



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2021/22**

Evaluación de la sostenibilidad de los principales tipos de centrales eléctricas en España y Suecia

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

ALUMNA

Elena Denisa Vlad

TUTORES

María Isabel Lamas Galdo

Juan José Cartelle Barros

FECHA

DICIEMBRE 2021

TÍTULO Y RESUMEN

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE CENTRALES ELÉCTRICAS EN ESPAÑA Y SUECIA

Se analizaron los balances energéticos de España y Suecia, desagregando los datos en función de las principales fuentes de energía empleadas y de los correspondientes sumideros, industria, transporte y otros sectores como residencial, comercio, entre otros.

Se evaluaron la sostenibilidad de las centrales de hidráulica, solar fotovoltaica, eólica, nuclear, biomasa y gas natural de ambos países. Para ello se emplearon un indicador económico (LCOE), tres indicadores sociales (aceptación, empleo) y quince indicadores medioambientales (acidificación, cambio climático). Los indicadores fueron integrados mediante el uso del método MIVES – Monte Carlo.

TÍTULO E RESUMO

AVALIACIÓN DA SOSTENIBILIDADE DOS PRINCIPAIS TIPOS DE CENTRALES EN ESPAÑA E SUECIA

Analizáronse os balances enerxéticos de España e Suecia, desagregando os datos segundo as principais fontes de enerxía utilizadas e os correspondentes sumidoiros, industria, transporte e outros sectores como residencial, comercio, entre outros.

Avaliáronse a sustentabilidade das centrais hidroeléctricas, solares fotovoltaicas, eólicas, nucleares, de biomasa e de gas natural en ambos os países. Para iso utilizáronse un indicador económico (LCOE), tres indicadores sociais (aceptación, emprego) e quince indicadores ambientais (acidificación, cambio climático). Os indicadores integráronse mediante o método MIVES - Monte Carlo.

TITLE AND ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE SUSTAINABILITY OF THE MAIN TYPES OF POWER PLANTS IN SPAIN AND SWEDEN

The energy balances of Spain and Sweden were analyzed, disaggregating the data according to the main energy sources used and the corresponding sinks, industry, transport and other sectors such as residential, commerce, among others.

The sustainability of the hydroelectric, solar photovoltaic, wind, nuclear, biomass and natural gas plants in both countries were evaluated. For this purpose, an economic indicator (LCOE), three social indicators (acceptance, employment) and fifteen environmental indicators (acidification, climate change) were used. The indicators were integrated using the MIVES - Monte Carlo method.

Índice general

1	Definición de objetivos.....	9
1.1	Introducción.....	9
1.2	El sistema eléctrico y conceptos básicos.....	10
1.3	Funcionamiento del mercado eléctrico español.....	14
1.4	Funcionamiento del mercado eléctrico sueco.....	15
1.5	Formación de precios en el mercado mayorista diario de electricidad.....	16
1.6	Sostenibilidad y desarrollo sostenible.....	18
1.7	La energía en los tratados de la Unión Europea.....	19
2	Estado del arte.....	20
2.1	El sistema energético en España.....	20
2.1.1	Evolución del sector energético español.....	20
2.1.2	Principales fuentes de energía de España.....	25
2.1.2.1	Petróleo y derivados.....	25
2.1.2.2	Gas natural.....	26
2.1.2.3	Carbón.....	28
2.1.2.4	Nuclear.....	29
2.1.2.5	Fuentes Renovables.....	30
2.1.3	Balance energético español.....	33
2.2	El sistema energético en Suecia.....	37
2.2.1	Evolución del sector energético sueco.....	37
2.2.2	Principales fuentes de energía de Suecia.....	39
2.2.2.1	Petróleo y derivados.....	39
2.2.2.2	Gas natural.....	40
2.2.2.3	Carbón.....	40
2.2.2.4	Nuclear.....	41
2.2.2.5	Fuentes Renovables.....	42
2.2.3	Balance energético sueco.....	44
2.3	Situación europea.....	48
3	Metodología.....	50
3.1	Introducción a la evaluación de la sostenibilidad.....	50
3.2	Selección de indicadores.....	51
3.2.1	Indicadores económicos.....	51
3.2.2	Indicadores sociales.....	52
3.2.3	Indicadores medioambientales.....	54
3.3	Principales métodos multicriterio de toma de decisiones.....	56

3.4 Introducción a MIVES.....	58
3.5 Procedimiento MIVES	58
3.6 MIVES – Monte Carlo.....	62
4 Aplicación del método MIVES – Monte Carlo	66
4.1 Aplicación del Método MIVES	66
4.1.1 Identificación del problema.....	66
4.1.2 Árbol de requerimientos	66
4.1.3 Definición de las funciones de valor	67
4.1.4 Elección de pesos	70
4.1.5 Definición de alternativas	71
4.2 Evaluación de la sostenibilidad.....	73
4.3 MIVES - MONTE CARLO - Matlab	73
4.4 Resultados – Discusión	75
5 Conclusiones.....	84
6 Bibliografía	86

Índice de figuras

Figura 1. Esquema sistema eléctrico peninsular (REE,2021).	13
Figura 2. Precios de los países pertenecientes a Nord Pool (Nord Pool, 2021).	15
Figura 3. Curva de oferta de electricidad del mercado (Energía y Sociedad, 2021).	16
Figura 4. Curva de demanda de electricidad del mercado (Energía y Sociedad, 2021).	17
Figura 5. Ejemplo de las curvas agregadas de oferta y demanda (OMIE, 2021).	17
Figura 6. Los 17 objetivos de desarrollo sostenible de la ONU (Naciones Unidas, 2021). .	18
Figura 7. Consumo bruto de energía por fuentes primarias en España, 1931-1955 (Sudriá, 2006).	21
Figura 8. Consumo bruto de energía primaria en España, 1955-1975 (Sudriá, 2006).	22
Figura 9. Evolución del consumo de energía final en España, 2000-2016 (IDAE, 2017). ..	24
Figura 10. Red española de oleoductos. Infraestructura logística del Grupo CLH (Exolum, 2021).	26
Figura 11. Evolución del precio del petróleo OPEP de 2010 a 2021 (Expansión, 2021). ...	26
Figura 12. Distribución de consumos de gas natural en España en 2019 (Eurostat, 2019).	27
Figura 13. Evolución del consumo de carbón en España, 1965-2020 (BP, 2021).	28
Figura 14. Centrales nucleares de España (Foro Nuclear, 2021).	29
Figura 15. Evolución de las energías renovables en España (BP, 2020).	30
Figura 16. Distribución de las fuentes de energía renovable España, 2020 (REE, 2021). .	30
Figura 17. Evolución del consumo de la energía hidráulica en España (BP, 2021).	32
Figura 18. Consumo final de energía por fuente en España, 1990-2019 (Eurostat, 2021). 33	
Figura 19. Energía final por sectores en España, 1990-2019 (Eurostat, 2021).	34
Figura 20. Energía final en el sector industrial en España, en 2019 (Eurostat, 2021).	35
Figura 21. Energía final en el sector transporte en España, en 2019 (Eurostat, 2021).	35
Figura 22. Energía final en los otros sectores en España, en 2019 (Eurostat, 2021).	35
Figura 23. Energía final de cada sector en España en 2019 (Eurostat, 2021).	36
Figura 24. Demanda de energía eléctrica en España durante el 2020 (REE, 2021).	36
Figura 25. Energía disponible en Suecia, 1970-2010 (Swedish Energy Agency, 2011).	38
Figura 26. Energía primaria de Suecia en 2019 (Eurostat, 2021).	39
Figura 27. Evolución del consumo de petróleo en Suecia, 1965-2020 (BP, 2021).	40
Figura 28. Evolución del consumo de carbón en Suecia, 1965-2020 (BP, 2021).	40
Figura 29. Centrales nucleares de Suecia (elaboración propia a partir de IAEA, 2021).	41
Figura 30. Evolución de las energías renovables en Suecia (BP, 2021).	42
Figura 31. Distribución de las diferentes fuentes de energía renovable Suecia, 2020 (Eurostat, 2021).	42
Figura 32. Evolución del consumo de energía eólica en Suecia, 2002-2020 (BP, 2021). ..	43
Figura 33. Evolución del consumo de energía solar en Suecia, 2014-2020 (Eurostat, 2021).	43
Figura 34. Evolución de la demanda hidráulica en Suecia, 1965-2020 (BP, 2021).	44
Figura 35. Consumo final de energía por fuente en Suecia, 1990-2019 (Eurostat,2021)...	45

Figura 36. Energía final consumida por sectores en Suecia, 1990-2019 (BP, 2021).....	45
Figura 37. Cobertura de la demanda en el sector industrial en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).	46
Figura 38. Cobertura de la demanda en el sector transporte en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).	46
Figura 39. Cobertura de la demanda en otros sectores en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).	46
Figura 40. Energía final de cada sector en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).	47
Figura 41. Demanda de energía eléctrica en Suecia durante el 2020 (Eurostat, 2021).	47
Figura 42. Emisiones anuales de CO ₂ de España y Suecia (Ritchie y Roser, 2021).....	48
Figura 43. Dimensiones del desarrollo sostenible en la sociedad (Martínez, 2015).	50
Figura 44. Ejemplo adaptación del indicador Aceptación (elaboración propia).....	53
Figura 45. Clasificación MCDM (elaboración propia a partir de Legesse (2021) y Yepes (2018)).	56
Figura 46. Diagrama de flujo (elaboración propia a partir De la Cruz et al., 2014).	58
Figura 47. Ejemplo de árbol de requerimientos (elaboración propia a partir De la Cruz et al., 2014)	59
Figura 48. Tipos de función de valor (De la Cruz et al., 2014)	60
Figura 49. Ejemplos de funciones de distribución (De la Cruz et al., 2014).....	62
Figura 50. Diagrama de flujo el método MIVES-Monte Carlo (De la Cruz et al., 2014)	63
Figura 51. Función triangular (elaboración propia a partir de Cartelle Barros et al. (2021))	64
Figura 52. Árbol de requerimientos (elaboración propia de Cartelle Barros et al., 2020)) ..	66
Figura 53. Definición de la función de valor del indicador LCOE (elaboración propia)	68
Figura 54. Definición de la función de valor del indicador aceptación (elaboración propia)	68
Figura 55. Definición de la función de valor del indicador accidentes (elaboración propia)	68
Figura 56. Definición de la función de valor del indicador empleo (elaboración propia)	68
Figura 57. Funciones de valor de los indicadores medioambientales (elaboración propia basada en Cartelle Barros et al., 2020)	69
Figura 58. Comparación subíndices de España y Suecia usando modas para los indicadores probabilistas (elaboración propia)	77
Figura 59. Frecuencias de los rangos modales de cada central. Comparación entre España y Suecia (elaboración propia).....	80

Índice de tablas

Tabla 1. Consumo de carbón mineral en 1900 (Sudriá, 1987).	20
Tabla 2. Plan Energético Nacional de España, 1983-1992 (Lara, 2021).	23
Tabla 3. Consumos productos petrolíferos en España en 2020 y 2019 (CORES, 2021). ..	25
Tabla 4. Producción e importaciones de gas natural de España, 2018-2020 (CORES, 2021).	27
Tabla 5. Precios sin impuestos de la tarifa TUR que están en vigor (BOE, 2021).	27
Tabla 6. Top 10 países por capacidad instalada anual y total en 2019 (IEA, 2021).	31
Tabla 7. Composición de la energía consumida en 1900 y 1950 en Suecia, Países Bajos, España e Italia (Gales et al., 2007).	37
Tabla 8. Consumo de eléctrico en Suecia en 1973 y 1993 (Nordhaus, 1995).	37
Tabla 9. Consumo productos petrolíferos en Suecia en 2017 (Sweden Statistics (SCB), 2018).	39
Tabla 10. LCOE España y Suecia (elaboración propia a partir del informe Elforsk (2014), NEA y IEA (2015, 2020), Galbete (2013), Márquez (2018)).	52
Tabla 11. Resultados aceptación España (YouGov, 2021).	52
Tabla 12. Resultados aceptación Suecia (Jönsson y Holmberg, 2021).	52
Tabla 13. Empleo asociado a cada fuente para España y Suecia (elaboración propia a partir de EurObserv'er (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), Foro Nuclear (2019)).	54
Tabla 14. Fatalidades/TWh producido (elaboración propia a partir de Haddad y Dones (1991), Hirschberg (2006) Burgherr (2014) y las bases de datos de Eurostat y Bp).....	54
Tabla 15. Indicadores medioambientales (Cartelle Barros et al., 2020).	55
Tabla 16. Indicadores medioambientales para Suecia (Cartelle Barros et al. ,2020)	55
Tabla 17. Indicadores medioambientales para España (Cartelle Barros et al., 2020).	55
Tabla 18. Propiedades de los indicadores del modelo (elaboración propia a partir de Cartelle Barros et al., 2020).....	67
Tabla 19. Respuestas y valores equivalentes del indicador discreto Aceptación (elaboración propia)	67
Tabla 20. Parámetros de las funciones de valor (elaboración propia)	70
Tabla 21. Elección del peso (elaboración propia a partir de Cartelle Barros et al, 2015; Cartelle Barros et al, 2020)	71
Tabla 22. Indicadores medioambientales España (elaboración propia a partir Cartelle Barros et al, 2015).....	71
Tabla 23. Indicadores medioambientales Suecia (elaboración propia Cartelle Barros et al, 2015)	71
Tabla 24. Indicadores discretos (elaboración propia)	72
Tabla 25. Indicadores probabilistas LCOE y aceptación para España y Suecia (elaboración propia)	72
Tabla 26. Indicador probabilista accidentes para España y Suecia (elaboración propia) ...	72
Tabla 27. Índices económico, social y medioambiental (elaboración propia)	76
Tabla 28. Clasificación de las centrales españolas de menor a mayor en función de los datos de la Tabla 31 (elaboración propia)	76
Tabla 29. Clasificación de las centrales suecas de menor a mayor en función de los datos de la Tabla 31 (elaboración propia)	76

