cobra una especial importancia la diferencia entre el principio residencial y el principio territorial. En el valor asignado para la categoría H51 de PEFA se ha sustraído la parte correspondiente a los servicios de transporte aéreo operados en el territorio por unidades no residentes, y se ha añadido la parte correspondiente a los servicios de transporte aéreo operados por unidades residentes en el extranjero. En la “*PEFA brigade table*” podemos encontrar los valores que se corresponden con estos ajustes (4.090 ktep y 943 ktep respectivamente)[75]. Para separar el valor de consumo energético que nos aporta PEFA para la categoría H51 nos apoyamos en los *Balances energéticos completos* de Eurostat, donde encontramos las categorías diferenciadas de “*Domestic Aviation*” y de “*International Aviation*”. Los valores para el año 2017 en España de estas categorías es de 2.162,46 y 4.580,85 ktep respectivamente [78].

De este modo, tomaremos los porcentajes que suponen cada una de las categorías sobre el conjunto de la suma de las dos categorías en los *Balances energéticos completos* para distribuir el consumo energético asignado en PEFA a la categoría H51. Resultando:

$$\text{Energía Transp10} = 32,1 \% \text{ Energía H51} = 1,357,79 \text{ ktep}$$

$$\text{Energía Turism4} = 67,9 \% \text{ Energía H51} = 2,876,27 \text{ ktep}$$

Haciendo esto, estamos asumiendo implícitamente que la parte correspondiente a los ajustes de la “*PEFA brigade table*” se reparte de forma equivalente entre ambos sectores.

Mantenemos los porcentajes de productos energéticos obtenidos en la categoría H51 para ambos sectores.

## Adaptación Turism1-Turism2

En PEFA se recoge la categoría NACE I “Actividades de alojamiento y restauración”, la cual está dividida en dos sectores en el informe:

- Turism1: Servicios de alojamiento
- Turism2: Servicios de comida y bebida

En el informe, a la hora de realizar la distribución de emisiones, considera que “las emisiones de GEI en el turismo del alojamiento y del sector de restauración son equivalentes en los países de renta alta”. De forma que reparte al 50 % las emisiones de ambos sectores. En nuestro caso, vamos a realizar la misma distribución en lo relativo al consumo energético. De forma que:

$$\text{Energía Turism1} = 50\% \text{ Energía I}$$

$$\text{Energía Turism2} = 50\% \text{ Energía I}$$

De esta forma, completamos las adaptaciones que necesitamos hacer para obtener todos los consumos energéticos asociados a cada uno de los sectores sobre los que trabajaremos. En la siguiente tabla se presentan los datos iniciales relativos a horas de trabajo, emisiones de  $CO_2\text{-eq}$  y consumo energético.

Mantenemos los porcentajes de productos energéticos obtenidos en la categoría I para ambos sectores.

Tabla 13: Datos iniciales trabajo, emisiones y consumo energético

Sector	Trabajo anual [horas]	Emisiones [kt CO <sub>2</sub> -eq]	Consumo energético [ktep]
Alimen1	1,477,873,085.4	45,052.2	2,801.8
Alimen2	17,126,136.7	259.5	24.6
Alimen3	0.0	-2,864.1	0.0
Alimen4	0.0	-605.8	0.0
Alimen5	58,541,741.3	2,774.3	620.0
Alimen6	970,805,575.9	4,089.0	2,679.7
Alimen7	88,875,884.0	61.5	34.7
Silvic1	12,549,397.8	101.9	83.9
Silvic2	0.0	-34,231.4	0.0
Silvic3	0.0	-69.9	0.0
Silvic4	0.0	54.7	0.0
Silvic5	0.0	35.4	0.0
Constru1	113,611,113.8	1,472.1	659.0
Constru2	0.0	-1,929.1	0.0
Constru3	131,221,979.9	28,870.6	2,806.0
Constru4	12,354,941.9	1,745.8	554.1
Constru5	1,987,586,377.8	684.3	1,829.4
Constru6	0.0	1,276.8	0.0
Constru7	206,941,024.5	66.2	417.6
Constru8	428,479,309.8	155.8	166.5

Cuidad1	148,396,120.4	677.6	528.6
Cuidad2	1,858,279,772.4	812.6	702.3
Cuidad3	1,852,823,558.7	1,107.0	665.5
Cuidad4	825,416,683.1	488.5	348.7
Cuidad5	112,804,896.1	16.7	23.2
Cuidad6	543,223,464.5	97.9	158.4
Cuidad7	849,448,416.7	0.0	0.0
Cuidad8	42,975,336,528.0	70,018.7	31,498.5
Energ1	18,162,804.1	16,093.7	9,087.7
Energ2	40,990,000.3	68,232.1	30,774.2
Energ3	37,719,673.2	0.0	0.0
Energ4	3,040,971.3	91.0	123.0
Resid1	7,294,754.0	2,393.6	8.3
Resid2	59,310,627.9	9,017.8	38.6
Resid3	15,263,974.0	148.9	8.3
Resid4	3,954,669.1	634.7	0.0
Transp1	404,515,731.4	888.1	529.3
Transp2	111,746,433.7	228.0	110.4
Transp3	598,714,158.9	676.0	613.4
Transp4	7,851,296.2	244.6	109.0
Transp5	44,490,678.5	0.0	432.4
Transp6	814.8	814.8	656.4
Transp7	1,004,057,540.6	30,029.3	8,301.1
Transp8	33,960,337.0	3,079.5	1,130.9
Transp9	21,680.4	21,680.4	6,681.8
Transp10	67,026,923.2	15,265.0	1,359.1
Transp11	352,872,031.8	660.7	419.9
Turism1	758,166,738.8	301.1	456.7
Turism2	2,276,570,466.1	301.1	456.7
Turism3	120,433,409.7	36.2	84.6
Turism4	17,065.8	17,065.8	2,874.9
Indus1	293,054,546.6	786.6	333.4
Indus2	83,962,683.1	2,720.6	1,659.0
Indus3	134,621,584.9	213.9	145.1
Indus4	208,802,333.7	9,710.1	6,170.8
Indus5	32,629,924.1	471.8	606.3
Indus6	163,961,318.8	951.7	57.3
Indus7	154,416,248.5	13,424.2	4,889.6
Indus8	368,534,046.2	572.2	456.8
Indus9	69,558,882.0	85.9	24.5
Indus10	124,984,887.1	669.0	179.2
Indus11	275,408,690.0	627.4	165.2
Indus12	242,452,632.0	66.9	9.4
Indus13	187,668,940.5	35.2	32.5
Ocio1	93,528,789.0	34.4	83.8
Ocio2	162,170,188.0	110.2	190.2
Ocio3	292,718,006.1	31.1	183.4

Ocio4	307,945,423.1	38.8	153.4
Tic1	179,776,987.4	139.6	304.1
Tic2	424,687,034.9	267.2	134.0
Finan1	383,179,804.0	96.7	217.2
Finan2	201,572,356.5	30.5	85.6
Finan3	71,727,539.8	146.5	134.8
Inves1	47,691,014.7	83.7	85.6
Estado1	2,230,889,587.0	2,719.9	1,152.1
Comer1	1,483,721,397.8	3,113.8	1,400.4
Comer2	3,619,238,593.0	3,001.4	1,310.0
Comer3	192,184,265.4	43.0	79.5
Otros1	195,576,373.6	94.2	114.3
Otros2	899,420,693.2	187.9	243.5
Otros3	255,006,804.2	31.8	60.9
Otros4	84,288,811.2	42.8	119.9
Otros5	123,048,280.2	6.1	40.3
Otros6	1,228,495,771.8	140.8	202.1
Otros7	176,034,141.9	397.9	147.3
Otros8	799,590,699.1	0.0	0.0

### Equivalencia con datos oficiales y distribución productos energéticos

Deberá realizarse una equivalencia entre el valor de consumo energético total y el valor de consumo energético primario que se presenta en informes estatales oficiales como el *Libro de la Energía* [34]. Para ello, necesitamos realizar algunas aclaraciones:

1. Los propios datos de PEFA presentan una categoría de discrepancia estadística que debe ser tomada en cuenta.
2. A la suma de valores asignados a cada uno de los sectores a partir del indicador 6, uso neto de energía doméstica, le deberemos realizar el ajuste descrito en la *PEFA bridge table* para así poder compararla con las estadísticas energéticas recopiladas según el *principio territorial*
3. En la adaptación de los datos para fijar la equivalencia con cada uno de los sectores del informe hemos tenido que añadir un valor que no se encontraba recogido. Se trata del consumo energético de la navegación internacional, que tampoco se encuentra incluida en el dato de consumo energético primario, por lo que para hallar la equivalencia debe ser sustraído.

De esta forma, el ajuste necesario será el que se presenta en la tabla 14. Esto nos permite mantener la coherencia dentro de la contabilidad energética realizada por Eurostat. Sin embargo, hay una pequeña discrepancia, de unos 1.000 ktep aproximadamente, con respecto al valor presentado por el *Libro de la Energía* para el consumo de energía primaria en el año 2017. Atribuimos este hecho a una diferencia no significativa entre ambas contabilidades y consideramos que esto no es un problema para seguir trabajando con estos datos.

