

(05-040) - Metabolism and energy foresight in the regional context. Application to the Andalusian energy system

Galán Cano, Lucía ¹; Terrados Cepeda, Julio ¹; Ogayar Fernández, Blas ¹; Hermoso Orzaez, Manuel Jesús ¹; Cámara Aceituno, Juan ¹

¹ Universidad de Jaén

The diversity of local environments highlights the need for energy analysis on a regional scale. Each region has distinctive natural, geographical and socio-economic characteristics. A detailed assessment of these aspects allows an understanding of the specific energy dynamics of each geographical area, which is crucial to develop strategies tailored to the needs of each region and to contribute to the energy transition.

In this context, the paper elaborates on various energy foresight methodologies and highlights the advantages of a tool such as LEAP (Low Emissions Analysis Platform) to analyse the energy systems of regions. The ultimate goal is to obtain results applicable to decision-making and to the proposal of strategies for the development of future systems on a regional scale, an approach that effectively addresses environmental and energy issues.

The application of LEAP in Andalusia's energy foresight has made it possible to compare the energy data foreseen for 2030 with the objectives set at national and regional level. This work focuses on the objectives defined in the National Integrated Energy and Climate Plan (PNIEC) 2021-2030 and the Andalusian Climate Action Plan (PAAC) 2030.

Keywords: Energy Foresight; Energy Transition; LEAP (Low Emissions Analysis Platform)

Metabolismo y prospectiva energética en el ámbito regional. Aplicación al sistema energético andaluz

La diversidad de entornos locales resalta la necesidad de llevar a cabo análisis energéticos a nivel regional. Cada región tiene características naturales, geográficas y socioeconómicas distintivas. La evaluación detallada de estos aspectos permite comprender las dinámicas energéticas específicas de cada área geográfica, resultando crucial para desarrollar estrategias que se adapten a las necesidades de cada región para contribuir a la transición energética.

En este contexto, el trabajo profundiza en las distintas metodologías de prospectiva energética y destaca las bondades una herramienta como LEAP (Low Emissions Analysis Platform) para el análisis de los sistemas energéticos de las regiones. El objetivo final es obtener resultados aplicables para la toma de decisiones y la propuesta de estrategias de desarrollo futuro del sistema en el ámbito regional, un enfoque que permite abordar cuestiones ambientales y energéticas de manera efectiva.

La implementación de LEAP en la prospectiva energética de Andalucía ha permitido realizar una comparación entre los datos energéticos proyectados para 2030 y los objetivos establecidos a nivel nacional y regional, centrándonos para este trabajo en los objetivos definidos en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 y en el Plan Andaluz de Acción por el Clima (PAAC) 2030.

Palabras clave: Prospectiva energética; Transición energética; LEAP (Low Emissions Analysis Platform)



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Correspondencia: Lucía Galán Cano, lgalan@ujaen.es

Agradecimientos: Los autores agradecen la ayuda de la Fundación Pública Centro de Estudios Andaluces, que está financiando el Proyecto “Sistema energético andaluz y prospectiva energética 2050. Análisis de políticas energéticas y medidas de mitigación del cambio climático en Andalucía” en el marco de la XII Convocatoria de proyectos de investigación del Centro de Estudios Andaluces.

1. Introducción

El crecimiento acelerado de la población en áreas urbanas está impulsando un aumento insostenible en la demanda de energía. En la actualidad, esta demanda se cubre principalmente mediante el uso de combustibles fósiles, que son responsables principales de las emisiones contaminantes. Esta dinámica contribuye significativamente al cambio climático, lo que subraya la urgencia de transitar hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles como uno de los principales desafíos actuales.

Numerosos estudios se han dedicado a analizar la situación energética de diversos países, regiones y ciudades de todo el mundo. Este análisis es crucial para desarrollar planificaciones energéticas que garanticen el cumplimiento de los objetivos destinados a mitigar el cambio climático. Estas planificaciones energéticas tienen como finalidad llegar a un modelo optimizado donde, a través del uso de técnicas y herramientas, se detectan problemas y se desarrollan líneas de acciones futuras para intentar solventarlos.