Tabla 30. IS y datos estadísticos de España (elaboración propia).....	77
Tabla 31. IS y datos estadísticos de Suecia (elaboración propia).....	78
Tabla 32. Curvas de probabilidad acumulada (elaboración propia)	81
Tabla 33. Histogramas de frecuencias (elaboración propia)	83

1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

1.1 Introducción

El presente Trabajo de Fin de Grado surge del interés de entender los sistemas energéticos español y sueco identificando las fortalezas y debilidades de cada uno. Para ser más específicos interesa conocer como obtienen la energía eléctrica que se consumen en los hogares, comercios, industrias y demás sectores energéticos.

A lo largo del trabajo se podrá distinguir dos partes. La primera parte más teórica, dónde se hará un estudio sobre la evolución de cada sistema energético y la situación actual, además de los pronósticos existentes a largo plazo. Se analizarán los balances energéticos, desagregando los datos en función de las fuentes de energía utilizadas y de los correspondientes sumideros, el funcionamiento del mercado eléctrico y el establecimiento de precios de la energía eléctrica por país.

La segunda parte incluye la evaluación de la sostenibilidad de los principales tipos de fuentes de producción de energía eléctrica tanto para España como para Suecia. Según el Informe Brundtland (1987) lo que se entiende por sostenibilidad es la satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad para que futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades. Para poder evaluar este concepto que engloba el equilibrio entre un crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social, se seleccionarán los indicadores más relevantes para cada uno de los pilares de la sostenibilidad integral. La mayoría de estos indicadores tienen unidades de medida diferentes. Por ello, para valorar el grado de sostenibilidad, es importante basarse en metodologías multicriterio de valoración que permitan valorar y ponderar todos estos indicadores. Una de las metodologías que se ajusta a estos criterios es MIVES: Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible, que permite obtener un único índice de valor que mide el grado de sostenibilidad del material o proceso evaluado (Viñolas et al., 2009).

Teniendo en cuenta de que se emplearán datos probabilistas se empleará el método MIVES – Monte Carlo y no se obtendrá un sólo índice, sino que se obtendrá una colección de índices. Así se analizará la sensibilidad del índice global de sostenibilidad por cada central analizada.

España es un país con abundantes recursos renovables, como el sol, viento, agua, biomasa y biocombustibles. Pero a pesar de ello es un país fuertemente dependiente de las importaciones energéticas. En 2019 esta dependencia según la base de datos de Eurostat (2021) ascendía al 79% teniendo en cuenta la producción primaria y lo que se importa. A diferencia de España, Suecia depende menos del 46%.

En términos de energía renovable, en España, tan sólo el 18,3% de la energía final consumida fue de origen renovable, frente al 57,3% de Suecia (Eurostat, 2021). La media de la Unión Europea (UE) está en 18,6%.

Las políticas de transición energéticas actuales de este país escandinavo van encaminadas a implantar un sistema basado principalmente en energías renovables. Analizando su sistema energético, se quiere determinar que se tendría que aplicar en España para poder lograr los mismos resultados. Y si las medidas tomadas por el gobierno español son las más adecuadas.

1.2 El sistema eléctrico y conceptos básicos

Viviendo en una sociedad cada día más electrificada, asaltan dudas de cómo y de dónde proviene la electricidad. Los sistemas eléctricos de potencia o sistemas de energía eléctrica son los encargados de llevar esta labor a cabo. Se trata de un conjunto de dispositivos, equipos e instalaciones que operan para llevar la energía generada desde centrales generadoras hasta los consumidores finales.

Para ser más exactos los componentes básicos de este sistema se detallan a continuación identificando las distintas partes para el caso de España. Más adelante se mostrará que Suecia funciona prácticamente igual.

1. **Centros o plantas de generación.** Lugar donde se produce la electricidad y se eleva la tensión para transportarla, independientemente de la fuente energética. Dichas fuentes se pueden clasificar en función de varios criterios, pero a lo largo de este trabajo se distinguirán entre las siguientes (Energía y Sociedad, 2021):

1.1. Central térmica convencional. Es una instalación que se basa en quemar algún tipo de combustible fósil para producir vapor. Este vapor luego mueve una turbina para producir electricidad. Los combustibles utilizados básicamente son carbón, gas natural y fuelóleo.

El gran inconveniente de este tipo de centrales es que tienen un gran impacto ambiental debido a la emisión de gases contaminantes y partículas a la atmósfera (Energía y Sociedad, 2021).

1.2. Central térmica de ciclo combinado. Es una planta que produce energía eléctrica con un generador accionado por una turbina de combustión. Los gases de escape de la combustión se aprovechan para calentar agua en una caldera de recuperación que produce vapor aprovechable para accionar una segunda turbina. Esta segunda turbina, de vapor, puede accionar el mismo generador que la inicial u otro distinto (García, 2012).

Esta tecnología tiene una mayor eficiencia y es menos contaminante que las centrales térmicas convencionales.

1.3. Central de cogeneración. Es una instalación que pretende obtener energía eléctrica y energía térmica al mismo tiempo por medio de cualquier tipo de combustible, ya sea gas natural, petróleo o recursos renovables como biomasa.

Estas centrales presentan una mejor eficiencia energética y un menor impacto en el medioambiente al obtener a través de un único proceso tanto energía eléctrica como energía térmica (IDAE, 2020).

1.4. Central nuclear. Esta tecnología se basa en el aprovechamiento de la energía calorífica liberada en la fisión de dos núcleos de uranio. El tipo de reactor más común es el de agua a presión (PWR, power water reactor). Se compone de tres circuitos, el primario sirve para refrigerar y extraer el calor generado en el reactor, el segundo refrigera al primario y al mismo tipo obtiene vapor que sirve para mover una turbina donde se obtiene la electricidad, y el terciario refrigera el secundario con agua de un río, mar o lago (García, 2020).

Las centrales nucleares no emiten ningún tipo de gas contaminante a la atmósfera durante la operación, aunque sí generan residuos nucleares que deben ser depositados en lugares aislados y controlados durante largo tiempo debido a su impacto radiactivo.

Por otro lado, este tipo de centrales tienen un régimen de funcionamiento significativamente rígido y su capacidad para variar su nivel de producción en un plazo de tiempo reducido es limitado.

La sociedad percibe preocupante la generación de residuos radiactivos. Pero independientemente, el volumen de residuos de alta actividad es una pequeñísima fracción de los generados con cualquier otra tecnología convencional (Energía y Sociedad, 2021).

1.5. Fuentes renovables

1.5.1. Energía hidroeléctrica. Se aprovecha la energía de una masa de agua situada en el cauce de un río o retenida en un embalse, convirtiéndola en energía eléctrica a través de un generador acoplado a una turbina. Se pueden distinguir tres tipos atendiendo a su funcionalidad (Iberdrola, 2021):

- Central de **agua fluyente**, se adaptan al régimen de caudales que discurre por el río sin alterarlo en todo momento. Tienen un funcionamiento continuo pero variable a lo largo del año.
- Central de **regulación**, puede regular su funcionamiento mediante el uso de un embalse aguas arriba de la central para atender las necesidades de gestión de la demanda.
- Central de **bombeo o reversible**, se bombea agua desde un nivel inferior a la central hasta un embalse situado a una altura superior, para que luego se deje pasar el agua embalsada y así producir electricidad.

Las centrales de regulación y de bombeo son muy flexibles y son adecuadas para responder a fallos imprevistos en otras unidades de generación (Iberdrola, 2021).

1.5.2. Energía solar. Existen dos formas de aprovechar la energía solar para producir electricidad:

- Energía **solar fotovoltaica**, transforma directamente la radiación solar en electricidad mediante células solares basadas en materiales semiconductores que generan electricidad cuando incide sobre ellos la radiación solar (IDAE, 2020).
- Energía **solar termoeléctrica**, aprovecha la energía solar para calentar un fluido que este a su vez mueve una turbina para generar electricidad (IDAE, 2020).

1.5.3. Energía eólica. Se obtiene electricidad mediante la transformación de la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores, que utilizan una hélice para transmitir el movimiento que el viento produce en sus palas al rotor del alternador. Generalmente se agrupan en un mismo emplazamiento varios aerogeneradores, formando parques eólicos, que pueden superar los 100 MW. No obstante, puede producir impacto visual y ofrecen una producción intermitente (Espejo, 2004).

1.5.4. Energía de la biomasa. La biomasa abarca todo el conjunto de materias orgánicas formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. La biomasa se considera renovable debido a que el contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Los productos procedentes de la biomasa, en función del estado físico, pueden encontrarse en estado sólido, líquido o gas (Fernández, 2007).

1.5.5. Energías del mar. Son energías que aprovechan el potencial energético de los océanos y de los mares. Las diferentes tecnologías para el aprovechamiento de la energía del mar son (IDAE, 2020):

- Energía de las mareas o mareomotriz.
- Energía de las corrientes.
- Energía maremotérmica.
- Energía de las olas o undimotriz.
- Energía azul o potencia osmótica.

1.5.6. Geotermia. La energía geotérmica está almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra sólida y supone el recurso energético renovable más importante, después del Sol. Se trata de una de las fuentes menos conocidas y que es factible en todo el planeta. La desventaja principal es que la infraestructura tiene un alto coste (Energía y Sociedad, 2021).

2. **Líneas de transporte.** Medio por dónde se trasmite la energía eléctrica de alta tensión (AT). En España el transporte está regulado y es gestionado por Red Eléctrica de España (REE), que es la propietaria de todas las infraestructuras que posibilitan el transporte de la electricidad a muy alta tensión y por largas distancias, desde las centrales de producción hasta las subestaciones, como pueden ser los hilos conductores o las torres eléctricas. Las compañías eléctricas establecen una diferencia en función de la tensión de la línea (Fundación Endesa, 2021):

- Instalaciones de transporte (categoría especial): de tensión mayor o igual a 220 kV hasta llegar a los 400 kV, y las de menor tensión que formen parte de la Red de Transporte (por ejemplo, en las islas se considera transporte la red de 66kV). En el año 2020 en España existían 21.753 km de redes de 400kV, 19.310 km de 220 kV y en las islas un total de 3.490 km (REE, 2021).
- Red AT de Distribución (primera y segunda categoría): inferior a 220 kV y superior a 30kV.
- Red de media tensión (MT) de Distribución (tercera categoría): entre 30kV y 1kV.

3. **Estaciones transformadoras reductoras.** Pueden ser subestaciones de transporte o distribución, su función es reducir la tensión o el voltaje de la línea. Cumplen tres funciones principales:

- Realizar la interconexión de todas las líneas entre sí.
- Son los centros de transformación desde donde se alimentan las líneas de distribución que llegan hasta el consumo.
- Es donde se instalan los elementos de protección y maniobra del sistema.