Tabla 14: Ajuste suma total consumo energético sectores

	[ktep]	Operación
<hr/>		

<b>Suma total consumo energético sectores</b>	132,030.68	
<b>Discrepancia estadística entre suministro y uso del conjunto de actividades</b>	1,924.20	+
<b>Consumo energético navegación internacional (Transp9)</b>	6,681.78	—
<b>Ajustes tabla puente de PEFA</b>		
<b>Actividades de producción y consumo de unidades residentes en el extranjero</b>	3,156.33	—
<b>Actividades de producción y consumo en el territorio de unidades no residentes</b>	5,662.49	+
<b>Ajustes y discrepancia estadística</b>	1,368.05	+
<b>Resultado del ajuste de la suma total</b>		
<b>Consumo interior bruto de energía</b>	131,147.30	

Por su parte, una vez definidos los valores iniciales para el consumo energético de cada uno de los sectores, podremos aproximarnos a la distribución de productos energéticos correspondiente. Como se ha mencionado antes, podemos realizar la equivalencia a partir de los datos que aporta PEFA para todas las categorías excepto las asociadas a los sectores Energ1, Energ2, Indus4 e Indus7. De esta forma, en todo lo que tenga que ver con el reparto de productos energéticos, no tendremos en cuenta estos sectores. El resultado de la resta del consumo energético total menos el consumo de estos cuatro sectores es de 81.107 ktep. Esto difiere de los 84.899 ktep de consumo de energía final en 2017, que se presenta en el *Libro de la Energía* [34]. La diferencia sería probablemente mayor si restamos el consumo energético asociado a la navegación internacional, pues no está recogido en las estadísticas energéticas oficiales. En la tabla 15 se presenta una comparación entre la distribución de productos energéticos que resulta de la suma total de nuestros datos iniciales con respecto a los valores aportados por el *Libro de la Energía*.

Tabla 15: Comparación entre distribución productos energéticos en los datos iniciales con respecto al Libro de la Energía

	<b>Carbón y productos secundarios</b>	<b>Petróleo y productos petrolíferos</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Renovables y productos de desecho</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Calor</b>
<b>Datos iniciales</b>						
[ktep]	120.6	48,351.5	10,691.8	5,003.2	16,620.3	319.3
[%]	0.1 %	59.6 %	13.2 %	6.2 %	20.5 %	0.4 %
<b>Datos oficiales 2017 - Libro de la Energía</b>						
[ktep]	1,662.0	43,387.0	13,486.0	5,806.0	20,559.0	-
[%]	2.0 %	51.1 %	15.9 %	6.8 %	24.2 %	-

Podemos ver cómo existen ciertas diferencias, tanto en términos absolutos como en el reparto de porcentajes. Sin embargo, como hemos dicho, nuestra intención a la hora de trabajar con estos datos de distribución de productos energéticos es la de una aproximación cualitativa. Por lo que somos conscientes de estas discrepancias, pero consideramos que no son un impedimento para

evaluar los cambios en la distribución según los diferentes escenarios estudiados, que es lo que nos interesa.

Para completar la presentación de los datos iniciales con los que trabajamos en este estudio, incluimos a continuación el reparto de los productos energéticos consumidos en su uso final por cada uno de los sectores. En primer lugar, la siguiente tabla muestra la agrupación en siete categorías amplias de los productos energéticos de los que se aportan datos.

Tabla 16: Agrupación de la clasificación de productos energéticos

<b>Carbón y productos secundarios</b>	
P08.	Hulla
P09.	Lignito pardo y turba
P10.	Gases derivados (gases manufacturados excepto biogás)
P11.	Productos derivados del carbón [coque, alquitrán de hulla, aglomerado, briquetas de lignito pardo (BKB) y productos de la turba]
<b>Petróleo y productos petrolíferos</b>	
P12.	Petróleo crudo, líquidos de gas natural (GNL) y otros hidrocarburos (sin biocomponentes)
P14.	Gasolina (sin biocomponentes)
P15.	Querosenos y carburantes tipo gasolina para aviones de reacción (sin biocomponentes)
P16.	Nafta
P17.	Gasóleos de transporte (sin biocomponentes)
P18.	Gasóleo de calefacción y otros gasóleos (sin biocomponentes)
P19.	Fuel-oil
P20.	Gas de refinería, etano y GLP
<b>Gas natural</b>	
P13.	Gas natural (sin biocomponentes)
<b>Nuclear</b>	
P22.	Combustible nuclear
<b>Biocombustibles</b>	
P23.	Madera, residuos de madera y otra biomasa sólida, carbón vegetal
P24.	Biocarburos líquidos
P25.	Biogás
<b>Electricidad</b>	
P26.	Energía eléctrica
<b>Calor</b>	
P27.	Calor

Al estar hablando de uso final, algunos de estos productos energéticos no aparecerán como consumo en ninguno de los sectores, pues entran en juego en la actividad económica pero para sufrir transformaciones de productos energéticos primarios a productos energéticos secundarios. Este es el caso del combustible nuclear. Por simplicidad, dado que su consumo es cero para todos los sectores, no lo representaremos. A continuación se encuentra la tabla con el reparto de los porcentajes de productos energéticos para cada uno de los sectores.

Tabla 17: Distribución inicial porcentual de productos energéticos

Sector	Carbón y productos secundarios	Petróleo y productos petrolíferos	Gas natural	Renovables y productos de desecho	Electricidad	Calor
Alimen1	0.0 %	77.3 %	2.6 %	3.0 %	16.8 %	0.2 %
Alimen2	0.0 %	77.3 %	2.6 %	3.0 %	16.8 %	0.2 %
Alimen3	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Alimen4	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Alimen5	0.0 %	98.9 %	0.0 %	1.1 %	0.0 %	0.0 %
Alimen6	0.8 %	17.6 %	40.4 %	8.0 %	33.2 %	0.0 %
Alimen7	0.0 %	94.0 %	2.7 %	3.3 %	0.0 %	0.0 %
Silvic1	0.0 %	66.0 %	2.7 %	5.5 %	25.5 %	0.3 %
Silvic2	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Silvic3	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Silvic4	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Silvic5	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Constru1	0.0 %	8.0 %	23.2 %	48.4 %	20.4 %	0.0 %
Constru2	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Constru3	0.3 %	41.8 %	35.9 %	6.7 %	15.4 %	0.0 %
Constru4	0.0 %	37.1 %	22.5 %	0.6 %	39.8 %	0.0 %
Constru5	0.0 %	69.1 %	18.1 %	1.6 %	11.2 %	0.0 %
Constru6	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Constru7	0.0 %	5.3 %	27.9 %	0.9 %	65.4 %	0.6 %
Constru8	0.0 %	26.0 %	19.4 %	1.5 %	52.5 %	0.5 %
Cuidad1	2.2 %	59.7 %	21.5 %	0.1 %	16.6 %	0.0 %
Cuidad2	0.0 %	20.4 %	18.5 %	1.3 %	59.3 %	0.5 %
Cuidad3	0.0 %	13.0 %	19.8 %	1.4 %	65.2 %	0.6 %
Cuidad4	0.0 %	36.5 %	14.8 %	2.3 %	46.0 %	0.4 %
Cuidad5	0.0 %	8.5 %	21.7 %	0.9 %	68.3 %	0.6 %
Cuidad6	0.0 %	12.4 %	19.8 %	0.9 %	66.3 %	0.6 %
Cuidad7	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	100.0 %	0.0 %
Cuidad8	0.3 %	58.2 %	11.9 %	9.7 %	19.1 %	0.8 %
Energ1	-	-	-	-	-	-
Energ2	-	-	-	-	-	-
Energ3	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Energ4	0.0 %	37.1 %	22.5 %	0.6 %	39.8 %	0.0 %
Resid1	0.0 %	90.7 %	6.7 %	2.6 %	0.0 %	0.0 %
Resid2	0.0 %	90.7 %	6.7 %	2.6 %	0.0 %	0.0 %
Resid3	0.0 %	90.7 %	6.7 %	2.6 %	0.0 %	0.0 %
Resid4	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Transp1	0.0 %	11.7 %	28.0 %	0.3 %	60.0 %	0.0 %
Transp2	0.0 %	27.6 %	15.8 %	0.6 %	56.0 %	0.0 %
Transp3	0.0 %	52.5 %	12.6 %	2.2 %	32.5 %	0.0 %
Transp4	0.0 %	100.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Transp5	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	100.0 %	0.0 %
Transp6	0.0 %	0.0 %	69.3 %	0.0 %	30.8 %	0.0 %
Transp7	0.0 %	96.3 %	0.5 %	3.1 %	0.1 %	0.0 %
Transp8	0.0 %	95.4 %	3.0 %	0.1 %	1.6 %	0.0 %