Para llevar a cabo planificaciones energéticas se puede recurrir a multitud de metodologías y técnicas como la toma de decisiones (MCDM). (Pohekar & Ramachandran, 2004) llevaron a cabo una revisión bibliográfica para analizar la aplicabilidad de los distintos métodos multicriterio llegando a la conclusión de que el proceso analítico jerárquico, la técnica PROMETHEE y ELECTRE son las más utilizadas. (Alizadeh et al., 2020) analizaron Irán como caso de estudio para poder llevar a cabo una planificación donde las energías renovables sean aprovechadas de manera más efectivas y conseguir una menor dependencia de los combustibles fósiles. Se trata de una combinación de dos modelos: un modelo de Beneficio, Oportunidad, Costo, Riesgo (BOCR) y el modelo de Proceso Analítico de Red (ANP). En este análisis se empleó pesos de criterios estratégicos para llegar a la conclusión de que la energía solar sería la más idónea para el país de estudio. (Løken, 2007) defiende la importancia de este tipo de técnicas a la hora de toma de decisiones en los problemas de planificación energética. Además, menciona la idoneidad de usar varios métodos para que se pueda aprovechar las fortalezas de estos. (Terrados et al., 2007) utilizaron este tipo de técnicas para planificar energéticamente la provincia de Jaén y establecer estrategias para alcanzar objetivos ambientales fijados. (Mirjat et al., 2018) también utilizaron esta metodología para establecer una planificación energética sostenible y formular políticas en Pakistán.

Existen muchas otras técnicas como, por ejemplo, en el caso de (Cormio et al., 2003) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de promover el uso de fuentes de energía renovables en la región de Apulia, Italia. Utilizaron un modelo energético basado en programación lineal y optimización de flujos energéticos para analizar la explotación de fuentes de energía primaria, la generación de energía eléctrica y térmica, así como las emisiones asociadas. Mediante este proceso de optimización, lograron identificar configuraciones factibles para la generación de energía, considerando la instalación de centrales de ciclo combinado, aerogeneradores, aprovechamiento de residuos sólidos y biomasa. (Omu et al., 2013) utilizan un modelo de programación lineal para diseñar un sistema de energía distribuida que satisfaga demanda de energía en el sector comercial y residencial.

Siguiendo con metodologías utilizadas para llevar a cabo planificaciones energéticas cabe destacar la herramienta LEAP ya que es sobre la que se ha basado esta comunicación. LEAP fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute y se utiliza para modelar y analizar políticas energéticas, así como para evaluar escenarios a largo plazo. Este software es sin duda uno de los más utilizados actualmente en las investigaciones para desarrollar planificaciones energéticas a distintas escalas. En 2017, (Mirjat et al., 2017) utilizaron, junto al resto de técnicas ya mencionadas, LEAP para solventar el actual problema de Pakistán en el suministro de electricidad y abordar las limitaciones del sistema energético mediante la formulación de políticas. Del mismo modo, (Emodi et al., 2017) realizaron un análisis basado

en escenarios para investigar la demanda y suministro energético futuro de Nigeria, así como las emisiones de efecto invernadero asociadas, abarcando el periodo de 2010-2040. Consideraron políticas y estrategias energéticas para dar con la situación más favorable para el país, que se traduciría en la disminución de la demanda energética y emisiones de GEI en 2040. Usando esta metodología LEAP, (Hu et al., 2019) adoptaron un enfoque más económico al combinar la planificación energética sostenible con análisis económico, lo que llevó a la formulación de una estrategia de planificación energética urbana sostenible que podría reducir el consumo de energía con el menor costo económico posible. Este enfoque se aplicó en la ciudad de Shenzhen, China, donde se propusieron cuatro escenarios para analizar proyecciones futuras de consumo y generación de energía. Además, se sugirieron políticas para mejorar la eficiencia energética y la estructura energética en esta ciudad en estudio. Otro estudio similar es el llevado a cabo por (Cai et al., 2023) cuyo objetivo era contribuir en la lucha contra el cambio climático explorando estrategias para alcanzar la neutralidad de carbono y establecer un marco de bajas emisiones de CO₂ antes de 2030. Se han considerado cuatro escenarios que abarcan aspectos como la economía local, población, recursos renovables y sectores de transporte y energía.

En España, esta metodología apenas se emplea en estudios para llevar a cabo planificaciones energéticas. Se puede mencionar solo algunas excepciones como el estudio llevado a cabo por (Gómez et al., 2016) donde tratan varios puntos importantes desde un enfoque de planificación energética. El principal objetivo de este estudio era comprender cómo el país había llegado a estar en una situación complicada debido a los problemas energéticos como la sobrecapacidad de generación, aumentos tarifarios, incertidumbre sobre viabilidad financiera en plantas de energía y marco regulatorio inestable. A través del modelado de tres escenarios se analizó no solo cómo España ha llegado a esta situación energética sino si se hubiera podido evitar a través de otras alternativas provenientes de una planificación adecuada y si esta planificación hubiera aportado beneficios cuantitativos. En efecto, los resultados de este estudio a través de LEAP muestra que habiendo desarrollado una buena planificación energética a tiempo habría podido reducir inversiones de hasta 28,6 millones de euros para 2010 en el sector eléctrico español. Otro estudio que se puede mencionar es el realizado en la región de Madrid llevado a cabo por (García-Gusano et al., 2019) donde analizaron los dos sectores más críticos en el consumo de energía que sería el sector transporte y residencial. A través de LEAP realizaron una planificación energética a largo plazo a través de dos escenarios alternativos los cuales, tras ser modelados muestran que al aplicar medidas para descarbonizar los sectores transporte y residencial, se puede obtener reducciones considerables en la demanda de energía.