La tensión primaria de los transformadores depende de la tensión de la línea de transporte (60, 110, 220, 380kV). Mientras que la tensión secundaria de los transformadores está condicionada por la tensión de las líneas de distribución (entre 6 y 30kV) (Fundación Endesa, 2021).

4. **Distribuidoras de energía.** Son las encargadas de llevar la electricidad desde las subestaciones hasta los consumidores, mantener las instalaciones de distribución y garantizar la calidad de suministro. Son también las encargadas de tomar la medida de los puntos de suministro, como el contador de la vivienda.

La energía que llega a las subestaciones eléctricas es distribuida a través de líneas de MT. Estas líneas soportan energía de entre 15kV y 30kV. Según la forma en la que estén ubicadas pueden ser aéreas o subterráneas (Fundación Endesa, 2021).

A pesar de que existan muchas distribuidoras en España, la distribución de la energía está regulada (los costes de distribución son establecidos por el gobierno) y este mercado está formado por un oligopolio con 5 distribuidoras principales que controlan el 90% del mercado: Endesa, Iberdrola, Naturgy, EDP y Viesgo-Repsol (Barrero, 2021).

5. **Operador del sistema.** También llamado centro de control eléctrico. Es donde se controla el correcto funcionamiento de la transformación, transporte y distribución de la energía eléctrica, que en España es REE.

Está formado por tres salas de control: la de alta tensión, la sala de media tensión y la sala de control de baja tensión. Las tres unidades se encargan del control permanente del estado de la red que tienen asignada, con el objetivo principal de suministrar energía eléctrica a los puntos de consumo con las mejores condiciones de calidad y seguridad posibles (REE, 2021).

6. **Consumidores de energía eléctrica.** Se trata del usuario final de la energía eléctrica.
7. **Comercializadoras.** Son las responsables de la compra de electricidad y proporciona un servicio a los consumidores ofreciendo la energía. Se pueden dividir en dos (Endesa, 2020):
 - Comercializadoras de referencia. Comercializan la tarifa de Precio Voluntario al Pequeño Consumidor (PVPC) establecida por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo para consumidores con potencias contratadas inferiores a 10kW. Sólo hay ocho y no pueden comercializar ninguna otra tarifa.
 - Comercializadoras de mercado libre. En la actualidad hay más de 300 comercializadoras en el mercado libre. Pueden ofrecer el precio de la energía que estimen oportuno.

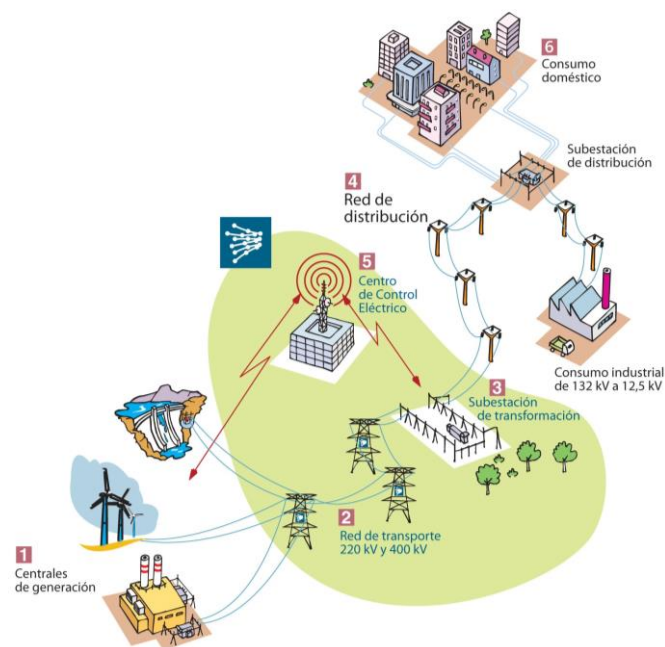


Figura 1. Esquema sistema eléctrico peninsular (REE,2021).

En la Figura 1 se muestra el sistema anteriormente mencionado junto con los componentes básicos.

1.3 Funcionamiento del mercado eléctrico español

En España, hasta el 1 de enero de 1998 el funcionamiento diario de las centrales de producción lo determinaba REE, de acuerdo con los criterios de política energética establecida por el Ministerio de Industria y Energía. Pero desde entonces entra en vigor la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico que introdujo los cambios normativos más importantes de la historia del sector en España. Esta ley está derogada por la nueva Ley del Sector Eléctrico, Ley 24/2013 (Fano, 2002).

Los cambios producidos conllevan el proceso de liberalización del sector eléctrico.

En la actualidad, el mercado eléctrico en España pasa a denominarse Mercado Eléctrico Ibérico (MIBEL). Se trata de proceso de cooperación entre España y Portugal con el fin de integrar los sistemas eléctricos en ambos países. MIBEL se caracteriza por presentar dos actividades abiertas a la competencia: la producción (mercado mayorista) y la comercialización (mercado minorista) (Flores, 2015).

En el mercado mayorista, ponen a negociar a las comercializadoras, que quieren comprar la energía, con las generadoras, que quieren vender la energía que han generado. Después esas comercializadoras venderán la energía que han comprado al usuario final. Pero también están los contratos bilaterales, que son acuerdos directos de venta entre un generador de energía y un comprador.

En muchos países el mercado eléctrico tiene una entidad reguladora, en España, el operador del mercado se llama OMIE, Operador del Mercado Ibérico de Energía (NEMO, según la terminología europea). Es el encargado de establecer los mecanismos legales para que los compradores y los vendedores puedan hacer la compraventa de la energía, tanto para España como para Portugal (OMIE, 2021).

Este mercado de producción está formado por tres elementos principales: el mercado diario, el mercado intradiario y el mercado de servicios complementarios (Fundación Endesa, 2021).

- El **mercado diario**, se negocia el precio de la energía para cada hora del día siguiente al de la negociación. Este sistema es un incitador para reducir el precio de la electricidad, debido a que las centrales generadoras intentan ofrecer su energía al precio más bajo posible para asegurarse que sean seleccionadas para funcionar.
- El **mercado intradiario** funciona con los mismos criterios que el anterior mercado, pero este aparece solo cuando es necesario efectuar ajustes en las ofertas o demandas sobre el programa ya establecido. Este mercado está organizado en seis sesiones en las que pueden participar todos los agentes que estén autorizados para operar en el mercado diario. Una vez definidas las casaciones de ofertas y demandas del mercado intradiario, son entregadas al programa diario viable, determinando así el programa horario final.
- El **mercado de servicios complementarios** está constituido por los procesos que permite resolver los desequilibrios que puedan surgir entre generación y demanda. Agrupa un conjunto de mecanismos de carácter competitivo que complementan el mercado de producción. Todos los procesos que forman parte de este mercado permiten el control y la operación en tiempo real del sistema eléctrico, de manera que en cualquier momento la seguridad y la calidad en el suministro eléctrico estén garantizadas.

1.4 Funcionamiento del mercado eléctrico sueco

Al igual que el mercado español, Suecia sufre una liberalización del mercado en 1996. Antes de dar el cambio, el sistema sueco estuvo regulado por una ley eléctrica de 1902. El suministro de electricidad nunca estuvo completamente centralizado o nacionalizado. Desde finales de la década de 1940 hasta 1991, la empresa generadora más grande fue Vattenfall, que era la única responsable de la red de transporte nacional. Las redes regionales de distribución eran también propiedad de Vattenfall, además de otras diez empresas distribuidoras (Lazcano, 2014).

En 1991, el gobierno sueco dio el primer paso importante hacia un mercado eléctrico competitivo al decidir eliminar las actividades de transmisión de Vattenfall. Posteriormente, el 1 de enero de 1992, se lanzó una nueva empresa estatal, Svenska Kraftnät, que es la encargada de gestionar la red de transmisión nacional y los enlaces extranjeros. Es decir, sería el operador del sistema eléctrico. Pero no fue hasta 1996, que se termina de liberalizar el sistema al unirse al mercado noruego creando así un intercambio conjunto el cual pasa a llamarse Nord Pool ASA (Nord Pool, 2020).

Al igual que OMIE, Nord Pool, es un Operador Nominado del Mercado de Electricidad (NEMO). Actualmente opera en 15 países europeos (Figura 2) y también proporciona servicios a los mercados de energía en Croacia y Bulgaria (Nord Pool, 2020). Para más información de precios se puede consultar la página de Nord Pool, que al igual que OMIE, se actualiza diariamente con los nuevos costes de la energía.

Como se puede ver en la Figura 2, en Suecia se diferencia 4 zonas diferentes: SE1 Luleå, SE2 Sundsvall, SE3 Estocolmo y SE4 Malomö (Nord Pool, 2015).

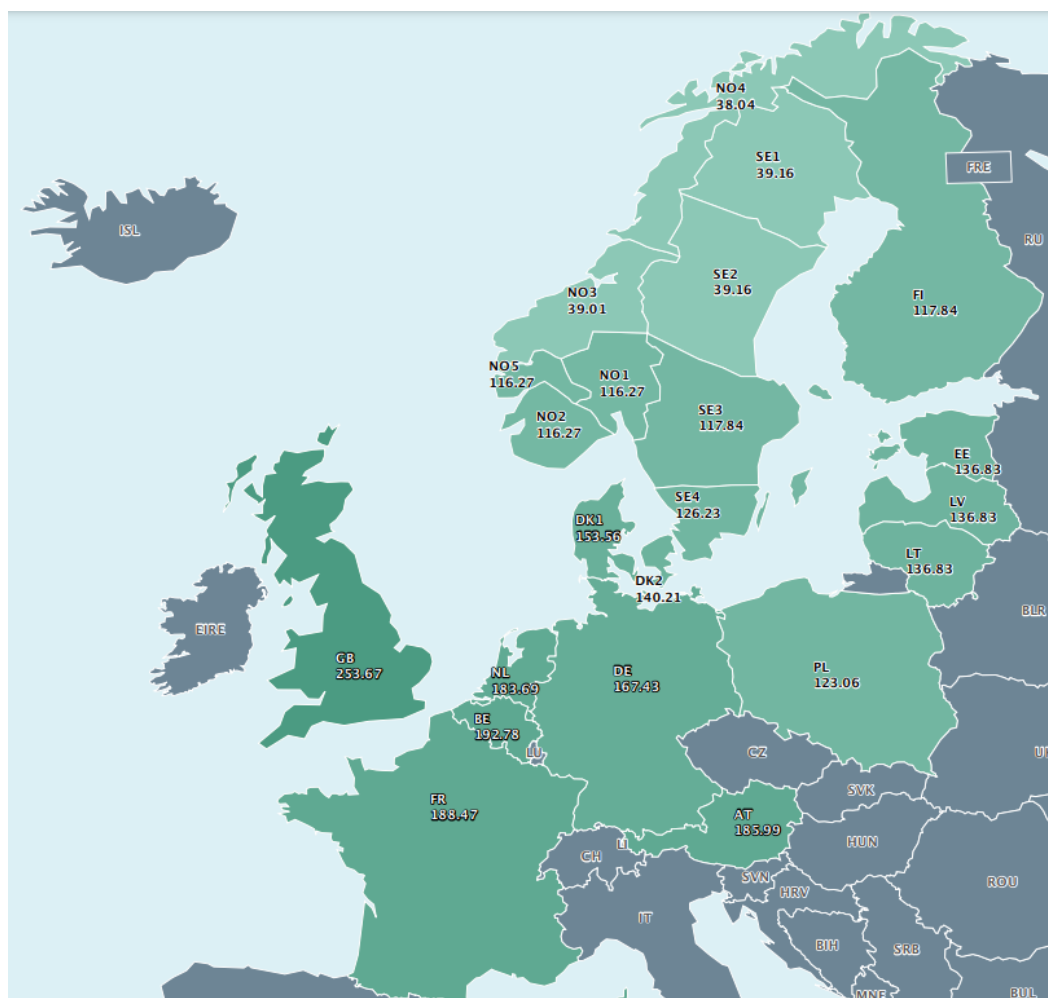


Figura 2. Precios de los países pertenecientes a Nord Pool (Nord Pool, 2021).

1.5 Formación de precios en el mercado mayorista diario de electricidad

Como se ha mencionado en el apartado anterior, OMIE, es el encargado de realizar la compraventa de la energía en el caso de España, y Nord Pool, en el sueco. El mercado diario se celebra de igual manera en ambos países. El día anterior al de la entrega de la energía, compradores y vendedores negocian los precios para la demanda de cada una de las horas del día siguiente. Se realiza así la casación diaria, es decir, la subasta dirigida por OMIE, y se llega a un único precio de compraventa.