Evaluación de escenarios de descenso energético para la transición ecológica

Transp9	0.0 %	100.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Transp10	0.0 %	97.8 %	1.3 %	0.3 %	0.5 %	0.0 %
Transp11	0.0 %	27.7 %	21.5 %	0.9 %	49.5 %	0.4 %
Turism1	0.0 %	25.4 %	17.5 %	6.5 %	50.1 %	0.4 %
Turism2	0.0 %	25.4 %	17.5 %	6.5 %	50.1 %	0.4 %
Turism3	0.0 %	52.3 %	13.7 %	2.3 %	31.4 %	0.3 %
Turism4	0.0 %	100.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
Indus1	0.0 %	18.3 %	38.4 %	0.9 %	42.3 %	0.0 %
Indus2	0.0 %	5.6 %	33.8 %	34.7 %	25.8 %	0.0 %
Indus3	0.0 %	16.5 %	31.7 %	0.1 %	51.7 %	0.0 %
Indus4	-	-	-	-	-	-
Indus5	0.3 %	41.8 %	35.9 %	6.7 %	15.4 %	0.0 %
Indus6	0.0 %	95.9 %	0.3 %	3.8 %	0.0 %	0.0 %
Indus7	-	-	-	-	-	-
Indus8	0.0 %	19.7 %	30.2 %	0.2 %	49.8 %	0.1 %
Indus9	0.0 %	21.0 %	7.2 %	0.5 %	71.2 %	0.1 %
Indus10	0.0 %	22.3 %	22.9 %	0.3 %	54.4 %	0.1 %
Indus11	0.0 %	31.9 %	22.9 %	0.6 %	44.6 %	0.1 %
Indus12	0.0 %	95.9 %	0.3 %	3.8 %	0.0 %	0.0 %
Indus13	0.0 %	51.9 %	42.5 %	3.3 %	0.0 %	2.3 %
Ocio1	0.0 %	4.5 %	20.3 %	4.6 %	70.1 %	0.6 %
Ocio2	0.0 %	20.0 %	17.0 %	1.5 %	60.9 %	0.5 %
Ocio3	0.0 %	8.4 %	20.5 %	0.9 %	69.6 %	0.6 %
Ocio4	0.0 %	6.5 %	20.8 %	1.2 %	70.9 %	0.6 %
Tic1	0.0 %	13.0 %	18.3 %	0.7 %	67.4 %	0.6 %
Tic2	0.0 %	9.0 %	23.5 %	0.6 %	66.3 %	0.6 %
Finan1	0.0 %	14.3 %	19.5 %	0.9 %	64.7 %	0.6 %
Finan2	0.0 %	20.1 %	19.6 %	1.2 %	58.6 %	0.5 %
Finan3	0.0 %	63.4 %	7.8 %	2.7 %	25.8 %	0.2 %
Inves1	0.0 %	34.7 %	16.0 %	1.7 %	47.2 %	0.4 %
Estado1	0.0 %	31.9 %	18.1 %	1.5 %	48.0 %	0.4 %
Comer1	0.0 %	40.2 %	19.2 %	1.8 %	38.4 %	0.3 %
Comer2	0.0 %	8.0 %	23.6 %	0.8 %	67.1 %	0.6 %
Comer3	0.0 %	18.0 %	20.0 %	1.5 %	60.0 %	0.5 %
Otros1	0.0 %	29.8 %	16.1 %	1.2 %	52.4 %	0.5 %
Otros2	0.0 %	13.1 %	23.0 %	1.0 %	62.4 %	0.5 %
Otros3	0.0 %	13.8 %	22.5 %	1.3 %	62.0 %	0.5 %
Otros4	0.0 %	35.0 %	21.8 %	1.4 %	41.5 %	0.4 %
Otros5	0.0 %	13.0 %	21.8 %	0.8 %	63.9 %	0.6 %
Otros6	0.0 %	19.7 %	23.8 %	1.8 %	54.1 %	0.5 %
Otros7	0.0 %	27.6 %	17.3 %	1.5 %	53.1 %	0.5 %
Otros8	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %

## Anexo 5

### Factores ajuste posteriores a la simulación

En los cálculos realizados en el informe original, se realiza un ajuste posterior a la simulación para algunos de los sectores. Esto se realiza para establecer transformaciones en la estructura del sector que no eran posibles contemplar en la simulación con el programa. En la siguiente tabla presentamos los factores a partir de los cuales se realiza el ajuste para cada uno de los sectores.

Tabla 18: Factores ajuste originales aplicados a las emisiones

Sector	Factor de ajuste			Justificación
	BAU	GND	D	
Alimen1	1	1	1	
Alimen2	1	1	0.7	Reflejar mayor uso tracción animal
Alimen3	1	-	-	
Alimen4	1	-	-	
Alimen5	1	0.7	0.5	Reflejar desarrollo de la pesca artesanal de bajura y a vela
Alimen6	1	0.7	0.7	Reflejar electrificación maquinaria, un incremento del uso de fuerza física humana y aumentos de eficiencia
Alimen7	1	1	1	
Silvicul1	1	1	1	
Silvicul2	1	-	-	
Silvicul3	1	-	-	
Silvicul4	1	-	-	
Silvicul5	1	-	-	
Constru1	1	0.7	0.7	Reflejar electrificación maquinaria, un incremento del uso de fuerza física humana y aumentos de eficiencia
Constru2	1	-	-	
Constru3	1	1	1	
Constru4	1	1	1	
Constru5	1	1	1	
Constru6	1	-	-	
Constru7	1	1	1	
Constru8	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Cuidado1	1	1	1	
Cuidado2	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Cuidado3	1	0.8	0.8	Menor climatización
Cuidado4	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Cuidado5	1	1	1	
Cuidado6	1	1	1	
Cuidado7	1	1	1	
Cuidado8	-	-	-	Menor climatización de los espacios
Energia1	1	1	1	
Energia2	1	1	1	

Energia3	1	1	1	
Energia4	1	1	1	
Residuo1	1	0.7	0.7	
Residuo2	1	0.8	0.8	Uso de medios de transporte menos contaminantes en la recogida de residuos
Residuo3	1	1	1	
Residuo4	1	1	1	
Transpor1	1	1	1	
Transpor2	1	1	1	
Transpor3	1	1	1	
Transpor4	1	1	1	
Transpor5	1	1	1	
Transpor6	1	1	1	
Transpor7	1	1	1	
Transpor8	1	1	1	
Transpor9	1	0.57	0.17	
Transpor10	1	1	1	
Transpor11	1	1	1	
Turismo1	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Turismo2	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Turismo3	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Turismo4	1	0.38	0.04	
Indus1	1	0.7	0.7	Reflejar electrificación maquinaria, un incremento del uso de fuerza física humana y aumentos de eficiencia
Indus2	1	1	1	
Indus3	1	1	1	
Indus4	1	0.9	0.9	Desarrollo de la producción artesanal con maquinarias sencillas poco intensivas en el uso de energía y una electrificación del sector
Indus5	1	1	1	
Indus6	1	1	1	
Indus7	1	1	1	
Indus8	1	1	1	
Indus9	1	1	1	
Indus10	1	1	1	
Indus11	1	1	1	
Indus12	1	0.7	0.7	Reflejar electrificación maquinaria, un incremento del uso de fuerza física humana y aumentos de eficiencia
Indus13	1	1	1	
Ocio1	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Ocio2	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Ocio3	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Ocio4	1	1	1	
Tic1	1	1	1	
Tic2	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Finan1	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios

Finan2	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Finan3	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Inves1	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Estado1	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Comer1	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Comer2	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Comer3	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Otros1	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Otros2	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Otros3	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Otros4	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Otros5	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Otros6	1	1	1	
Otros7	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios
Otros8	1	0.5	0.5	Menor climatización de los espacios

Establecemos unas pautas comunes para adaptar los factores de ajuste aplicados a los resultados de emisiones para el caso de los resultados de energía. En la siguiente tabla presentamos los diferentes supuestos que se dan, la adaptación que vamos a realizar para el consumo energético y los parámetros en los que nos basaremos:

Tabla 19: Supuestos ajuste, adaptación y parámetros

Supuesto	Adaptación	Parámetros
Reflejar mayor uso tracción animal	Reducción neta, reducción atribuida de forma completa al consumo de productos petrolíferos.	Factor de energía (FE)
Reflejar desarrollo de la pesca artesanal de bajura y a vela	Reducción neta, reducción atribuida de forma completa al consumo de productos petrolíferos.	Factor de energía (FE)
Reflejar electrificación maquinaria, un incremento del uso de fuerza física humana y aumentos de eficiencia	Reducción neta combinada con una redistribución en los porcentajes de los productos energéticos consumidos. Reducción de carbón, productos petrolíferos y gas natural, aumento de electricidad	Factor de energía (FE) Factor de redistribución
Menor climatización de los espacios	Reducción neta con una distribución del descenso equivalente para todos los productos energéticos.	Factor de energía (FE)
Uso de medios de transporte menos contaminantes en la recogida de residuos	Reducción neta, reducción atribuida de forma completa al consumo de productos petrolíferos.	Factor de energía (FE)

Desarrollo de la producción artesanal con maquinarias sencillas poco intensivas en el uso de energía y una electrificación del sector	Reducción neta combinada con una redistribución en los porcentajes de los productos energéticos consumidos. Reducción de carbón, productos petrolíferos y gas natural, aumento de electricidad.	Factor de energía (FE) Factor de redistribución
---	---	--

Dado que los factores de ajuste presentados en el informe describen una reducción en las emisiones, nos apoyaremos en los factores de emisiones de los diferentes productos energéticos presentes en el uso final de cada uno de los sectores. De esta forma, podremos aproximarnos a la reducción de emisiones directamente vinculadas con el consumo de estos productos energéticos correspondiente con las transformaciones realizadas. Así, los factores de ajuste del informe serán utilizados como objetivo que alcanzar con estas adaptaciones.