Además de su versatilidad y flexibilidad, se puede destacar que LEAP es una herramienta integral que proporciona a los usuarios la capacidad de realizar análisis exhaustivos y rigurosos para abordar los desafíos relacionados con la energía y cambio climático. Tras una amplia revisión sobre artículos de planificación energética a través de LEAP, se ha observado que en la mayoría de casos o bien se centran en países o bien en ciudades específicas. Sin embargo, son escasos los análisis a nivel regional y aún menos los que se enfocan en regiones con características, geográficas, socioeconómicas y energéticas particulares como es el caso de Andalucía. Como se ha mencionado anteriormente, el uso de LEAP en España, especialmente en algunas de sus regiones o ciudades, ha sido menos frecuente en comparación con otros países por lo que supone todo un reto por falta de referencias. Sin embargo, dada la importancia de la planificación energética para abordar desafíos actuales relacionados con el cambio climático y la sostenibilidad es fundamental fomentar el uso de LEAP en el contexto español.

2. Metodología

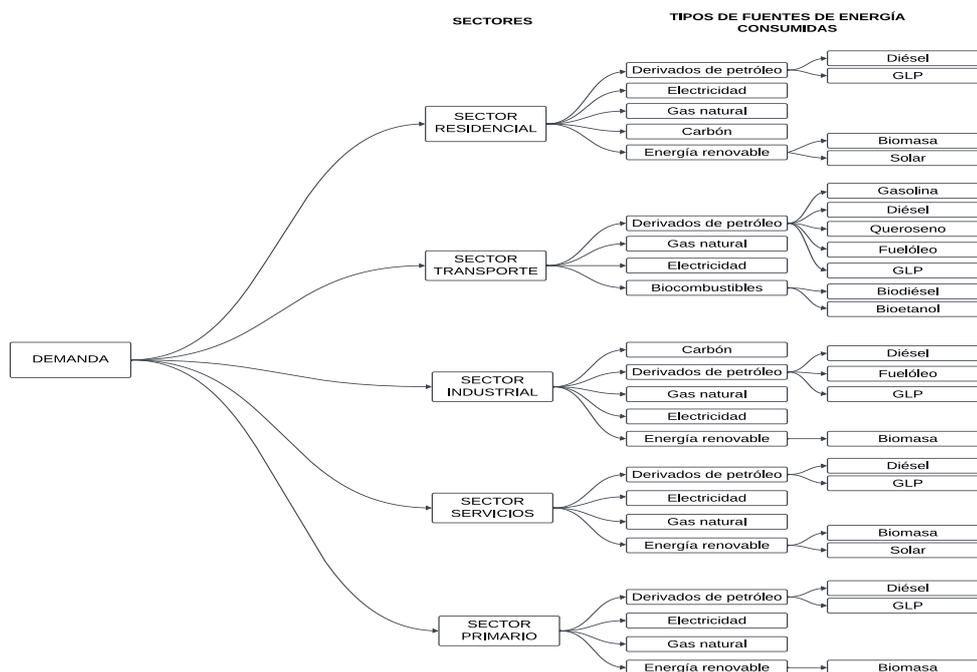
El software Long-range Energy Alternatives Planning System, es un software que funciona como un modelo de simulación que permite a los usuarios explorar diferentes escenarios y estrategias relacionadas con la demanda y producción de energía, así como aspectos medioambientales como las emisiones asociadas. Es un modelo de simulación tipo *bottom up* diseñado para analizar cómo la energía se consume, convierte y produce.

Los usuarios ingresan datos sobre la situación energética actual del municipio, región o país en estudio, para luego desarrollar diferentes escenarios futuros al modificar variables clave, como crecimiento económico, tecnología energética, políticas de eficiencia energética y políticas climáticas. LEAP interpreta estos datos energéticos y produce resultados de simulación para evaluar el impacto de las políticas y estrategias en la sostenibilidad energética.

En primer lugar, modela la demanda dividiéndola en los diferentes sectores que la componen: residencial, industrial, transporte, servicios y primario. Dentro de cada uno de estos sectores, se ha analizado la proporción e intensidad del consumo de diversas fuentes de energía comunes, como la electricidad, el gas natural, los derivados del petróleo, entre otros.