Los generadores presentan sus ofertas al mercado (Figura 3) para cada una de las horas del día siguiente, el operador las agrega y ordena por precio ascendente, resultando así la curva de oferta del mercado para cada hora.

La oferta de un generador representa la cantidad de energía que está dispuesto a vender a partir de un cierto precio mínimo. Así, según el Manual de la Energía (Sociedad y Energía, 2021), las ofertas competitivas de un generador reflejan:

- En cuanto a la cantidad, las restricciones físicas a las que están sujetas su instalación (la potencia disponible, la potencia mínima a la que ha de operar la central para que la misma sea estable y segura o mínimo técnico, la disponibilidad de combustible o de producible hidráulico, la rapidez con la que pueden incrementar su producción ante una hora y la siguiente, etc.). Es importante destacar que las Reglas del Mercado obligan a las instalaciones de generación a ofertar toda su capacidad disponible a lo largo de toda la secuencia de mercados.
- En cuanto al precio ofertado, éste refleja el coste de oportunidad que le supone generar electricidad:
 - Los costes en los que evitaría incurrir de optar por no producir (coste de arranque de la central, coste de mantenimiento, etc.).
 - Los ingresos a los que renuncia por el hecho de producir (para una central térmica generar supone renunciar a revender a un tercero el combustible y los derechos de emisión de CO₂, para una hidráulica con embalse, etc.), es decir, el coste de oportunidad.

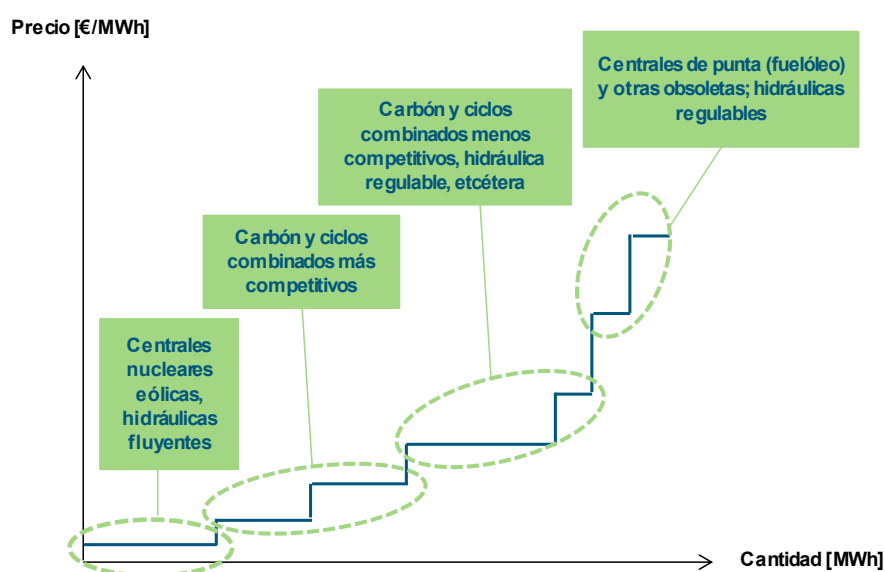


Figura 3. Curva de oferta de electricidad del mercado (Energía y Sociedad, 2021).

Por otra parte, en el corto plazo, la demanda de energía eléctrica de los distintos tipos de consumidores depende principalmente de si el día es laborable o festivo, y de las condiciones ambientales.

Para conseguir la curva de demanda, primero se colocan las comercializadoras que suelen ofertar el precio máximo permitido para asegurarse que los consumidores tendrán la energía que demandan, después se irán colocando las ofertas de compra de las comercializadoras de mayor a menor, tal como se muestra en la Figura 4.

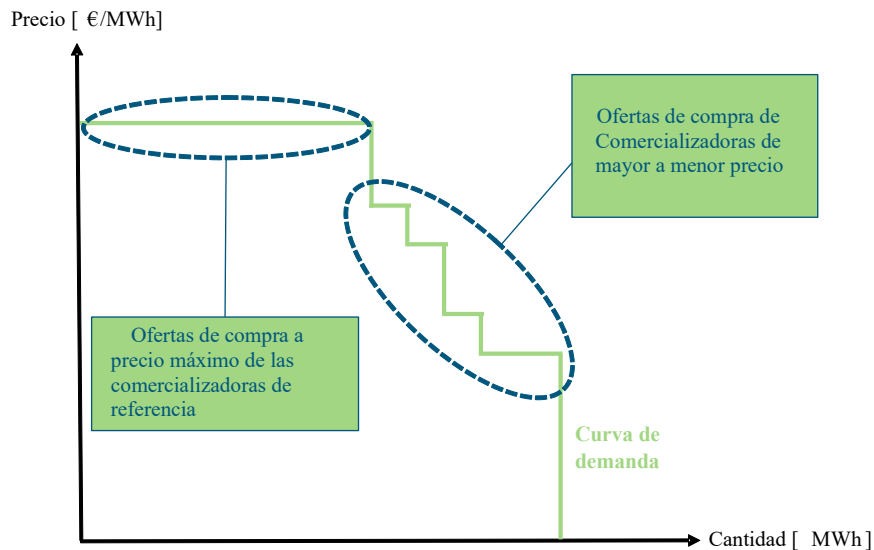


Figura 4. Curva de demanda de electricidad del mercado (Energía y Sociedad, 2021).

Del cruce de las curvas de oferta y demanda (Figura 5) resulta el precio del mercado para cada hora del día siguiente y se identifican las ofertas “casadas”. Es decir, el precio al cual compradores y vendedores adquieren la energía independientemente de la oferta inicial.

Como se ve en la Figura 5 que se muestra un ejemplo de las curvas de oferta y demanda que lleva a cabo diariamente el OMIE. En el cruce de las dos curvas se determina el precio final de la energía y, por tanto, todo lo que queda a la derecha de ese punto llegan a un acuerdo.

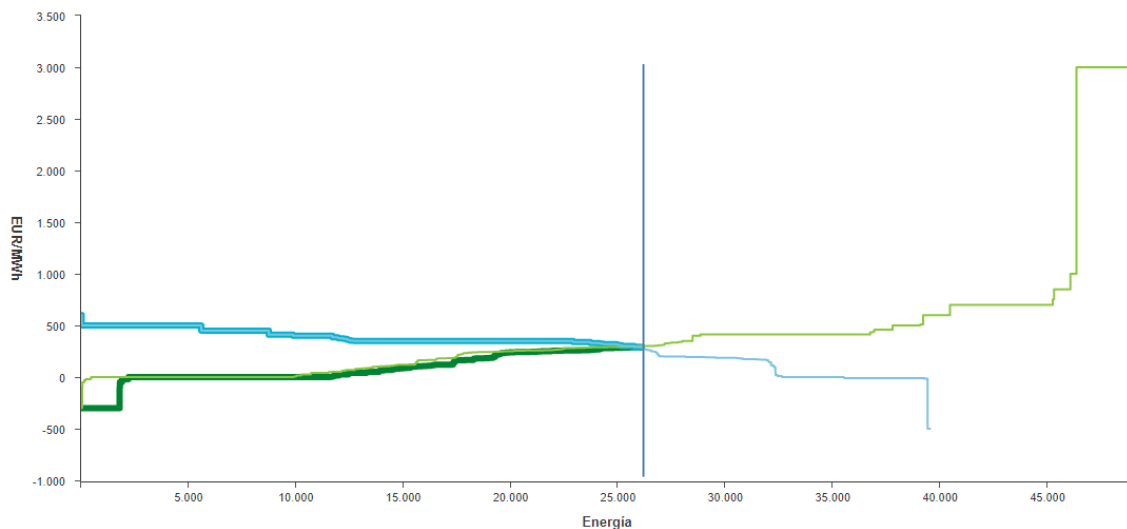


Figura 5. Ejemplo de las curvas agregadas de oferta y demanda (OMIE, 2021).

El método de casación descrito anteriormente es válido, resultando, con carácter general, en un único precio para todo el sistema ibérico y un flujo de energía entre España y Portugal. En caso de saturación de la interconexión España-Portugal en cualquiera de los sentidos, se ejecuta la “separación de mercados”, que consiste básicamente en hacer dos casaciones separadas, teniendo en cuenta la cantidad máxima de energía que puede intercambiarse entre ambos sistemas y resultando un precio distinto para cada uno de los países. Estas limitaciones han ido disminuyendo en los últimos años gracias a esfuerzo inversor en la conexión internacional y la progresiva homogeneización de los parques de generación (Energía y Sociedad, 2021).

Para Suecia, la formación de precios es igual, con diferencia de que el operador del sistema el Nord Pool.

1.6 Sostenibilidad y desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible según la definición de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) es el que permitiría a las actuales generaciones satisfacer sus necesidades y tener una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades y tener también una vida digna y productiva, en armonía con la naturaleza. Por tanto, aspectos relacionados con lo ambiental, económico y social, incluyendo componentes éticos y culturales, hay que tenerlos en cuenta en el momento de evaluar la sostenibilidad (Brundtland, 1987).



Figura 6. Los 17 objetivos de desarrollo sostenible de la ONU (Naciones Unidas, 2021).

Entre los 17 objetivos de desarrollo sostenible de la ONU, mostrados en la Figura 6, para lograr un futuro mejor y más sostenible, está el objetivo de alcanzar una energía limpia y asequible junto al agua limpia y el saneamiento. La energía es fundamental para casi todos los desafíos y oportunidades que enfrenta el mundo en la actualidad. Ya sea por el empleo, seguridad, cambio climático, la producción de alimentos o el aumento de los ingresos (Naciones Unidas, 2015).

Diferentes escenarios desarrollados por la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency, IEA, 2018) sugieren que la demanda de energía podría expandirse en un 30% en todo el mundo desde 2018 hasta el 2040, donde las

tecnologías de energía renovable y la electricidad juegan un papel muy importante para el cambio.

Es importante crear un cambio desde ahora. Sin una acción decisiva, las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) relacionadas con la energía podrían multiplicarse más del doble para 2050. La erosión del suelo y la escasez de agua se acelerarán en todo el mundo.

1.7 La energía en los tratados de la Unión Europea

A pesar de que la energía no estaba incluida en los primeros Tratados de la UE, se vio la necesidad de coordinar acciones a nivel europeo para resolver los problemas comunes a los que se enfrentaba Europa en cuanto al cambio climático y a la energía.

Se comenzó en 1951, con el Tratado CECA (Comunidad Europea del Carbón y del Acero) que expiró en 2002. Posteriormente, en 1957 se firmó el Tratado de Roma con objetivos políticos y que ha tenido sucesivas reformas hasta el actual Tratado de Lisboa, y el tratado EURATOM de la Comunidad de la Energía Atómica. En 2007, la Comisión Europea presentó una comunicación denominada “Una política energética para Europa” en la que se establecían las líneas generales de la política energética comunitaria de forma que se garantizase el acceso a una energía sostenible, segura y competitiva (Energía y Sociedad, 2021).

El plan de acción contaba con varias medidas entre las cuales se encontraban los siguientes objetivos:

- Una reducción del 20% de las emisiones de GEI (respecto de los niveles de 1990).
- Un 20% de la energía de la UE procedente de fuentes renovables.
- Un 20% de mejora de la eficiencia energética.

Los países de la UE también han asumido objetivos nacionales vinculantes para incrementar el porcentaje de energías renovables según las situaciones de partida de la producción, como es el caso de Suecia, hasta conseguir el 49% (Ciucci, 2021). En el siguiente capítulo se determinará si han logrado dichos objetivos.

Los siguientes objetivos propuestos actualmente por la Comisión Europea (2021), para conseguir la descarbonización del sistema energético, son más ambiciosos.

- Se quiere reducir las emisiones de GEI al menos un 40% en comparación con 1990.
- Conseguir al menos un 32% de mejora en la eficiencia energética.
- Conseguir al menos el 32% de participación para las energías renovables.

2 ESTADO DEL ARTE

Para realizar este trabajo de fin de grado se han consultado multitud de artículos, libros, informes y páginas web para poder determinar en qué consisten y cómo son los sistemas energéticos español y sueco.

Para determinar la evolución del sector energético español se ha usado principalmente los documentos del profesor M. Lara de la asignatura de Planificación Energética (2021), además de otros artículos (Fano, 2002; Sudriá, 1995). Después se han descrito las principales fuentes de energía de España y se ha analizado el balance energético español. Los datos oficiales de energía más recientes a los que se ha podido tener acceso es la base de datos de Eurostat hasta el año 2019. Con respecto a la electricidad se ha podido consultar el último informe de REE de 2021, que indica los datos de 2020.