Aquí necesitamos hacer una aclaración sobre el factor de emisiones de la electricidad. A diferencia del resto de productos energético, este factor de emisiones no se deriva de las propiedades físico-químicas de los mismos, sino que depende del mix eléctrico del año en cuestión. Por lo tanto, se trata de un factor variable. Para simplificar los cálculos establecemos un único factor de emisiones para la electricidad en los cálculos correspondientes. Esto no se ajusta fielmente a las transformaciones que representan los diferentes escenarios, pues en algunos la penetración de energías renovables en el mix eléctrico sería más acusado que en otros, y por lo tanto el factor de emisiones sería también menor. Pero asumimos el pequeño error que se pueda derivar de esto para poder llevar a cabo la aproximación que nos permita calcular los factores para el ajuste de los resultados posterior a la simulación.

Para establecer la estimación del factor de emisiones del mix eléctrico en 2030 de la forma más precisa posible consultamos el *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC)* [79]. En la siguiente tabla presentamos los factores de emisiones asociados a la producción de electricidad según el escenario tendencial y el escenario objetivo que se contemplan.

Tabla 20: Factores emisiones electricidad según escenario tendencial y objetivo PNIEC

<b>Intensidad de carbono de la producción de electricidad y vapor [t CO<sub>2</sub>-eq/MWh]</b>				
	2015	2020	2025	2030
Escenario tendencial	0.264	0.202	0.146	0.141
Escenario objetivo	0.264	0.201	0.086	0.059

Los valores del escenario objetivo son los que se corresponden con una generación eléctrica formada por un 74 % de renovables. Un objetivo equivalente ha sido incluido en la Ley de Cambio Climático y Transición Energética. Por estos motivos, elegimos trabajar con el factor de emisiones considerado para 2030 por el escenario objetivo del PNIEC, que toma un valor de  $0,059tCO_{2-eq}/MWh$  [79]. A modo de comparativa, podemos observar cómo el factor de emisiones correspondiente a la

generación eléctrica de 2017 fue de  $0,287tCO_2\text{-eq}/MWh$  [80], por lo que la disminución que estamos asumiendo es considerable.

A continuación, presentamos los factores de emisiones que tomamos para los productos energéticos.

Tabla 21: Factores emisiones productos energéticos

Producto energético	Factor de emisiones [g CO2/kWh]	Fuente
Carbón y productos secundarios	360.0	MITECO
Petróleo y productos petrolíferos	258.1	MITECO
Gas natural	203.0	MITECO
Electricidad (2030)	59.0	PNIEC

Podremos estimar la reducción de emisiones vinculadas al consumo de los productos energéticos debida a las adaptaciones propuestas según:

$$Reducción\ emisiones_{sector} = \frac{(Energía\ Ajustada\ 2030)_{sector} \cdot (F.\ Emisiones\ Ajustado)_{sector}}{(Energía\ Resultado\ 2030)_{sector} \cdot (F.\ Emisiones\ Resultado)_{sector}} \quad (3)$$

Calcularemos el factor de emisiones correspondiente a un sector según

$$Factor\ emisiones_{sector} = \sum^{prod.energ.} (\% Prod. energ.) \cdot (Factor\ Emisiones\ Prod. energ.) \quad (4)$$

Será esta reducción de emisiones la que deberá aproximarse lo máximo posible al factor de ajuste establecido como objetivo para cada uno de los sectores.

Tal y como se ha descrito en la tabla, según el supuesto, utilizaremos uno o dos parámetros para lograr las transformaciones. El “Factor de Energía” (*FE*) establece una reducción neta con respecto a los resultados obtenidos por la simulación. De esta forma, para aquellos supuestos en los que se utilice únicamente este factor tendremos que:

$$Reducción\ emisiones_{sector} = \frac{[FE \cdot (Energía\ Resultado\ 2030)_{sector}] \cdot (F.\ Emisiones\ Ajustado)_{sector}}{(Energía\ Resultado\ 2030)_{sector} \cdot (F.\ Emisiones\ Resultado)_{sector}} \quad (5)$$

En aquellos casos en los que la reducción se distribuya de forma equivalente entre los diferentes productos energéticos el factor de emisiones de 2030 será igual al de 2020. Sin embargo, en aquellos casos en los que atribuyamos el conjunto de dicha reducción a un producto energético específico (productos petrolíferos, por ejemplo), el factor de emisiones de 2030 cambiará, pues habrán cambiado los porcentajes de distribución de los productos energéticos. En ese caso, habrá que volver a calcular este factor de emisiones. En el primer supuesto, el *Factor de Energía* se corresponderá con el *Factor de Ajuste* del sector en cuestión. En el segundo supuesto, no tiene por qué ser así y puede variar levemente.

En aquellos otros supuestos en los que se produce una redistribución en los porcentajes de los productos energéticos, necesitaremos aplicar de forma combinada con el *Factor de Energía* un “*Factor de Redistribución*”. Lo que este factor hace es establecer una reducción en algunos productos energéticos que son compensadas con incrementos en otros productos energéticos, hace un trasvase de unos a otros. Esto se realiza de forma posterior a la aplicación del factor de energía. En los supuestos considerados se aplica la reducción a los productos derivados de combustibles fósiles y se aplica el aumento a la electricidad, en el porcentaje definido por este factor. En estos casos, el efecto conjunto del *Factor de Energía* y del *Factor de Redistribución* será el que deberá aproximarse al objetivo marcado por el *Factor de Ajuste inicial* presente en el informe.

De esta forma, los factores que finalmente aplicaremos a cada uno de los sectores en los diferentes escenarios son los que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 22: Factores de energía y de redistribución para el ajuste de los escenarios

Sector	Factor de Energía			Factor de Redistribución		
	BAU	GND	D	BAU	GND	D
Alimen1	1	1	1	-	-	-
Alimen2	1	1	0.75	-	-	-
Alimen3	1	1	1	-	-	-
Alimen4	1	1	1	-	-	-
Alimen5	1	0.71	0.51	-	-	-
Alimen6	1	0.81	0.84	-	0.8	0.75
Alimen7	1	1	1	-	-	-
Silvicul1	1	1	1	-	-	-
Silvicul2	1	1	1	-	-	-
Silvicul3	1	1	1	-	-	-
Silvicul4	1	1	1	-	-	-
Silvicul5	1	1	1	-	-	-
Constru1	1	0.8	0.8	-	0.8	0.8
Constru2	1	1	1	-	-	-
Constru3	1	1	1	-	-	-
Constru4	1	1	1	-	-	-
Constru5	1	1	1	-	-	-
Constru6	1	1	1	-	-	-
Constru7	1	1	1	-	-	-
Constru8	1	0.5	0.5	-	-	-
Cuidado1	1	1	1	-	-	-
Cuidado2	1	0.5	0.5	-	-	-
Cuidado3	1	0.8	0.8	-	-	-
Cuidado4	1	0.5	0.5	-	-	-
Cuidado5	1	1	1	-	-	-
Cuidado6	1	1	1	-	-	-
Cuidado7	1	1	1	-	-	-
Cuidado8	-	-	-	-	-	-
Energia1	1	1	1	-	-	-
Energia2	1	1	1	-	-	-
Energia3	1	1	1	-	-	-

Energia4	1	1	1	-	-	-
Residuo1	1	0.72	0.72	-	-	-
Residuo2	1	0.81	0.81	-	-	-
Residuo3	1	1	1	-	-	-
Residuo4	1	1	1	-	-	-
Transpor1	1	1	1	-	-	-
Transpor2	1	1	1	-	-	-
Transpor3	1	1	1	-	-	-
Transpor4	1	1	1	-	-	-
Transpor5	1	1	1	-	-	-
Transpor6	1	1	1	-	-	-
Transpor7	1	1	1	-	-	-
Transpor8	1	1	1	-	-	-
Transpor9	1	0.57	0.17	-	-	-
Transpor10	1	1	1	-	-	-
Transpor11	1	1	1	-	-	-
Turismo1	1	0.5	0.5	-	-	-
Turismo2	1	0.5	0.5	-	-	-
Turismo3	1	0.5	0.5	-	-	-
Turismo4	1	0.38	0.04	-	-	-
Indus1	1	0.8	0.8	-	0.8	0.8
Indus2	1	1	1	-	-	-
Indus3	1	1	1	-	-	-
Indus4	1	0.95	0.95	-	0.93	0.93
Indus5	1	1	1	-	-	-
Indus6	1	1	1	-	-	-
Indus7	1	1	1	-	-	-
Indus8	1	1	1	-	-	-
Indus9	1	1	1	-	-	-
Indus10	1	1	1	-	-	-
Indus11	1	1	1	-	-	-
Indus12	1	0.83	0.83	-	0.8	0.8
Indus13	1	1	1	-	-	-
Ocio1	1	0.5	0.5	-	-	-
Ocio2	1	0.5	0.5	-	-	-
Ocio3	1	0.5	0.5	-	-	-
Ocio4	1	1	1	-	-	-
Tic1	1	1	1	-	-	-
Tic2	1	0.5	0.5	-	-	-
Finan1	1	0.5	0.5	-	-	-
Finan2	1	0.5	0.5	-	-	-
Finan3	1	0.5	0.5	-	-	-
Inves1	1	0.5	0.5	-	-	-
Estado1	1	0.5	0.5	-	-	-
Comer1	1	0.5	0.5	-	-	-
Comer2	1	0.5	0.5	-	-	-
Comer3	1	0.5	0.5	-	-	-
Otros1	1	0.5	0.5	-	-	-
Otros2	1	0.5	0.5	-	-	-