En la figura 1 se muestra la estructura que siguió el modelado de la demanda para la región de estudio:

Figura 1: Estructura de la demanda para el modelado de Andalucía



El consumo final total de energía es calculado con la siguiente ecuación:

$$EC_n = \sum_i \sum_j AL_{k,j,i} \cdot EI_{k,j,i} \quad (1)$$

Donde:

EC, consumo de energía agregado de un sector

AL, proporción de consumo del tipo de fuente de energía

EI, intensidad energética

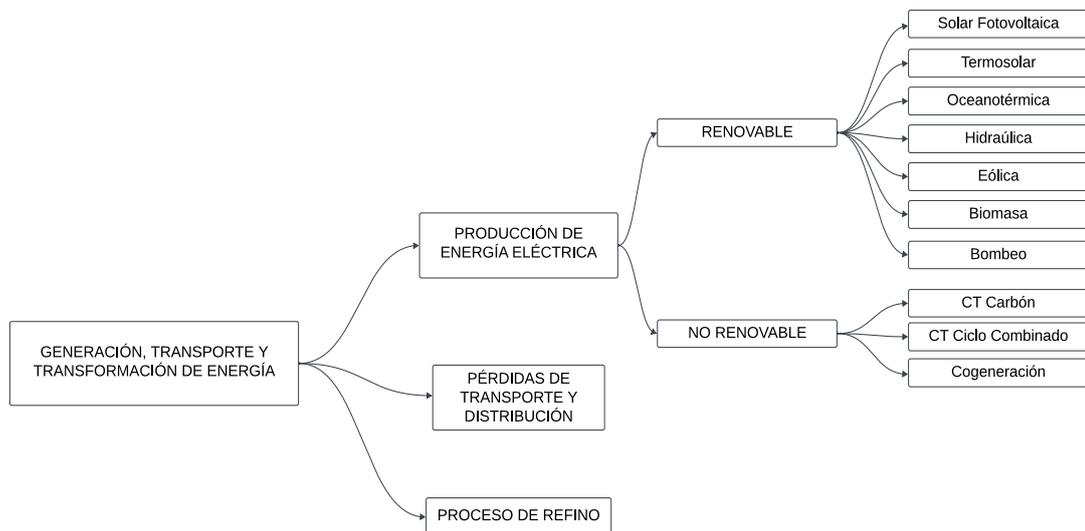
k, tipo de fuente de energía consumida

i, sector

j, equipamiento

También se modela el bloque de transformación teniendo en cuenta el proceso de generación de energía eléctrica, pérdidas por transporte y distribución y por procesos de transformación como el que se llevan a cabo en las refinerías. En la figura 2 se aclara la distribución del modelado de este bloque.

Figura 2: Estructura del bloque de transformación para el modelado de Andalucía



En este caso, el consumo energético debido a la transformación se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$ET_s = \sum_m \sum_t ETP_{t,m} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{t,m,s}} - 1 \right) \quad (2)$$

Donde:

ETP, energía a posteriori de la transformación

η , eficiencia de la transformación

s, tipo de fuente de energía primaria

m, tipo de equipamiento

t, tipo de fuente de energía secundaria

3. Caso de estudio: Situación energética en Andalucía

La región de Andalucía, al igual que el resto de España en general, tiene aún una fuerte dependencia hacia los combustibles fósiles siendo el petróleo la principal fuente de energía en Andalucía, seguida del gas natural. Sin embargo, Andalucía cuenta con un gran potencial para la generación de energía renovable, especialmente solar y eólica debido a su clima favorable. En los últimos años se ha dado un crecimiento significativo en la capacidad instalada de energías renovables en la región, lo que ha llevado a hacer más sostenible su matriz energética y reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Esto quiero decir que Andalucía está experimentando una transición energética hacia fuentes de energías más sostenibles aprovechando su potencial en energías renovables y reduciendo su dependencia hacia combustibles fósiles. Aun así, aún se enfrenta a desafíos como diversificar aún más su mix energético para garantizar un suministro más estable y sostenible a largo plazo.

Andalucía ha demostrado un fuerte compromiso con la sostenibilidad y lucha contra el cambio climático. Esto se refleja en sus políticas energéticas y ambientales que están orientadas a reducir las emisiones de carbono y promover un uso más eficiente y responsable de los recursos energéticos. Con el objetivo de avanzar hacia un modelo energético más eficiente, sostenible, seguro y neutro en carbono, la Estrategia Energética de Andalucía 2030 se centra en el aprovechamiento de los recursos renovables disponibles en la región. Este enfoque no solo busca impulsar el crecimiento económico, sino también generar empleo, al tiempo que contribuye al cumplimiento de los compromisos tanto a nivel nacional como internacional en materia de energía y clima.