Para Suecia, se hará una breve descripción de la evolución del sistema energético y se analizarán las principales fuentes. También se mostrará el balance energético usando la misma base de datos que se ha usado para España.

Finalmente, se describirán como se encuentran España y Suecia en relación a los objetivos europeos de sostenibilidad, la evolución de estos y los planes de futuro.

2.1 El sistema energético en España

2.1.1 Evolución del sector energético español

Desde comienzos de la industrialización, la energía ha sido un factor muy importante para las sociedades hoy desarrolladas.

En España, con la aparición de la máquina de vapor, aumenta el uso del carbón que, junto con la energía hidráulica, son las únicas fuentes energéticas significativas hasta mediados del siglo XIX. A partir del año 1860, aparecen algunos derivados del petróleo, como el queroseno, y desde el 1880, la electricidad comercial.

Durante las dos últimas décadas del siglo XIX, siguió el desarrollo de la industria eléctrica a pesar de tener una importante dificultad. La electricidad era generada en forma de corriente continua y no era posible su transporte a larga distancia (Fano, 2002).

Por otro lado, el abastecimiento del consumo energético español a lo largo del siglo XIX se repartió a partes iguales entre carbón nacional y carbón importado, gracias a la protección arancelaria frente al carbón británico, al que se le añadía un sobrecoste de hasta el 20% para encarecer su importación, sobrecoste energético que tuvo importantes consecuencias para toda la economía española. De igual manera, el consumo de carbón en España era notablemente bajo, como puede verse en la Tabla 1 (Lara, 2021):

País	kg/habitante
Gran Bretaña	4.973
EE. UU.	3.453
Alemania	2.299
Francia	1.265
España	255
Italia	167
Portugal	160

Tabla 1. Consumo de carbón mineral en 1900 (Sudriá, 1987).

Entre el periodo comprendido de 1900 a 1935 el uso del carbón español seguía siendo minoritario, aunque a partir de 1920 se implementa una política arancelaria protectora en la cual obligaban al consumo de carbón nacional a un conjunto de sectores

que recibían ayudas políticas, entre ellos los ferrocarriles y la siderurgia. Como consecuencia de ello, la participación del carbón español en el consumo nacional alcanzó el 80% en los años inmediatamente anteriores a la guerra civil española.

Por otro lado, el uso de la energía eléctrica ha ido aumentando, ya sea debido a la aparición de la corriente alterna que fomentó la construcción a gran escala de centrales hidroeléctricas, de tal manera que, en 1929, el 81% de la producción era de origen hidroeléctrico (Fano, 2002). O gracias a la modernización del transporte, que también fue facilitada por la electricidad haciendo posible la aparición de un nuevo sistema de transporte urbano, el metro, que destacó por comodidad y rapidez. Al mismo tiempo que aparecen también el motor de explosión y con ello los vehículos automóviles empleando gasolina como combustible.

Desde que se inició la guerra civil española hasta 1955, este periodo destaca por la autarquía y miseria energética. En los primeros años, la principal fuente energética seguía siendo el carbón, con más de dos tercios del consumo total, con un 86% cubierto con producción nacional (Lara, 2021).

Por lo que respecta a la electricidad, se produjo un estancamiento de la capacidad de producción, debido a que muchas instalaciones fueron dañadas o incluso destruidas.

Tras la victoria militar de las fuerzas sublevadas, el nuevo régimen político surgido de la contienda sufrió graves dificultades económicas. Destacan las de carácter energético. El primer problema fue el abastecimiento de petróleo, puesto que el estallido de la Segunda Guerra Mundial y el soporte político y económico que el régimen español concedía al llamado Eje Berlín-Roma, destruyó las excelentes relaciones internacionales que durante la Guerra Civil mantuvo el bando rebelde, ahora en el Gobierno de la Nación. Así que tanto los estadounidenses y, en menor medida, los británicos, utilizaron el suministro de petróleo como herramienta de presión sobre el Gobierno de España. En contestación a esta provocación el estado español contesta con la autarquía, llevando al país a situaciones extremas (Lara, 2021).

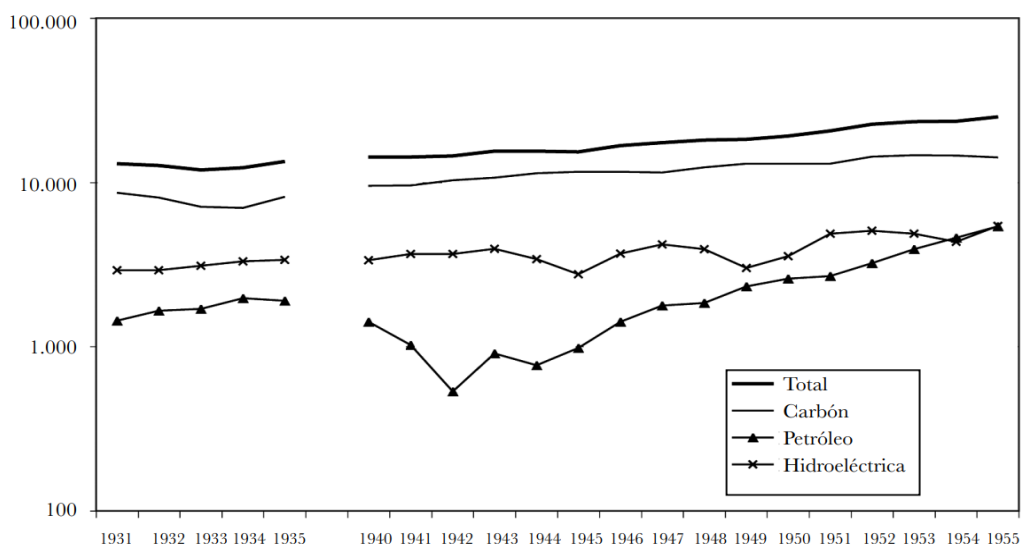


Figura 7. Consumo bruto de energía por fuentes primarias en España, 1931-1955 (Sudriá, 2006).

En 1940, como se ve en la Figura 7 había un consumo cercano al millón de toneladas de derivados del petróleo. Posteriormente comenzó a reducirse hasta llegar a poco más de 350.000 toneladas, no recuperándose hasta 1948, que toma valores iguales a antes de la guerra civil española. El sector del transporte el más afectado durante toda esta etapa.

Desde el punto de vista eléctrico, es en esta época cuando se crean una serie de empresas eléctricas de carácter público como fue la Empresa Nacional de Electricidad, Endesa, en 1944, entre otras. Al mismo tiempo, debido a la necesidad de llevar a cabo una explotación más eficiente, coordinada y racional de los medios de producción y de las redes de transporte a nivel nacional, se crea la empresa Unidad Eléctrica S.A. (UNESA), integrada por las 17 principales compañías del sector. Dicha empresa se encargaba de dirigir la explotación conjunta del Sistema Eléctrico Nacional, decidiendo qué centrales tenían que funcionar en cada momento y qué intercambios de electricidad entre zonas eran necesarios para asegurar el abastecimiento al conjunto del país. Posteriormente se pasó a denominar Repartidor Central de Cargas (RECA) (Fano, 2002).

Finalizada la Segunda Guerra Mundial, las restricciones se relajaron mucho, no obstante, la carencia de divisas continuó restringiendo las importaciones españolas y limitando el crecimiento de la demanda. Cabe destacar también la modificación estructural emprendida, con la reducción de la participación del carbón y el incremento de las de la hidroelectricidad y del petróleo, en este caso vinculado a un crecimiento de la motorización y también a usos termoeléctricos. El grado de autoabastecimiento se reduce significativamente, ante la incapacidad de oferta de seguir el crecimiento de la demanda (Lara, 2021).

El intenso crecimiento económico dio lugar a un fortísimo incremento de la demanda de energía. Téngase en cuenta que el consumo bruto de energía primaria tuvo un crecimiento medio anual de 6,9%, pasando de 25 a 82 Mtep/año (de 1955 a 1973).

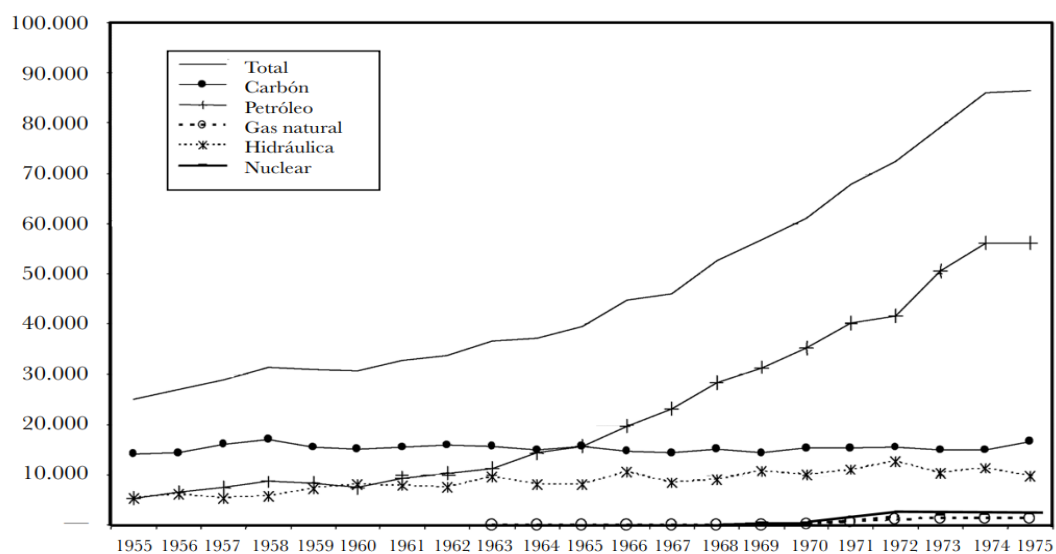


Figura 8. Consumo bruto de energía primaria en España, 1955-1975 (Sudriá, 2006).

Para dar cobertura a este aumento de la demanda fue necesario realizar un enorme esfuerzo financiero y técnico. La potencia instalada pasó de 4.129 MW en 1955 a 25.467 MW veinte años más tarde, un incremento anual de 9,5%. En el ámbito del refino de petróleo, la expansión no fue a menos. En 1955 había en España dos refineries con una capacidad de refino de 2,1 millones de toneladas, en 1975 eran nueve las instalaciones en funcionamiento y la capacidad de refino alcanzó un incremento anual de 18,4% (Sudriá, 2006).

En la Figura 8, se puede ver el enorme incremento del petróleo, esto es debido sobre todo a los motores móviles. La participación en la producción de electricidad aumenta del 3,2% en 1960 al 32,9% en 1973.

A finales de 1973, la cuarta guerra árabe-israelí provocó un aumento sin precedentes en los precios internacionales del petróleo, poniendo fin a la "era del

petróleo”. Entre las alternativas posibles, España, continuó incrementando el consumo de petróleo mientras que otros países lo disminuían. Los precios reales interiores del fuel-oil aumentaron en un 20% entre 1973 y 1977, mientras que los costes de adquisición del crudo lo hacían en un 150%.

En 1975, se crea el Primer Plan Energético Nacional (PEN-75), donde por primera vez se contempla el sector energético español, aunque este plan nunca llegó a aplicarse. En estas circunstancias, el Gobierno surgido de las primeras elecciones democráticas propició la firma de un amplio acuerdo -los Pactos de la Moncloa (1977)- cuyo principal objetivo era detener el deterioro acelerado de la economía española. Posteriormente, se crea el PEN-77 que nunca llega a aplicarse y el PEN-78 que estuvo 3 años en ejecución (Lara, 2021).

Debido a que no se han aplicado en ningún momento alguna medida de ahorro, la energía procede de fuentes primarias mal distribuidas. El resultado de tal evolución sigue siendo un elevado contenido energético en el producto interior bruto español, agravando de manera decisiva el impacto de la depresión internacional sobre la economía española.

Después de la victoria del Partido Socialista Obrero Español (PSOE) en las elecciones generales de octubre de 1982, se congela las actuaciones previstas en el PEN en vigor, creándose el Plan Energético Nacional (PEN-83) con fines de mejora de la eficiencia energética, optimización de los recursos y una reducción de la vulnerabilidad del abastecimiento energético español.