Otros3	1	0.5	0.5	-	-	-
Otros4	1	0.5	0.5	-	-	-
Otros5	1	0.5	0.5	-	-	-
Otros6	1	1	1	-	-	-
Otros7	1	0.5	0.5	-	-	-
Otros8	1	0.5	0.5	-	-	-

## Ajuste Cuidados8

Tal y como se describe en el informe, el sector Cuidados8 requiere un ajuste diferenciado. El consumo energético de este sector se compone por los consumos de transporte, de climatización y de otras actividades en los hogares. Se realizarán ajustes para los dos primeros, y el tercero se mantendrá constante.

Se encuentra determinado que evolución del consumo energético asociado al transporte de este sector evolucionará según las variaciones anuales presentadas en la siguiente tabla para cada uno de los tres escenarios.

Tabla 23: Variaciones anuales consumo energético transporte en Cuidados8

Escenario	Variación anual [%]
BAU	1.5
GND	-13.3
D	-20,0

Por otro lado, se encuentra establecido un Factor de Ajuste de valor 0,5 para los consumos energéticos asociados a la climatización del sector de los escenarios GND y D. Como hemos visto previamente, este factor encontrará una correspondencia directa con un Factor de energía del mismo valor. A partir de estas consideraciones podremos calcular la evolución de los diferentes consumos energéticos de este sector según los tres escenarios. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 24: Evolución consumos energéticos Cuidados8

Consumo energético	2020	2030 BAU	2030 GND	2030 D
Transporte [ktep]	16,197.92	18,798.35	3,873.89	1,739.24
Climatización [ktep]	9,278.92	9,278.92	4,639.46	4,639.46
Otros usos [ktep]	6,021.61	6,021.61	6,021.61	6,021.61
Total Cuidados8 [ktep]	31,498.46	34,098.88	14,534.96	12,400.31

Así mismo, cada uno de los componentes del consumo energético de Cuidados8 tiene una distribución de productos energéticos. No se definen factores de redistribución de productos energéticos. Sin embargo, al variar cada uno de estos componentes en diferente medida para los tres escenarios,

esto resultará en una variación de la distribución de productos energéticos para el conjunto del sector. En la siguiente tabla se muestra la distribución de productos energéticos para cada uno de los componentes de este sector. Estos porcentajes se mantendrán constantes para los cálculos posteriores, será el peso que tenga cada componente lo que provocará un cambio en la distribución.

Tabla 25: Distribución productos energéticos en los componentes del consumo de Cuidados8

	<b>Carbón y productos sec.</b>	<b>Petróleo y productos petro.</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Renovables y desechos</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Calor</b>
<b>Climatización</b>	0.9 %	28.7 %	40.4 %	27.3 %	0.0 %	2.8 %
<b>Transporte</b>	0.0 %	96.7 %	0.0 %	3.3 %	0.0 %	0.0 %
<b>Otros usos</b>	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	100.0 %	0.0 %

## Anexo 6

## Resultados energéticos completos de los escenarios

Presentamos a continuación los resultados de consumo de energía primaria obtenidos para cada uno de los sectores de actividad económica evaluados. En la siguiente tabla se muestran los datos de consumo energético inicial en 2020 y los resultados de 2030 según los resultados de los escenarios BAU, GND y D.

Tabla 26: Resultados consumo energético por sectores y escenarios

Sector	Resultados consumo energético [ktep]			
	2020	2030 - BAU	2030 - GND	2030 - D
Alimen1	2,801.8	2,801.8	1,593.7	469.9
Alimen2	24.6	24.6	1,010.6	2,722.2
Alimen3	0.0	0.0	0.0	0.0
Alimen4	0.0	0.0	0.0	0.0
Alimen5	620.0	550.4	441.6	280.6
Alimen6	2,679.7	2,943.1	2,447.9	2,584.5
Alimen7	34.7	70.5	82.2	25.8
Silvic1	83.9	138.6	238.3	275.7
Silvic2	0.0	0.0	0.0	0.0
Silvic3	0.0	0.0	0.0	0.0
Silvic4	0.0	0.0	0.0	0.0
Silvic5	0.0	0.0	0.0	0.0
Constru1	659.0	693.9	584.4	611.6
Constru2	0.0	0.0	0.0	0.0
Constru3	2,806.0	3,069.5	1,113.1	897.2
Constru4	554.1	723.1	267.8	257.3
Constru5	1,829.4	2,340.5	646.2	351.1
Constru6	0.0	0.0	0.0	0.0
Constru7	417.6	670.9	413.8	402.2
Constru8	166.5	232.4	83.2	60.8
Cuidad1	528.6	562.3	562.3	519.9
Cuidad2	702.3	702.3	464.9	351.2
Cuidad3	665.5	665.5	798.2	532.4
Cuidad4	348.7	348.7	261.4	174.3
Cuidad5	23.2	46.9	49.5	18.4
Cuidad6	158.4	196.6	158.4	158.4
Cuidad7	0.0	0.0	0.0	0.0
Cuidad8	31,498.5	34,098.9	14,535.0	12,400.3
Energ1	9,087.7	10,224.5	1,559.6	1,559.6
Energ2	30,774.2	38,635.9	24,626.7	5,281.5
Energ3	0.0	0.0	0.0	0.0
Energ4	123.0	123.0	21.1	21.1
Resid1	8.3	9.7	9.4	8.1
Resid2	38.6	45.1	31.4	31.4
Resid3	8.3	9.7	7.3	6.9

Resid4	0.0	0.0	0.0	0.0
Transp1	529.3	567.0	247.8	101.7
Transp2	110.4	143.5	71.1	44.1
Transp3	613.4	680.1	584.7	515.2
Transp4	109.0	109.0	18.7	18.7
Transp5	432.4	714.1	1,420.2	1,420.2
Transp6	656.4	295.7	295.7	295.7
Transp7	8,301.1	8,801.7	3,287.4	2,037.2
Transp8	1,130.9	1,031.3	1,133.7	1,031.0
Transp9	6,681.8	6,681.8	3,808.6	1,135.9
Transp10	1,359.1	1,557.0	174.0	174.0
Transp11	419.9	521.0	425.5	385.9
Turism1	456.7	574.4	185.7	163.6
Turism2	456.7	574.4	228.4	197.9
Turism3	84.6	140.6	38.4	31.5
Turism4	2,874.9	2,874.9	1,092.5	115.0
Indus1	333.4	333.4	323.2	364.0
Indus2	1,659.0	1,659.0	1,659.0	1,446.0
Indus3	145.1	168.2	145.1	104.2
Indus4	6,170.8	6,540.5	4,172.8	3,586.2
Indus5	606.3	663.3	358.0	606.3
Indus6	57.3	63.0	41.2	32.3
Indus7	4,889.6	5,456.9	4,978.6	3,640.5
Indus8	456.8	567.4	184.2	108.9
Indus9	24.5	47.7	48.0	13.0
Indus10	179.2	200.6	200.6	88.4
Indus11	165.2	177.7	166.6	154.2
Indus12	9.4	10.2	8.0	7.9
Indus13	32.5	42.2	52.9	63.7
Ocio1	83.8	117.5	108.8	103.0
Ocio2	190.2	190.2	95.1	95.1
Ocio3	183.4	183.4	97.2	94.1
Ocio4	153.4	153.4	190.4	153.4
Tic1	304.1	618.4	807.5	199.2
Tic2	134.0	165.2	100.4	64.1
Finan1	217.2	300.1	150.0	79.1
Finan2	85.6	85.6	42.8	34.7
Finan3	134.8	134.8	62.6	53.8
Inves1	85.6	87.6	52.5	43.8
Estado1	1,152.1	1,152.1	653.5	564.3
Comer1	1,400.4	1,792.1	710.9	635.7
Comer2	1,310.0	1,508.7	700.9	620.0
Comer3	79.5	88.7	39.7	23.6
Otros1	114.3	101.3	57.1	57.1
Otros2	243.5	243.5	121.8	110.8
Otros3	60.9	60.9	33.1	25.1
Otros4	119.9	119.9	122.9	104.0
Otros5	40.3	40.3	15.2	15.0
Otros6	202.1	202.1	220.4	186.5

Otros7	147.3	147.3	117.8	108.7
Otros8	0.0	0.0	0.0	0.0

En la siguiente tabla se muestra la distribución de productos energéticos para aquellos sectores en los que las transformaciones y ajustes realizados hayan supuesto un cambio en este reparto. Para el resto de sectores que no están representados en esta tabla, la distribución de productos energéticos de 2030 es la misma que la considerada para 2020.