Los principales objetivos fijados para 2030 por la Agencia Andaluza de la Energía se pueden resumir en:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero difusas de Andalucía en un 39% con respecto al año 2005.
- Reducir consumo tendencial de energía primaria como mínimo el 39,5% con respecto a 2007.
- Aportar a partir de fuentes energéticas renovables al menos un 42% del consumo de energía final bruta.

Este modelado busca analizar el grado de cumplimiento de los objetivos establecidos para 2030 a través de la proyección de dos escenarios: el primero, donde se no se apliquen políticas públicas energéticas adicionales y el segundo donde se proyectan hipótesis sobre el escenario tendencial con la finalidad de alcanzar los objetivos marcados.

Para modelar la región de Andalucía a través de LEAP, se comienza seleccionando modelando el bloque de demanda y transformación de un año base. En este caso, el año base seleccionado ha sido el 2021 y para modelarlo en LEAP se ha introducido una gran cantidad de datos energéticos que definen la situación de la región.

En la tabla 1 se resumen por sectores la totalidad de consumo energético en el año base:

Tabla 1: Consumo energético por sectores en Andalucía (año 2021)

Consumo energía final por sectores	
Sector residencial	20451,4 GWh
Sector industrial	31729 GWh
Sector transporte	56416,7 GWh
Sector servicios	14454,9GWh

Sector primario	10707,7 GWh
Total demanda	1337596 GWh

Se observa que el sector de transporte fue el que más contribuyó al consumo de energía final en el año estudiado, alcanzando un 42,2%. Le siguieron el sector industrial y el residencial, con un 23,7% y un 15,3% respectivamente. Los sectores de servicios y primario presentaron un menor consumo en comparación. En cuanto a consumo por combustibles, destaca de manera significativa el consumo de diésel con un 37,3% seguido de la electricidad y gas natural con una participación del 24,8% y 14,6%. La problemática se encuentra en la dependencia de combustibles fósiles que, teniendo en cuenta todos los derivados del petróleo y gas natural suman más del 50% del consumo de energía final.

En cuanto al bloque de transformación se ha tenido en cuenta todas las instalaciones destinadas a la generación de energía eléctrica además de las pérdidas que se tienen en cuenta en el proceso de transporte y distribución. En este bloque también se ha considerado el proceso de refino llevado a cabo en dos de las refinerías más grandes de España que se encuentran ubicadas en dos provincias de esta región.

Tabla 2: Producción de energía eléctrica por instalaciones renovables y no renovables en Andalucía (año 2021)

Producción energía eléctrica	
Fotovoltaica	5364,2 GWh
Eólica	7266,7 GWh
Hidráulica	507,3 GWh
Oceanotérmica	18,4 GWh
Termosolar	2239,9 GWh
Biomasa	1776,2 GWh
Producción total renovable	17126,8 GWh
Bombeo	198,4 GWh
CT Carbón	241,6 GWh
Ciclo combinado gas natural	8643,9 GWh
Cogeneración	5171,3 GWh
Producción total no renovable	14255,1 GWh

Se destaca que la mayor producción de energía eléctrica proviene de tecnologías no renovables, como las centrales térmicas de ciclo combinado con gas natural, representando casi un 30%. Esto se debe a la estabilidad que ofrecen estas tecnologías en comparación con las energías renovables. Es fundamental reconocer que el objetivo primordial de las políticas energéticas es promover el uso de tecnologías renovables, sustituyendo gradualmente los combustibles fósiles. Por lo tanto, es de vital importancia invertir en garantizar la estabilidad y fiabilidad de estas tecnologías renovables. En 2021, las tecnologías renovables destinadas a

producir energía eléctrica representaban más del 50% de la producción total por lo que se espera que la tendencia positiva siga en aumento.

Tal como se mencionó previamente en el bloque de transformación en LEAP, se han tenido en cuenta las pérdidas durante el transporte y distribución de energía eléctrica. Después de revisar los datos energéticos pertinentes proporcionados por Red Eléctrica, se estima que, en Andalucía, al igual que en el resto de España, estas pérdidas representan aproximadamente un 5%. Este porcentaje refleja las pérdidas que suceden durante la transmisión y distribución de electricidad a lo largo de la red eléctrica.