En la Tabla 2 se presenta una parte del Plan Energético Nacional de 1983. En la primera columna se sitúa cada una de las fuentes primarias. En la segunda se muestra las cifras-objetivo reflejadas en el PEN-83 y, por último, el balance real de 1992. Se puede observar que a pesar de que se proyectaba un resultado con menor demanda de petróleo, el balance real indicaba unos resultados superiores.

Horizonte	PEN-83		Balance real	
	Año 1992		Año 1992	
Demanda objetivo de energía primaria:	Mtep	%	Mtep	%
		95,03	100,0	99,61
Petróleo	44,76	47,1	53,67	53,9
Carbón	23,95	25,2	20,88	21,0
Gas natural	4,37	4,6	5,93	6,0
Hidroelectricidad	10,74	11,3	1,63	1,6
Nucleoelectricidad	11,21	11,8	13,59	13,6
Otras	-	-	3,84	3,9
Saldo eléctrico	-	-	0,06	0,1
Producción de electricidad en barras alternador	GWh	%	GWh	%
	147.541	100,0	161.105	100,0
Hidráulica	40.430	27,4	20.032	12,4
Carbón	62.320	42,2	68.363	42,4
Fuelóleo	3.821	2,6	11.842	7,4
Nuclear	40.970	27,8	55.782	34,6
Gas natural	-	-	1.963	1,2
Autoproducción	-	-	2.482	1,5
Importación	-	-	641	0,4

Tabla 2. Plan Energético Nacional de España, 1983-1992 (Lara, 2021).

A pesar del intento de disminución de la dependencia del petróleo, la presión de la oferta con la consiguiente reducción de precios modificó la orientación de los mercados y no se consiguió reducir la participación del petróleo en la cobertura de la demanda de energía primaria en el balance energético español.

Mientras el precio del petróleo continúa su descenso, 1994 es el año cuando la economía española inicia su reactivación, la inflación cede y el producto interior bruto crece, a la vez que el paro comienza su retroceso.

La incorporación de pleno derecho a la Unión Europea, junto con los avances en la liberación del mercado de la energía, supone el principio del fin de la planificación energética en España. Se crea la Comisión Nacional de Energía (CNE) como ente regulador del funcionamiento de los sistemas energéticos en España. Se configura como un organismo público con personalidad jurídica y patrimonio propio, adscrita al Ministerio de Industria y Energía, con plena capacidad de obrar (Lara, 2021).

Entrando en los años 2000 (Figura 9), se aprecia un continuado crecimiento del consumo de energía hasta el 2008, que hay un descenso pronunciado. En el influyen varios factores, como la caída de la demanda de petróleo y carbón en el mercado o la crisis económica. El consumo de energía primaria baja un 3,1% respecto al del año anterior. Esta evolución vino acompañada de la continuidad del aumento de los precios de las energías primarias en los mercados internacionales en el primer semestre y de la fuerte caída en el segundo.

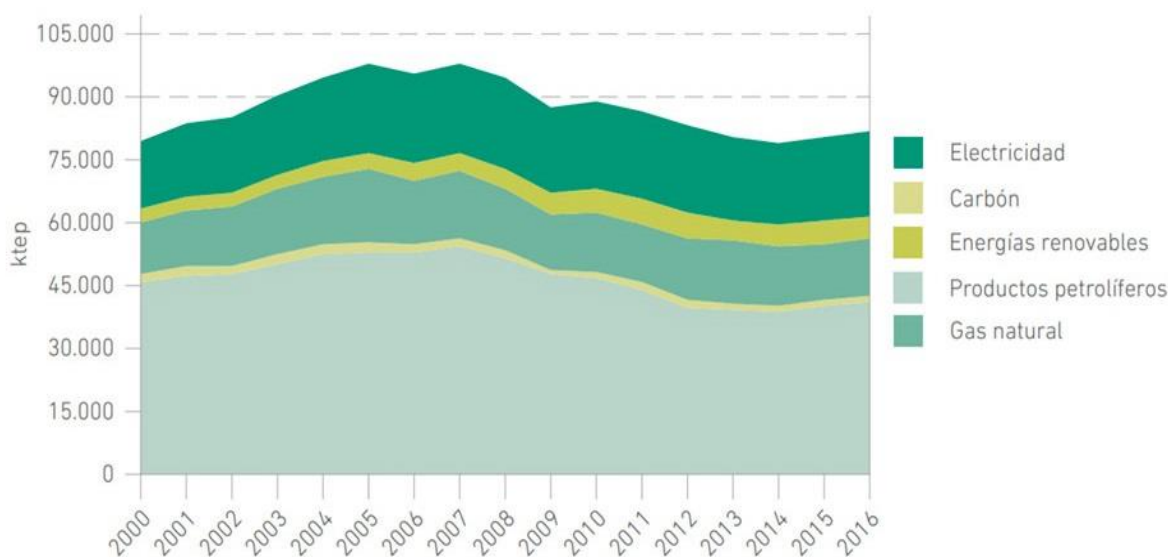


Figura 9. Evolución del consumo de energía final en España, 2000-2016 (IDAE, 2017).

Como consecuencia de lo indicado, en el 2008 mejoraba significativamente la eficiencia energética bajando un 4% la intensidad final y un 4,7% la intensidad primaria sobre el PIB. Esta evolución es similar a las de los países desarrollados y deriva de las políticas energéticas de apoyo a la eficiencia energética, al desarrollo de las energías renovables y a la generación con gas en ciclo combinado, de alto rendimiento relativo.

A lo largo del año 2014, la IEA realiza una revisión en profundidad de las políticas energéticas de España. Un equipo oficial compuesto por expertos visita el país y preparan un informe en el que describe la situación de la política energética, su evolución desde la última revisión y se sugieren una serie de recomendaciones y críticas para conseguir los objetivos propuestos por la UE.

En materia de interconexiones eléctricas y gasistas, la IEA considera necesario que España incremente su nivel de interconexiones con el resto de la UE, especialmente con Francia, a fin de fomentar la integración de mercados, mejorar la seguridad de suministro y facilitar la integración de energía renovable. Durante el 2014 apenas representaba un 1,27% de la demanda generada (REE, 2014).

En cuanto a la eficiencia energética, el informe recomienda que España desarrolle una estrategia a largo plazo, centrada sobre todo en la gestión de la demanda y la mejora de la eficiencia energética, que permita alcanzar los objetivos de energía y clima de la UE para 2030, así como desarrollar incentivos para favorecer la reducción de emisiones y la transición hacia una economía de bajo carbono. Destaca la puesta en marcha en julio del 2014 del Fondo Nacional de Eficiencia Energética como una importante fuente de financiación para el desarrollo de acciones en esta materia.

2.1.2 Principales fuentes de energía de España

2.1.2.1 Petróleo y derivados

Según las estadísticas anuales de la Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos (CORES, 2021), el petróleo y sus derivados constituyen la mayor parte de la energía consumida en España.

Durante el 2020 pese al descenso de su consumo (-18,5%), representa el 40,8% de la energía total consumida. El queroseno fue el producto más afectado, ya que tras seis años de máximos anuales disminuye un 65,1% frente a 2019 y con 2,42 millones de toneladas de crudo (Mt) retrocede a niveles del año 1987 que se consumieron 2,43 Mt (CORES, 2021). En la Tabla 3 se puede observar los demás descensos en el consumo de los productos del petróleo que en gran medida esta situación se debe a la pandemia generada por el COVID-19.

Unidad: toneladas

	2019		2020		Tv (%) 2020/2019
	Consumo	Estructura (%)	Consumo	Estructura (%)	
GLP	2.429.477	4,1	2.092.400	4,3	-13,9
Gasolinas	5.385.452	9,0	4.253.756	8,7	-21,0
Querosenos	6.920.703	11,6	2.417.937	5,0	-65,1
Gasóleos automoción	23.457.983	39,2	19.534.139	40,1	-16,7
Otros gasóleos	8.108.533	13,6	9.007.872	18,5	11,1
Total gasóleos	31.566.516	52,8	28.542.010	58,6	-9,6
Fuelóleos	8.242.883	13,8	5.789.046	11,9	-29,8
Otros productos	5.259.230	8,8	5.623.941	11,5	6,9
Total	59.804.262	100,0	48.719.091	100,0	-18,5

Tabla 3. Consumos productos petrolíferos en España en 2020 y 2019 (CORES, 2021).

El consumo de los productos petrolíferos en 2019 se centró en el sector transporte, representando un 78% del total. Este sector agrupa el consumo de los combustibles utilizados por carretera, ferrocarril, aviación nacional e internacional y navegación doméstica, independientemente del sector en el que se desarrolle la actividad (Eurostat 2021).

Aunque en España existen yacimientos de petróleo, su producción en 2020 supone menos del 0,6% de su consumo, por lo que necesita recurrir a la importación. En 2020 se importó un total de 54,8 Mt. Los principales suministradores de crudo a España han sido Nigeria y México, suponiendo 19,8% y 15,4% respectivamente (CORES, 2021).

La Compañía Logística de Hidrocarburos (CLH) es la encargada de conectar ocho de las diez refinerías de la península que producen derivados líquidos del petróleo a través de 4.020 kilómetros de oleoductos, 39 instalaciones de almacenamiento y 37 instalaciones aeroportuarias (Figura 10). A mayores hay un doble oleoducto propiedad de Repsol que conecta las refinerías de Cartagena y Puertollano (Exolum, 2021).

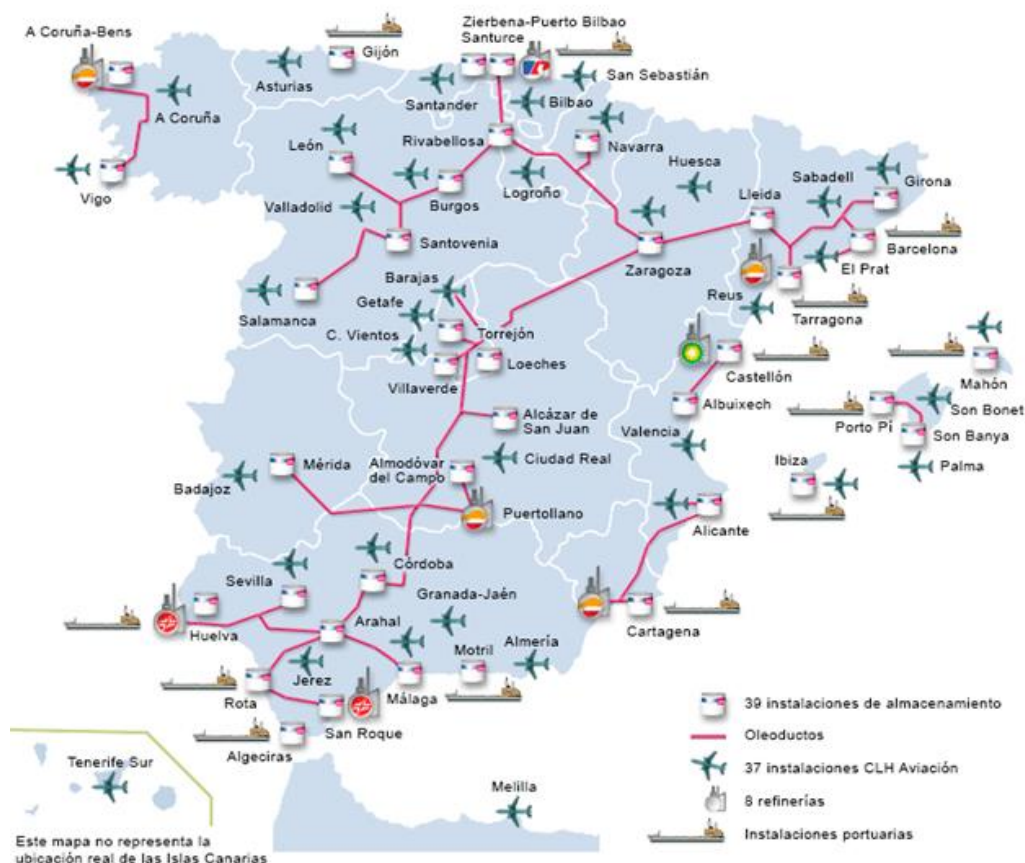


Figura 10. Red española de oleoductos. Infraestructura logística del Grupo CLH (Exolum, 2021).

Desde el punto de vista económico el precio del petróleo, tras la caída durante la pandemia, está aumentando tal como se puede observar en la Figura 12 (Expansión, 2021).