Tabla 27: Modificaciones en la distribución de productos energéticos en determinados sectores según escenarios

	Carbón y productos secundarios	Petróleo y productos petrolíferos	Gas natural	Renovables y productos de desecho	Electricidad	Calor
<b>Modificaciones distribución productos energéticos en escenario BAU</b>						
<b>Cuidad8</b>	0.2 %	61.1 %	11.0 %	9.2 %	17.7 %	0.8 %
<b>Modificaciones distribución productos energéticos en escenario GND</b>						
<b>Alimen5</b>	0.0 %	98.4 %	0.0 %	1.5 %	0.0 %	0.0 %
<b>Alimen6</b>	0.6 %	14.1 %	32.3 %	8.0 %	44.9 %	0.0 %
<b>Constru1</b>	0.0 %	6.4 %	18.6 %	48.4 %	26.6 %	0.0 %
<b>Cuidad8</b>	0.3 %	34.9 %	12.9 %	9.6 %	41.4 %	0.9 %
<b>Resid1</b>	0.0 %	87.1 %	9.3 %	3.6 %	0.0 %	0.0 %
<b>Resid2</b>	0.0 %	88.5 %	8.3 %	3.2 %	0.0 %	0.0 %
<b>Indus1</b>	0.0 %	14.6 %	30.7 %	0.9 %	53.7 %	0.0 %
<b>Indus12</b>	0.0 %	76.7 %	0.2 %	3.8 %	19.3 %	0.0 %
<b>Modificaciones distribución productos energéticos en escenario D</b>						
<b>Alimen2</b>	0.0 %	69.8 %	3.5 %	4.0 %	22.4 %	0.3 %
<b>Alimen5</b>	0.0 %	97.8 %	0.0 %	2.1 %	0.0 %	0.0 %
<b>Alimen6</b>	0.6 %	13.2 %	30.3 %	8.0 %	47.9 %	0.0 %
<b>Constru1</b>	0.0 %	6.4 %	18.6 %	48.4 %	26.6 %	0.0 %
<b>Cuidad8</b>	0.3 %	24.3 %	15.1 %	10.7 %	48.5 %	1.0 %
<b>Resid1</b>	0.0 %	87.1 %	9.3 %	3.6 %	0.0 %	0.0 %
<b>Resid2</b>	0.0 %	88.5 %	8.3 %	3.2 %	0.0 %	0.0 %
<b>Indus1</b>	0.0 %	14.6 %	30.7 %	0.9 %	53.7 %	0.0 %
<b>Indus12</b>	0.0 %	76.7 %	0.2 %	3.8 %	19.3 %	0.0 %

A continuación, presentamos las figuras que representan la variación del consumo de productos energéticos para 2030 según cada uno de los escenarios.

### Variación consumo productos energéticos 2020-2030 según escenario BAU

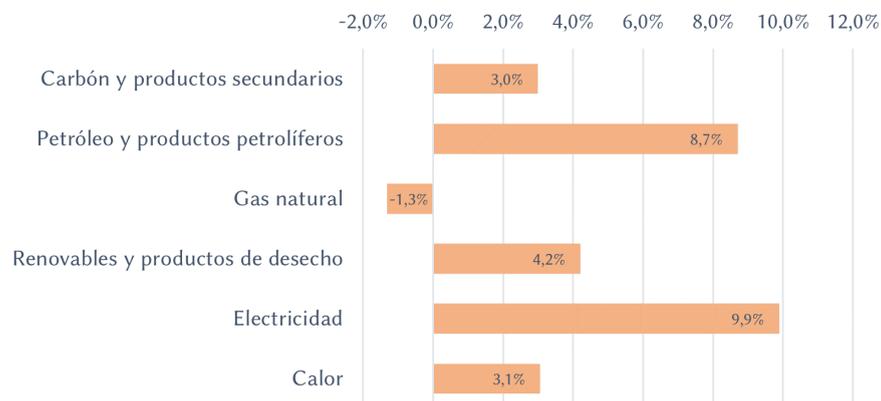


Figura 14: Variación en el consumo de productos energéticos 2020-2030 según escenario BAU

### Variación consumo productos energéticos 2020-2030 según escenario GND

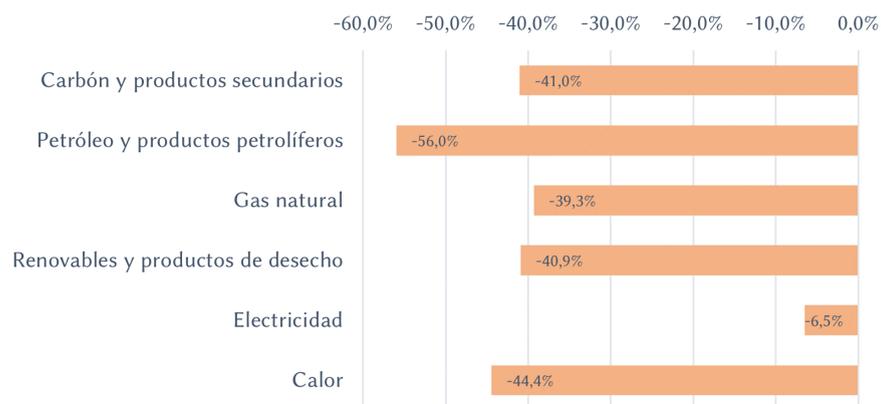


Figura 15: Variación en el consumo de productos energéticos 2020-2030 según escenario GND

### Variación consumo productos energéticos 2020-2030 según escenario D

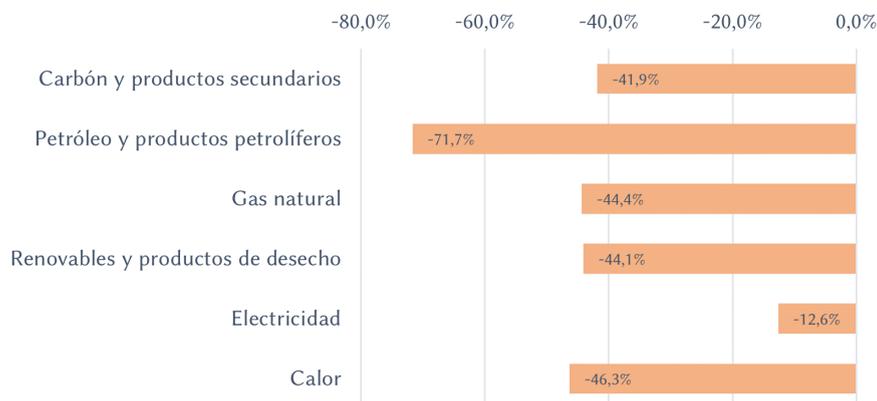


Figura 16: Variación en el consumo de productos energéticos 2020-2030 según escenario D

Por último, presentamos la distribución de productos energéticos para 2030 según la agrupación de sectores definidas para cada uno de los tres escenarios.

### DISTRIBUCIÓN PRODUCTOS ENERGÉTICOS RESULTADOS 2030 ESCENARIO BAU

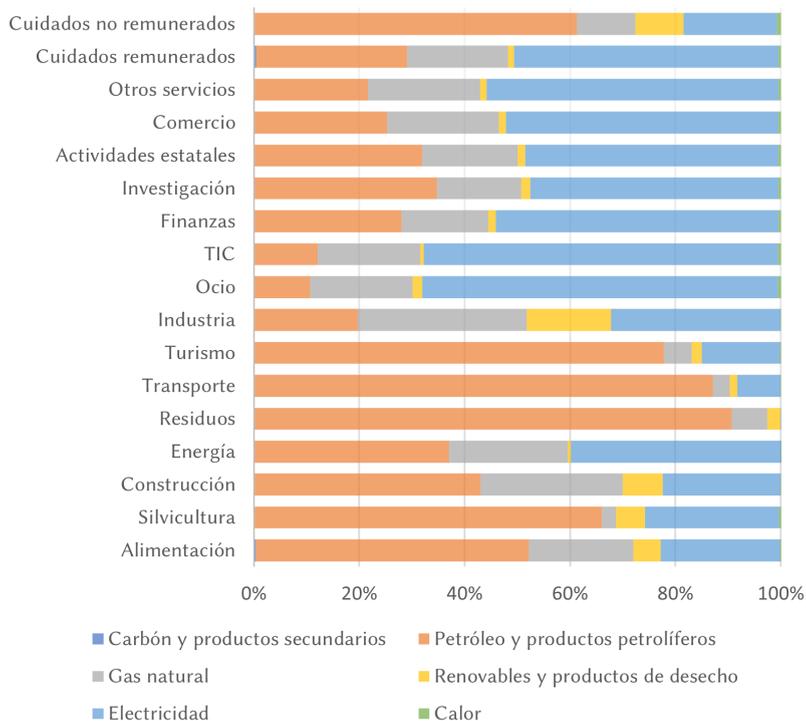


Figura 17: Distribución productos energéticos en sectores agrupados en 2030 según el escenario BAU