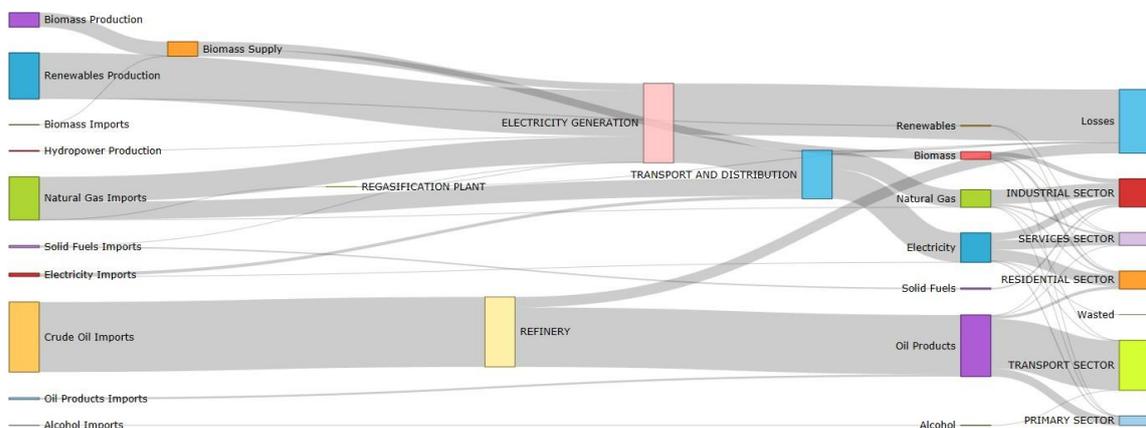
Además de la producción de energía eléctrica, se debe considerar procesos de transformación de energía como las refinerías. El motivo por el que se han tenido en cuenta en este modelado es porque el proceso del refinado también tiene asociado unas emisiones. Se han considerado dos de las refinerías más grandes de toda España: La Rábida, situada en Huelva, que cuenta con una capacidad de tratamiento de 5 millones de toneladas al año y elabora productos derivados del crudo de petróleo como propano, butano, naftas, queroseno, gasóleo entre otros, además de materias primas para el refinado y la industria química. La segunda refinería tenida en cuenta es la denominada "Gibraltar-San Roque" la cual tiene una peculiaridad y es que es una industria integrada, es decir, no sólo con el complejo petroquímico, sino que abastece de productos energéticos a las industrias de la zona. Tiene una capacidad máxima de 12 millones de toneladas de petróleo al año y en ella, al igual que en la Rábida, se fabrican todo tipo de combustibles como propano, butano, gasolinas además de productos puros básicos para la industria petroquímica como el benceno, paraxileno y ortoxileno, entre otros.

Otro punto que no se ha tratado en el modelado pero que se ha visto conveniente mencionar para tenerlo en cuenta en futuras investigaciones es el sistema gasista ya que Andalucía es una región estratégica como punto de entrada de gas natural a nivel español y europeo. Además, en Andalucía se sitúa la segunda mayor planta de recepción, regasificación y almacenamiento de gas natural canalizado de España en Palos de la Frontera (Huelva).

En el proceso de regasificación de gas natural se pueden generar emisiones de GEI como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (NO_x) así como partículas, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles (COV). Es por ello que para mitigar y controlar las emisiones asociadas con la regasificación de gas natural es esencial implementar tecnologías y prácticas de gestión adecuadas.

En la figura 3 se puede apreciar el diagrama Sankey para el año base de la región de Andalucía donde se recogen los flujos energéticos desde su origen hasta su destino final.