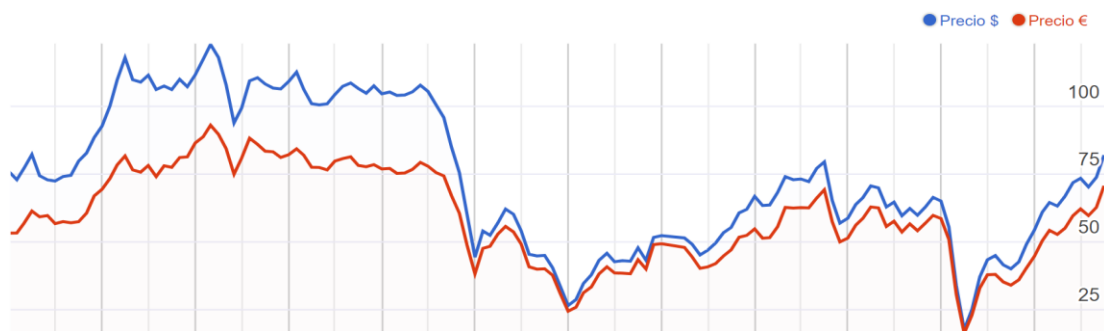


Figura 11. Evolución del precio del petróleo OPEP de 2010 a 2021 (Expansión, 2021).

2.1.2.2 Gas natural

En el último año (2020) cubrió 358.720 GWh de la demanda de consumo, que son 39.496 GWh menos que en 2019. Gran parte de esta bajada ha sido en la generación eléctrica. Aun así, el gas natural fue la segunda fuente de energía más consumida en España, 25,3% (CORES, 2021).

Desde 1985 al 2000 el consumo creció principalmente debido al incremento del uso de gas natural en procesos industriales, acompañado por un crecimiento gradual del

consumo de gas natural en los hogares. Desde 2002 y hasta el 2008, el consumo se aceleró, como consecuencia de la instalación de ciclos combinados de gas natural. Hubo un descenso durante la crisis de 2008, pero pronto se recuperó y siguió su crecimiento (Naturgy, 2021).

Igual que en el caso del petróleo, España es un país pobre en gas natural, necesitando recurrir a importaciones, como se muestra en la Tabla 4. El principal importador durante el 2020 fue Argelia con un 29%, seguido por EE. UU. con un 16% y Nigeria con un 12% (CORES, 2021).

Unidad: gigavatio hora

	2018	2019	2020
Producción interior	1.070	1.603	644
Importaciones GNL	167.016	240.873	228.959
Importaciones GN	224.423	177.463	136.267
Total	392.509	419.939	365.870

Tabla 4. Producción e importaciones de gas natural de España, 2018-2020 (CORES, 2021).

La red básica del sistema se compone de 13.361 km de gasoductos, 19 estaciones de compresión además de centros de transporte, estaciones de regulación y medida y puntos de conexión a la red. La red de transporte y distribución del sistema supera los 94.000 km. Los municipios con suministro de gas natural están aumentando año tras año, habiendo 1.811 municipios (6 más que en 2019) (Engas, 2014).

En la Figura 12 se muestra la distribución del consumo de gas en función de los sectores. El más demandante ha sido el sector industria, seguido por el residencial.

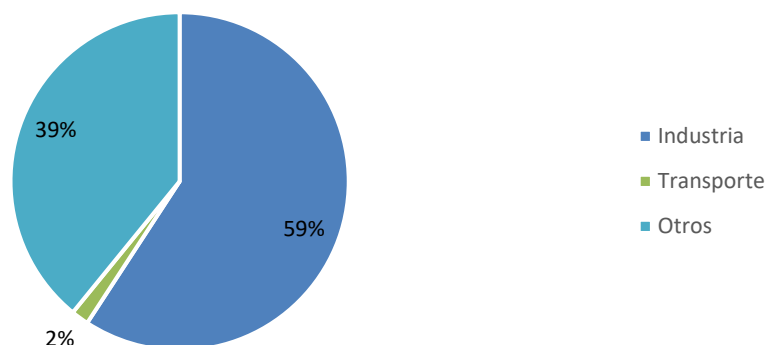


Figura 12. Distribución de consumos de gas natural en España en 2019 (Eurostat, 2019).

Desde el punto de vista económico diferenciamos 3 tarifas TUR 1, TUR 2 y TUR 3, que son los peajes de acceso como se muestra en la Tabla 5 actualizados el día 1 de octubre de 2021, aunque esto sólo no marca el precio final. El precio del kWh dependerá también de la comercializadora (BOE, 2021). En el 2020 hubo una reducción, pero el precio vuelve a crecer (Selectra, 2021).

Tarifa	Consumo (kWh/año)	Tipo de consumidor	Tarifa Fija (€/cliente)/mes	Tarifa Variable cent/kWh
TUR 1	- 5.000	Sin calefacción	5,44	4,469191
TUR 2	5.000 - 15.000	Con calefacción	10,23	4,127554
TUR 3	+ 15.000	Grandes cargas	21,99	3,872565

Tabla 5. Precios sin impuestos de la tarifa TUR que están en vigor (BOE, 2021).

2.1.2.3 Carbón

Hubo un tiempo, dónde la minería era considerada la principal fuente de energía. Empleaba a más de 44.000 personas en los años 90, pero en 2019 empleaba a menos de 3.000 personas (Delgado, 2019).

La producción de carbón en España se centraba en la zona de Asturias, León, Palencia y Ciudad Real, con hulla y antracita. A mayores también se extraía de Teruel, lignito negro (CARBUNION, 2015).

Pero en la actualidad ya no se extrae carbón en territorio español. Sino que el poco que se consume, es importado, principalmente de Indonesia.

Y a diferencia de las fuentes anteriores expuestas, España tiene reservas de carbón. Según el último informe Statistical Review of World Energy (2021), al final del 2020 había un total de 1187 millones de toneladas.

El motivo de este cambio no radica sólo en el uso de este mineral, es decir, en las emisiones asociadas a su uso. El motivo del cierre de las centrales de carbón reside en los altos precios de los derechos de emisión de CO₂ y de la doble imposición del Estado aplicando el céntimo verde por emisión de gases de efecto Invernadero (GEI).

En las centrales se podrían hacer una serie de inversiones para poder hacer frente a las normas de emisión de gases contaminantes, añadiendo sistemas de abatimiento de gases derivados del nitrógeno y mejoras en los filtros de partículas. Pero es más rentable cerrar directamente.

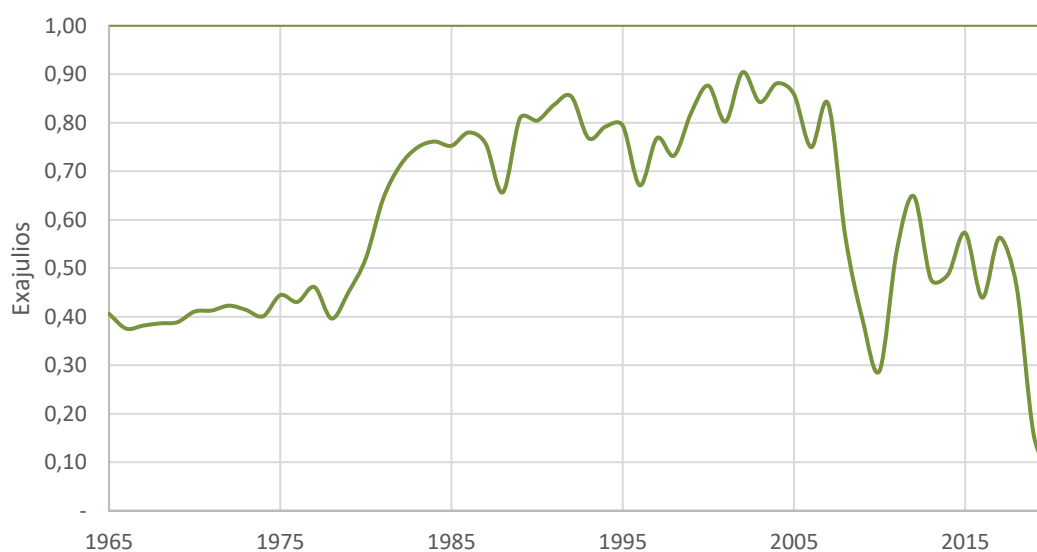


Figura 13. Evolución del consumo de carbón en España, 1965-2020 (BP, 2021).

A partir de 2010 comenzó el cierre de las centrales térmicas de carbón en España. Como se observa en la Figura 13 hay un rápido descenso. Según el informe anual de la REE, el 1 de diciembre de 2011, había 20 centrales térmicas. El objetivo es el cierre total. Hoy en día sólo quedan las de EDP Energía, la central térmica de Aboño y central térmica de Soto de Ribera. Hay otras, como ha sido el caso de la central de As Pontes, que había dado ya su cierre, pero se ha estado activando para poder dar apoyo a la red eléctrica. Se tiene previsto el cierre total para 2025.

En 2019 sólo el 0,5% de la energía consumida provenía de los combustibles fósiles sólidos. El uso del carbón se divide entre el sector industrial (70%) y otros sectores (30%). Aunque no llega a cubrir ni el 0,6% de la demanda total de energía española (Eurostat, 2021).

2.1.2.4 Nuclear

Actualmente hay 7 centrales nucleares activas, en 5 emplazamientos (Figura 14). Todas son del tipo PWR, es decir, es un reactor de agua a presión. Tienen una capacidad total de 7121 MW netos y genera cada año entre 55.000 y 60.000 GWh (IAEA, 2021).

Las centrales nucleares garantizan el suministro eléctrico las 24 horas todos los días del año, a excepción de los días de recarga, que suelen parar durante un mes.

En 2020, según el último informe de REE de 2020, la energía nuclear ha generado un total de 55.757 GWh, que equivale al 22,3% de la energía total demandada.

En 2019, representó el 43,5% de la producción primaria y cubrió el 21% de la demanda de energía eléctrica (Eurostat, 2019).

Actualmente hay dos centrales nucleares en desmantelamiento (Vandellós I y José Cabrera) y una más en proceso de pre-desmantelamiento (Santa María de Garoña, que cerró en 2017). La gestión de desmantelamiento de las instalaciones nucleares la realiza la Empresa Nacional de Residuos Radioactivos (Enresa).

El futuro de la energía nuclear en estos momentos es mantener en operación el parque nuclear español en el largo plazo siempre con las máximas garantías de seguridad. El periodo de funcionamiento de una central no tiene plazo fijo y solo el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) tiene potestad para limitarla por motivos de seguridad. Las autorizaciones de explotación concedidas en los últimos años se renuevan tras la evaluación del CSN y la aprobación del Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Foro Nuclear, 2021).

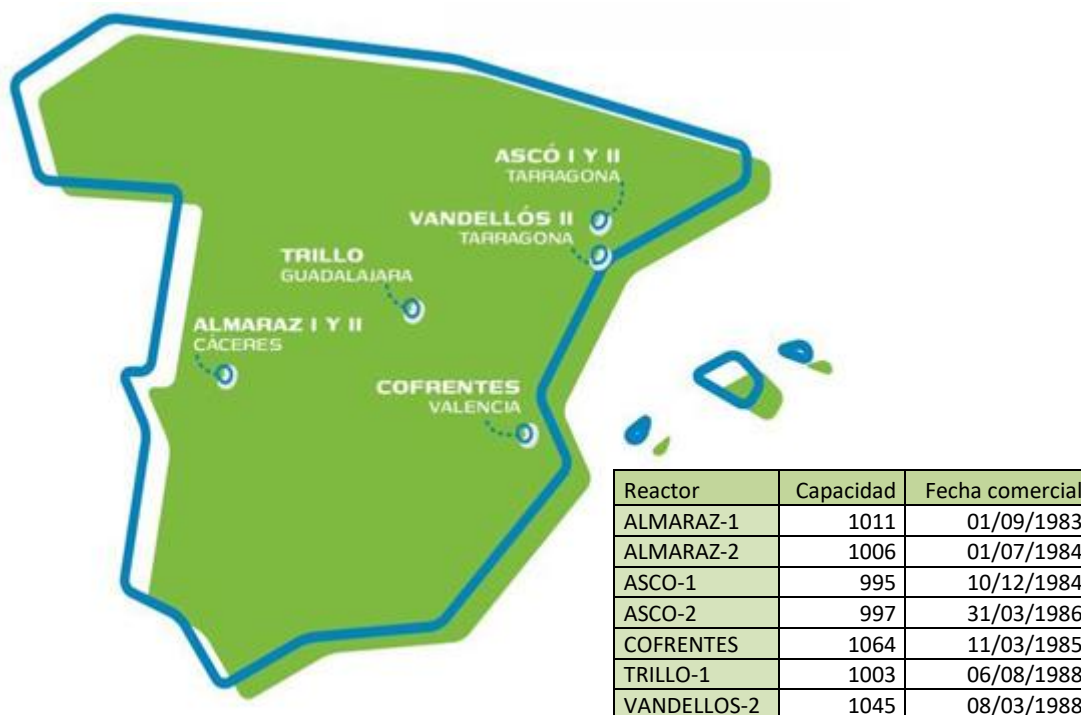


Figura 14. Centrales nucleares de España (Foro Nuclear, 2021).