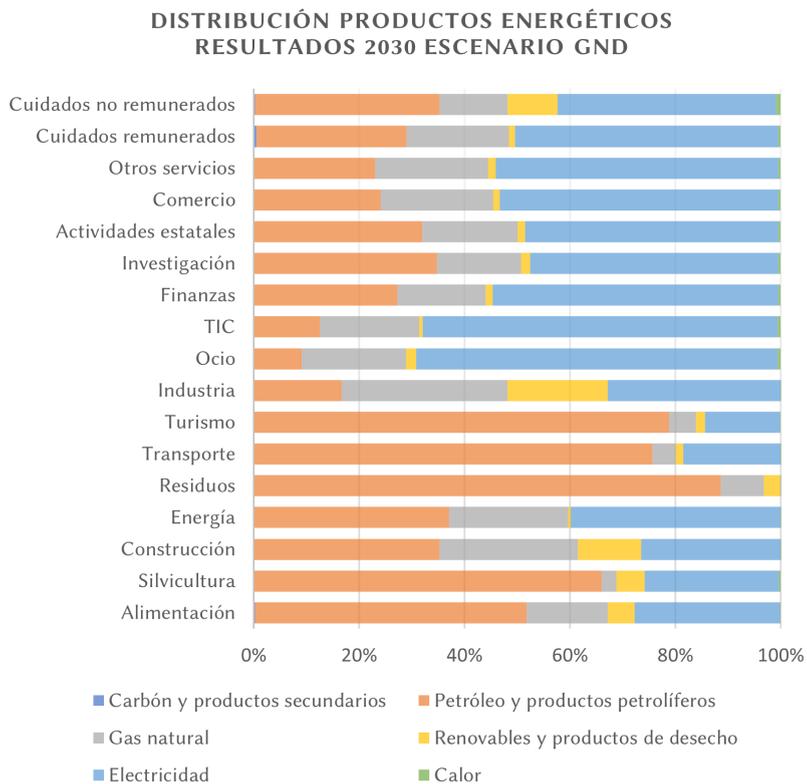


Figura 18: Distribución productos energéticos en sectores agrupados en 2030 según el escenario GND

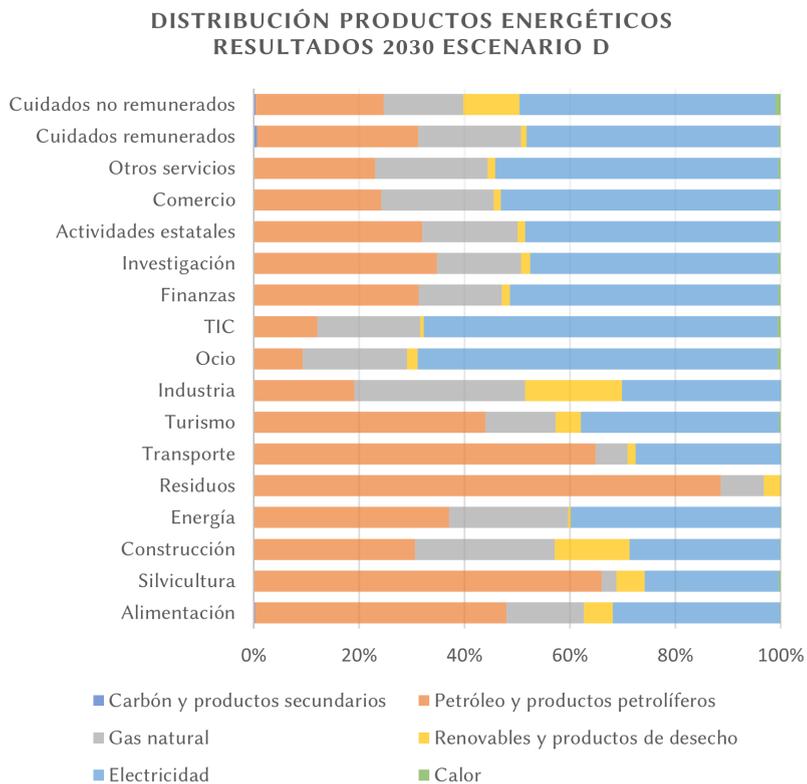


Figura 19: Distribución productos energéticos en sectores agrupados en 2030 según el escenario D

## Referencias

- [1] Jorge Riechmann, Adrián Almazán, Carmen Madorrán, and Emilio Santiago Muíño. *Ecosocialismo descalzo: Tentativas*. Icaria, 2018.
- [2] Joaquim Sempere. *Las cenizas de prometeo: Transición energética y socialismo*. Pasado y presente, 2018.
- [3] Fernando Prats, Yayo Herrero, and Alicia Torrego. *La gran encrucijada: Sobre la crisis eco-social y el cambio de ciclo histórico*. Libros en acción, 2017.
- [4] Ramón Fernández Durán and Luis González Reyes. *En la espiral de la energía*. Libros en acción, 2018.
- [5] BP. Statistical review of world energy. Technical report, BP, 2020.
- [6] IEA. Net Zero by 2050. Technical report, International Energy Agency, 2021.
- [7] María del Mar Rubio. Energía, economía y CO<sub>2</sub>: España 1850-2000. *Cuadernos económicos del ICE*, 2005.
- [8] M. González de Molina, D. Soto Fernández, G. Guzmán Casado, J. Infante Amate, E. Aguilera Fernández, J. Vila Traver, and R. García Ruíz. *Historia de la Agricultura española desde una perspectiva biofísica, 1900-2010*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría General Técnica, 2019.
- [9] Giorgos Kallis. *Límites: ecología y libertad*. Arcadia, 2021.
- [10] Joeri Rogelj, Gunnar Luderer, Robert C. Pietzcker, Elmar Kriegler, Michiel Schaeffer, Volker Krey, and Keywan Riahi. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, 5(6):519–527, may 2015.
- [11] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R.Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C.Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield(eds.). An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Technical report, IPCC, 2018.
- [12] German National Academy of Sciences Leopoldin. Negative emission technologies: What role in meeting paris agreement targets? Technical report, European Academies’Science Advisory Council (EASAC), 2018.
- [13] James Dyke, Robert Watson, and Wolfgang Knorr. Climate scientists: concept of net zero is a dangerous trap. *The conversation*, 2021.
- [14] Arnulf Grubler, Charlie Wilson, Nuno Bento, Benigna Boza-Kiss, Volker Krey, David L. McCollum, Narasimha D. Rao, Keywan Riahi, Joeri Rogelj, Simon De Stercke, Jonathan Cullen, Stefan Frank, Oliver Fricko, Fei Guo, Matt Gidden, Petr Havlík, Daniel Huppmann, Gregor Kiesewetter, Peter Rafaj, Wolfgang Schoepp, and Hugo Valin. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6):515–527, jun 2018.

- [15] T. Parrique, J. Barth, F. Briens, C. Kerschner, A. Kraus-Polk, A. Kuokkanen, and J. Spangenberg. Decoupling debunked: Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability. Technical report, European Environmental Bureau, 2019.
- [16] Lorenz T. Keyßer and Manfred Lenzen. 1.5 °C degrowth scenarios suggest the need for new mitigation pathways. *Nature Communications*, 12(1), may 2021.
- [17] Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo, and Abel Ortego. Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93:178–200, oct 2018.
- [18] Guiomar Calvo and Alicia Valero. Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. *Environmental Development*, page 100640, apr 2021.
- [19] Sven Teske. *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, 2019.
- [20] E. Dominish, N. Florin, and S. Teske. Responsible minerals sourcing for renewable energy. Technical report, Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney, 2019.
- [21] IEA. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Technical report, International Energy Agency (IEA), 2021.
- [22] Guiomar Calvo, Gavin Mudd, Alicia Valero, and Antonio Valero. Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources*, 5(4):36, nov 2016.
- [23] Laura J. Sonter, Marie C. Dade, James E. M. Watson, and Rick K. Valenta. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11(1), sep 2020.
- [24] War on Want and London Mining Network. A just(ice) transition is a post-extractive transition. Technical report, War on Want and London Mining Network, 2019.
- [25] IEA. World Energy Outlook. Technical report, International Energy Agency, 2020.
- [26] Antonio Turiel. *Petrocalipsis: Crisis energética global y cómo (no) la vamos a solucionar*. Alfabeto, 2020.
- [27] IEA. World Energy Outlook. Technical report, International Energy Agency, 2010.
- [28] N. Hagens. Economics for the future: Beyond the superorganism. *Ecological Economics*, 169:106520, mar 2020.
- [29] Joshua Floyd, Samuel Alexander, Manfred Lenzen, Patrick Moriarty, Graham Palmer, Sanggeetha Chandra-Shekeran, Barney Foran, and Lorenz Keyßer. Energy descent as a post-carbon transition scenario: How ‘knowledge humility’reshapes energy futures for post-normal times. *Futures*, 122:102565, sep 2020.
- [30] Yannick Oswald, Anne Owen, and Julia K. Steinberger. Large inequality in international and intranational energy footprints between income groups and across consumption categories. *Nature Energy*, 5(3):231–239, mar 2020.
- [31] Joel Millward-Hopkins, Julia K. Steinberger, Narasimha D. Rao, and Yannick Oswald. Providing decent living with minimum energy: A global scenario. *Global Environmental Change*, 65:102168, nov 2020.