Figura 3: Diagrama Sankey para el año base



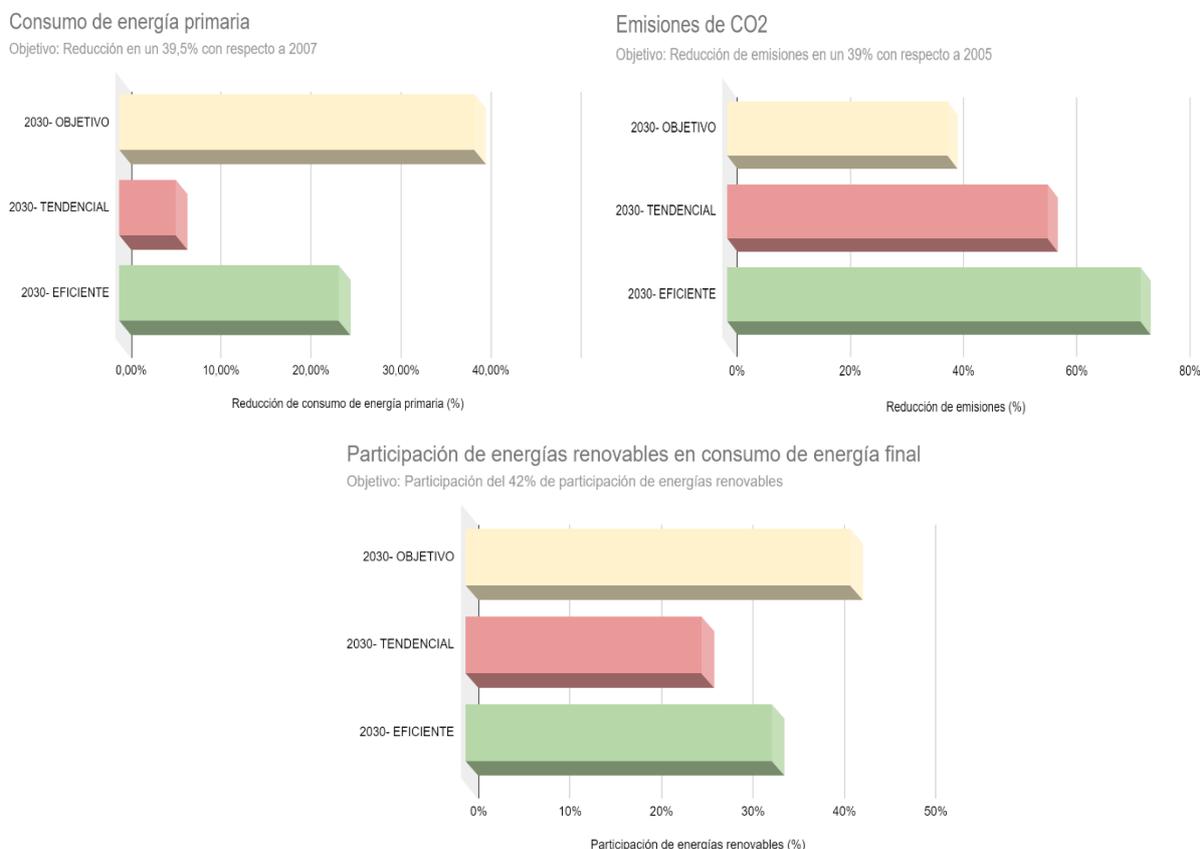
4. Resultados

Como ya se ha comentado con anterioridad, se ha diseñado un escenario tendencial y otro eficiente. El primero de ellos, representa una proyección basada en la continuación de las tendencias actuales sin apenas cambios significativos en las políticas más allá de lo ya planificado. El principal objetivo de este escenario es visualizar cómo evolucionaría el sector energético Andaluz si se mantiene el ritmo actual de desarrollo y adopción de tecnologías energéticas.

El segundo escenario, sin embargo, se basa en la implementación de medidas adicionales y en la adopción de políticas más intensas para mejorar la eficiencia energética e incrementar el uso de energías renovables. El principal propósito de este escenario es cumplir de manera más efectiva y rápida los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones establecidos en la Estrategia Energética de Andalucía 2030. Estas políticas están orientadas a mejorar la eficiencia en las diversas tecnologías de los sectores energéticos y a fomentar la incorporación de energías renovables, tanto en el consumo de energía final como primaria. Con ello, se pretende reducir el consumo de energía y aumentar la participación de las energías renovables en dicho consumo. Además, estas medidas contribuirán a disminuir las emisiones asociadas al consumo energético.

Tras examinar los resultados obtenidos en relación con los objetivos establecidos, podemos evaluar el grado en que cada escenario cumple con dichos objetivos energéticos para Andalucía. Esta evaluación es crucial para comprender el progreso hacia la consecución de los objetivos energéticos regionales. Para mayor claridad, el grado de cumplimiento de cada objetivo en los escenarios tendencial y eficiente se presentan en la figura 4.

Figura 4: Comparativa en la evaluación de cumplimiento de los objetivos para los escenarios estudiados



Como se esperaba, el panorama proyectado indica dificultades adicionales para alcanzar los objetivos establecidos. Aunque el escenario ideal ofrece perspectivas más esperanzadoras, aún no logra cumplir totalmente con los objetivos. En cuanto a las emisiones, se superó con creces la meta establecida, con una reducción de más del 70% desde 2005. Sin embargo, en lo que respecta al consumo de energía primaria, la disminución fue menor en ambos escenarios. En el escenario tendencial, incluso aumentó en lugar de disminuir desde 2021 y solo se redujo aproximadamente un 10% desde 2007. Por otro lado, el escenario eficiente, aunque no cumplió plenamente el objetivo, se acercó alcanzando casi un 25%. Respecto a la participación de energías renovables, se logró en torno a un 35%, acercándose en el escenario eficiente, pero aún sin alcanzar por completo el objetivo del 42%. En el escenario tendencial solo llegó al 26%.

Se puede deducir que, para que Andalucía consiga lograr todos o parte de los principales objetivos energéticos fijados a nivel regional, nacional e internacional, debe tener una planificación energética y diversos planes de seguimiento que velen por el cumplimiento de las hipótesis proyectadas. La ausencia de una planificación energética en esta región podría poner en peligro su transición hacia la sostenibilidad energética. La tendencia actual apunta hacia un aumento del consumo de energía y una lenta reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Esta situación dificultaría la reducción rápida y necesaria de las emisiones de carbono, así como la consecución de la descarbonización necesaria para combatir el cambio climático de manera efectiva.

5. Conclusiones

Andalucía, al igual que muchas otras regiones, todavía depende en gran medida de combustibles fósiles, con el petróleo y el gas natural como principales fuentes de energía. Esta dependencia presenta un desafío significativo para la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Para lograr esta transición es fundamental realizar una planificación energética integral que ofrezca oportunidades significativas para avanzar hacia un futuro más sostenible. Herramientas como LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) son muy útiles para modelar diferentes escenarios y evaluar el impacto de políticas y estrategias. Estas herramientas facilitan el logro de los objetivos energéticos y climáticos, contribuyendo a la reducción efectiva de las emisiones y a una mayor eficiencia en el uso de los recursos energéticos.

Una vez modelados con LEAP los dos escenarios energéticos se llega a la conclusión de que el escenario tendencial no presenta cambios significativos en las políticas y prácticas actuales, mostrando un aumento en el consumo de energía primaria y una insuficiente participación de energías renovables en el consumo de energía final (no alcanza el objetivo fijado).

El escenario eficiente, a través de la implementación de medidas adicionales, si logra un mayor grado de cumplimiento de los objetivos, acercándose considerablemente y demostrando la viabilidad de una transición más rápida hacia la sostenibilidad energética.

Para que Andalucía logre cumplir con los ambiciosos objetivos energéticos regionales, nacionales e internacionales para 2030 es fundamental desarrollar y seguir un plan energético integral que contemple medidas de corto, mediano y largo plazo, así como fomentar la investigación y desarrollo en tecnologías renovables y eficiencia energética.

En futuras investigaciones se propone continuar con este modelado, pero implementándolo de manera que se proyecten qué medidas adicionales serían necesarias, más allá de las contempladas en el escenario eficiente, para alcanzar la totalidad de los objetivos.

6. Referencias

- Alizadeh, R., Soltanisehat, L., Lund, P. D., & Zamanisabzi, H. (2020). Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method. *Energy Policy*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111174>
- Cai, L., Luo, J., Wang, M., Guo, J., Duan, J., Li, J., Li, S., Liu, L., & Ren, D. (2023). Pathways for municipalities to achieve carbon emission peak and carbon neutrality: A study based on the LEAP model. *Energy*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125435>
- Cormio, C., Dicorato, M., Minoia, A., & Trovato, M. (2003). A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 7, Issue 2, pp. 99–130). [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(03\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(03)00004-2)
- Emodi, N. V., Emodi, C. C., Murthy, G. P., & Emodi, A. S. A. (2017). Energy policy for low carbon development in Nigeria: A LEAP model application. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 68, pp. 247–261). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.118>
- García-Gusano, D., O'Mahony, T., Iribarren, D., & Dufour, J. (2019). Lessons for regional energy modelling: enhancing demand-side transport and residential policies in Madrid. *Regional Studies*, 53(6), 826–837. <https://doi.org/10.1080/00343404.2018.1492711>
- Gómez, A., Dopazo, C., & Fueyo, N. (2016). The “cost of not doing” energy planning: The Spanish energy bubble. *Energy*, 101, 434–446. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.004>
- Hu, G., Ma, X., & Ji, J. (2019). Scenarios and policies for sustainable urban energy development based on LEAP model – A case study of a postindustrial city: Shenzhen China. *Applied Energy*, 238, 876–886. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.162>
- Junta de Andalucía. (7 de Junio de 2022). *Agencia Andaluza de la Energía*. Obtenido de Agencia Andaluza de la Energía : <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/transicion-energetica-en-andalucia/estrategia-energetica-de-andalucia-2030>
- Løken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 11, Issue 7, pp. 1584–1595). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.11.005>
- Mirjat, N. H., Uqaili, M. A., Harijan, K., Mustafa, M. W., Rahman, M. M., & Khan, M. W. A. (2018). Multi-criteria analysis of electricity generation scenarios for sustainable energy planning in Pakistan. *Energies*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/en11040757>
- Mirjat, N. H., Uqaili, M. A., Harijan, K., Valasai, G. Das, Shaikh, F., & Waris, M. (2017). A review of energy and power planning and policies of Pakistan. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 79, pp. 110–127). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.040>
- Omu, A., Choudhary, R., & Boies, A. (2013). Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming. *Energy Policy*, 61, 249–266. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.009>
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 8, Issue 4, pp. 365–381). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- Terrados, J., Almonacid, G., & Hontoria, L. (2007). Regional energy planning through SWOT analysis and strategic planning tools. Impact on renewables development. In *Renewable*

and Sustainable Energy Reviews (Vol. 11, Issue 6, pp. 1275–1287).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.003>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