- [32] Julia K. Steinberger and J. Timmons Roberts. From constraint to sufficiency: The decoupling of energy and carbon from human needs, 1975–2005. *Ecological Economics*, 70(2):425–433, dec 2010.
- [33] Ortzi Akizu-Gardoki, Gorka Bueno, Thomas Wiedmann, Jose Manuel Lopez-Guede, Iñaki Arto, Patxi Hernandez, and Daniel Moran. Decoupling between human development and energy consumption within footprint accounts. *Journal of Cleaner Production*, 202:1145–1157, nov 2018.
- [34] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Libro de la energía en España 2018. Technical report, MITECO, 2020.
- [35] Instituto Nacional de Estadística. Proyecciones de Población 2020-2070. Technical report, INE, 2020.
- [36] Iñigo Capellán and Iñaki Arto. Energía, desarrollo y transición hacia la sostenibilidad. *Revista Ecologista*, 2016.
- [37] Frank W. Geels, Tim Schwanen, Steve Sorrell, Kirsten Jenkins, and Benjamin K. Sovacool. Reducing energy demand through low carbon innovation: A sociotechnical transitions perspective and thirteen research debates. *Energy Research & Social Science*, 40:23–35, jun 2018.
- [38] Steve Sorrell. Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47:74–82, jul 2015.
- [39] Elizabeth Shove and Gordon Walker. What Is Energy For? Social Practice and Energy Demand. *Theory, Culture & Society*, 31(5):41–58, jul 2014.
- [40] Sarah Royston, Jan Selby, and Elizabeth Shove. Invisible energy policies: A new agenda for energy demand reduction. *Energy Policy*, 123:127–135, dec 2018.
- [41] Ivan Illich. *Obras reunidas I*. FCE, 2007.
- [42] Samuel Alexander and Jonathan Rutherford. A critique of techno-optimism. In *Routledge Handbook of Global Sustainability Governance*, pages 231–241. Routledge, oct 2019.
- [43] Jaume Freire-González. Evidence of direct and indirect rebound effect in households in EU-27 countries. *Energy Policy*, 102:270–276, mar 2017.
- [44] Chris Calwell. Is efficient sufficient? the case for shifting our emphasis in energy specifications to progressive efficiency and sufficiency. Technical report, ECEEE, 2010.
- [45] Elizabeth Shove. What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information*, 46(7):779–789, aug 2017.
- [46] Sarah Darby. Enough is as good as a feast – sufficiency as policy. *ECEEE Summer Study*, 2007.
- [47] Stefan Thomas, Lars-Arvid Brischke, Johannes Thema, and Michael Kopatz. Energy sufficiency policy: an evolution of energy efficiency policy or radically new approaches? *ECEEE Summer Study*, 2015.
- [48] Adrián Almazán. *Técnica y tecnología: Cómo conversar con un tecnólogo*. Taugenit, 2021.

- [49] Jaime Nieto, Óscar Carpintero, Luis J. Miguel, and Ignacio de Blas. Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios. *Energy Policy*, 137:111090, feb 2020.
- [50] Luis González Reyes, Adrián Almazán Gómez, Ángel Lareo Fernández, Walter Actis Mazzola, Luis Miguel Bueno Morera, Carmen Madorrán Ayerra, Emilio Santiago Muiño, and Cristina de Benito Morán. Escenarios de trabajo en la transición ecosocial 2020-2030. Technical report, Ecologistas en Acción, 2019.
- [51] Amaia Pérez Orozco. *Subversión feminista de la economía. Aportes para un debate sobre el conflicto capital-vida*. Traficantes de Sueños, 2014.
- [52] Héctor Tejero and Emilio Santiago. *¿Qué hacer en caso de incendio? Manifiesto por el Green New Deal*. Capitan Swing, 2019.
- [53] Ecologistas en Acción and La Transicionera. Caminar sobre el abismo de los límites. políticas ante la crisis ecológica, social y económica. Technical report, Ecologistas en Acción; La Transicionera, 2019.
- [54] Zora Kovacic, Marcello Spanò, Samuele Lo Piano, and Alevgul H. Sorman. Finance, energy and the decoupling: an empirical study. *Journal of Evolutionary Economics*, 28(3):565–590, jul 2017.
- [55] Eurostat. Physical energy flow accounts. Technical report, Eurostat, 2021.
- [56] Eurostat. Key indicators of physical energy flow accounts by NACE Rev. 2 activity (env\_ac\_pefa04). Technical report, Eurostat, 2017.
- [57] Eurostat. Energy supply and use by NACE Rev. 2 activity (env\_ac\_pefasu). Technical report, Eurostat, 2017.
- [58] Lotfi Belkhir and Ahmed Elmeligi. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177:448–463, mar 2018.
- [59] Alfons Pérez. *Pactos verdes en tiempos de pandemias: El futuro se disputa ahora*. Icaria, 2021.
- [60] Martín Lallana. Cuando las ecologistas nos enfrentamos a las renovables. *Revista Contexto*, 2021.
- [61] Adrián Almazán. ¿Verde y digital? *Viento Sur*, 2021.
- [62] Nathaniel Rich. *Perdiendo la tierra: La década en la que podríamos haber detenido el cambio climático*. Capitán Swing, 2020.
- [63] Iñaki Barcena, Rosa Lago, and Unai Villalba. *Energía y deuda ecológica*. Icaria, 2009.
- [64] Antonio Valero Capilla and Alicia Valero Delgado. *Thanatia: The Destiny of the Earth's Mineral Resources*. World Scientific, 2014.
- [65] Vincent Moreau, Piero Dos Reis, and François Vuille. Enough metals? resource constraints to supply a fully renewable energy system. *Resources*, 8(1):29, jan 2019.
- [66] Hannah Ritchie and Max Roser. Access to Energy. *Our World In Data*, 2019.
- [67] Óscar Carpintero Redondo. *El metabolismo de la economía española: recursos naturales y huella ecológica (1955-2000)*. Fundación César Manrique, 2005.

- [68] Iñigo Capellán-Pérez. Desacoplamiento de la realidad. *El Diario*, 2019.
- [69] Helmut Haberl, Dominik Wiedenhofer, Doris Virág, Gerald Kalt, Barbara Plank, Paul Brockway, Tomer Fishman, Daniel Hausknost, Fridolin Krausmann, Bartholomäus Leon-Gruchalski, Andreas Mayer, Melanie Pichler, Anke Schaffartzik, Tânia Sousa, Jan Streeck, and Felix Creutzig. A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights. *Environmental Research Letters*, 15(6):065003, jun 2020.
- [70] Jason Hickel and Giorgos Kallis. Is Green Growth Possible? *New Political Economy*, 25(4):469–486, apr 2019.
- [71] Gordon Walker, Neil Simcock, and Rosie Day. Necessary energy uses and a minimum standard of living in the united kingdom: Energy justice or escalating expectations? *Energy Research & Social Science*, 18:129–138, aug 2016.
- [72] Emilio Santiago Muiño. *Opción cero: el reverdecimiento forzoso de la revolución cubana*. Los Libros de la Catarata, 2017.
- [73] IEA. World Energy Outlook. Technical report, International Energy Agency, 2012.
- [74] ONU. Sistema de contabilidad ambiental y económica 2012 - marco central. Technical report, Naciones Unidas, Comisión Europea, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Fondo Monetario Internacional, Organización de Cooperación y Desarrollo Económico, Banco Mundial, 2016.
- [75] Eurostat. Physical energy flow accounts totals bridging to energy balances totals (env\_ac\_pefa05). Technical report, Eurostat, 2017.
- [76] Antonio M. Alonso and Gloria J. Guzmán. Comparison of the efficiency and use of energy in organic and conventional farming in spanish agricultural systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 34(3):312–338, 2010.
- [77] VidrioEspaña. Contribución económica, ambiental y social del sector del vidrio en españa. Technical report, VIDRIO ESPAÑA, 2017.
- [78] Eurostat. Complete energy balances (nrg\_bal\_c). Technical report, Eurostat, 2017.
- [79] MITECO. Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030 (pniec). Technical report, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020.
- [80] Ramón Roca. El sistema eléctrico español dispara sus emisiones un 18% en 2017 hasta las 74,8 millones de TCO<sub>2</sub>. *El Periódico de la Energía*, 2018.