Aunque el gobierno español ha planificado el apagón nuclear y la última central nuclear española permanecerá activa hasta 2035 (MITECO, 2021).

Hay que tener en cuenta que la energía nuclear tiene un rol esencial en la mitigación del efecto invernadero. Que como se verá más adelante si es cierto que España tiene

un gran potencial eólico y solar, pero no siempre hay sol y viento. Además, no hay la capacidad a gran escala para almacenar esas energías. Así que es necesario tener un respaldo que sea bajo en emisiones y la energía nuclear es la única disponible que sea capaz de hacer esta función.

2.1.2.5 Fuentes Renovables

Las energías renovables son fuentes de energías inagotables y crecientemente competitivas. La evolución de este tipo de fuente ha sido creciente hasta mediados de la década de 2010, aunque nuevamente está creciendo (Figura 15).

El desarrollo de estas fuentes es uno de los aspectos claves de la política energética nacional. Ya sea porque contribuyen eficientemente en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero o porque disminuye la dependencia a los productos petrolíferos y diversifica las fuentes de suministros autóctonos.

El gobierno acaba de publicar en el BOE el Real Decreto 477/2021, de 29 de junio, en el que se aprueba la concesión directa a las comunidades autónomas y a las ciudades de Ceuta y Melilla de ayudas para la ejecución de diversos programas de incentivos ligados al autoconsumo y al almacenamiento, con energías renovable.

El 55,2% de la producción primaria en 2019 fue de origen renovable. De la energía consumida final, tan sólo ha representado el 18,2% y un 38% de la electricidad producida ha sido de origen renovable (Eurostat, 2021).

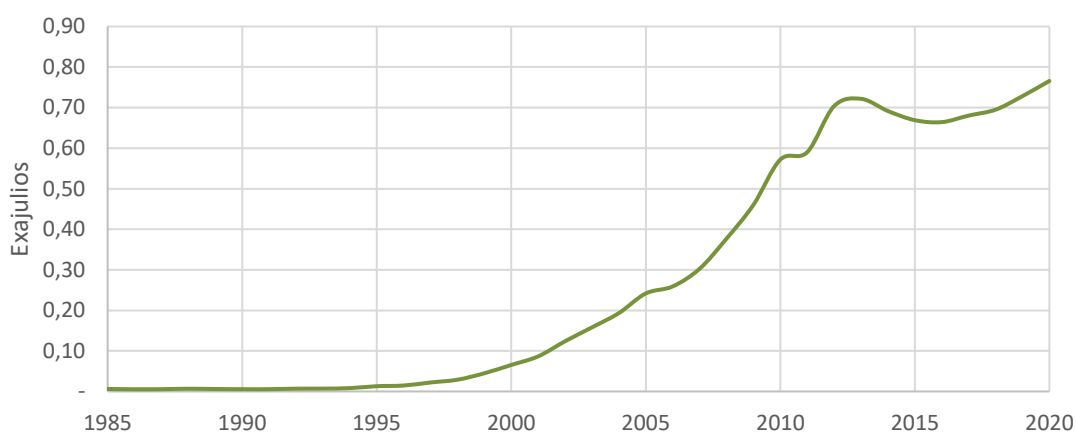


Figura 15. Evolución de las energías renovables en España (BP, 2020).

Durante el 2020, REE (2021), publica que las energías renovables han aumentado la generación eléctrica con respecto al 2019, alcanzando a cubrir una demanda del 43,5% de electricidad, se ha tenido en cuenta la producción de turbinación de bombeo, tanto de bombeo puro como una estimación de bombeo mixto, y se ha restado los consumos de bombeo. Las fuentes renovables (Figura 16) más importantes en España son la eólica, la hidráulica y la solar fotovoltaica (REE, 2021).

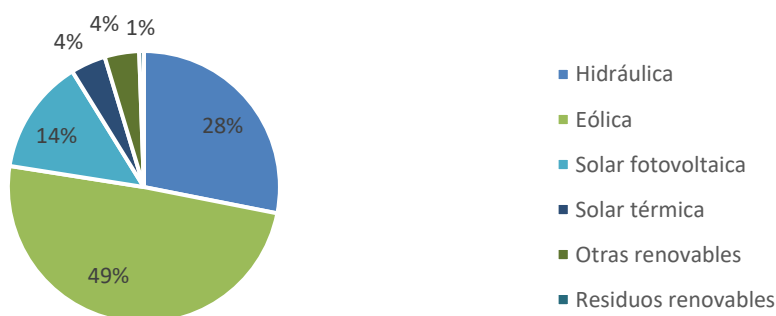


Figura 16. Distribución de las fuentes de energía renovable España, 2020 (REE, 2021).

2.1.2.5.1 Eólica

España es el quinto país del mundo por potencia eólica instalada, tras China, EE. UU., Alemania e India. Con 27.446 MW de potencia instalada, la energía eólica ha generado 53.645 GWh durante el 2020, lo que supone que es la segunda fuente de generación eléctrica que ha cubierto el 21.9% de la demanda de electricidad (Wind Europe, 2021).

En 2020 España ha sido el 4 país de la UE de nueva potencia instalada (1.720 MW). Según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, el objetivo es tener instalados 50.333 MW en 2030 (MITECO, 2021).

Actualmente hay instalados 1.265 parques eólicos en más de 1.000 municipios. Siendo la comunidad de Castilla y León la que más potencia acumulada tiene.

Desde el punto de vista medioambiental, la eólica evita la emisión de 29 millones de toneladas de CO₂.

2.1.2.5.2 Solar fotovoltaica

A junio de 2021 hay instalados 12.120 MW con un total de 62.281 instalaciones en funcionamiento, siendo las comunidades de Andalucía y Extremadura con mayor potencia instalada. En 2020, la energía solar fotovoltaica ha cubierto el 6% de la demanda total de electricidad.

Según el diario El País, para el día 23 de enero de 2021, España tenía la mayor instalación fotovoltaica de Europa y está en Extremadura. Se trata de la megaplanta Nuñez de Balboa, de 500 MW y es tan grande como la ciudad de Badajoz.

En el informe de la IEA, España se sitúa en 2020 como el tercer país de la UE en nueva potencia instalada (2,8GW) y también acumulada. Además, de ser el sexto país en el ranking mundial (Tabla 6).





















Capacidad instalada anual (GW)			Capacidad acumulada (GW)				
1		China	30,1	1		China	204,7
2		EE. UU.	13,3	2		EE. UU.	75,9
3		India	9,9	3		Japón	63
4		Japón	7,0	4		Alemania	49,2
5		Vietnam	4,8	5		India	42,8
6		España	4,4	6		Italia	20,8
7		Alemania	3,9	7		Australia	14,6
8		Australia	3,7	8		Reino Unido	13,3
9		Ucrania	3,5	9		Corea	11,2
10		Corea	3,1	10		Francia	9,9

Tabla 6. Top 10 países por capacidad instalada anual y total en 2019 (IEA, 2021).

Según el PNIEC, el objetivo es de llegar a los 39.181 MW de solar fotovoltaica para 2030. Esto supondrá alrededor de 20.000 millones de euros en inversiones.

La Asociación Nacional de Productores de Energía Fotovoltaica (Anpier, 2020), afirma que el autoconsumo de fotovoltaica está en auge gracias a las políticas de promoción y fomento de este tipo de generación. Como fue la aprobación en la primera instancia del Real Decreto – Ley 15/2018 y posteriormente del Real Decreto 244/2019, que marca un nuevo escenario para el desarrollo del autoconsumo y más recientemente, el Real Decreto 1183/2020 que regula los permisos de acceso y conexión. En el último año se han instalado 596 MW de autoconsumo, que es un 30% más que en 2019.

2.1.2.5.3 Hidráulica

La energía hidráulica representó el 26% de la energía renovable demandada en 2020 (REE, 2021).

Hace mucho tiempo casi la totalidad de la energía eléctrica que se producía en España era de origen hidráulico. En 1960 la proporción de hidroeléctrica era del 84% de la producción eléctrica. Pero rápidamente descendió, en 1970 supuso el 50% de la producción total, a pesar de que durante esos años se produjo un gran desarrollo hidroeléctrico (Fano, 2002).

En España existen más de 1300 centrales hidráulicas. La gran mayoría de ellas, 1200, son de la categoría minicentrales y tan sólo representan poco más del 12% de toda la producción de energía hidráulica. Mientras que las centrales hidroeléctricas convencionales representan alrededor del 88%. Las comunidades autónomas españolas que producen mayor energía hidráulica son Castilla y León, Galicia y Cataluña (Villasur, 2021).

La producción hidroeléctrica anual en España es muy variable y depende en gran medida de la hidraulicidad. Con hidraulicidad se entiende por la disponibilidad de recurso hidráulico para la generación de energía eléctrica. Como se puede ver en la Figura 17 el consumo ha sido muy variable.

Según el PNIEC (2021), estiman un pequeño crecimiento. De los 14.109 MW instalados actualmente se quiere alcanzar los 14.609 MW.

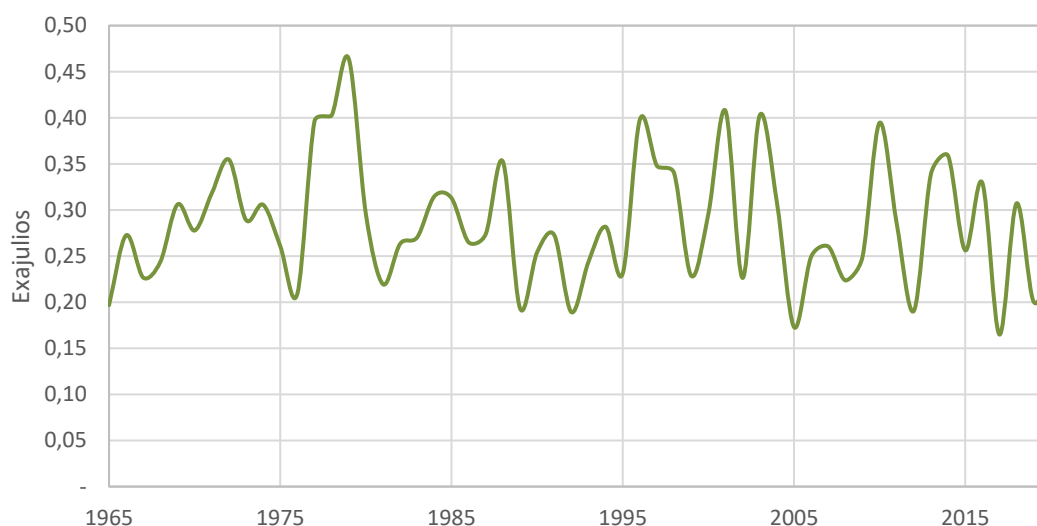


Figura 17. Evolución del consumo de la energía hidráulica en España (BP, 2021).

2.1.2.5.4 Otras fuentes

El 9% restante de la demanda de electricidad procedente de energías renovables está cubierto mayormente por la solar térmica (4,2%) y biomasa (4,1%). El resto es generado por las energías procedentes de las mareas, los biocombustibles y el desecho renovable urbano (Eurostat, 2021).

Solar Térmica

España ha sido el cuarto país europeo por superficie instalada anual de energía solar térmica durante los últimos 2 años. En 2020 se estima que se han instalado 190.650 m² (Euroserv'er, 2021).

Según el PNIEC (2021), se prevé un gran crecimiento. A partir de los 2.303 MW actuales se quieren alcanzar los 7.303 MW.

Biomasa

Con respecto a la biomasa, España tiene abundantes recursos de biomasa y capacidad para contribuir sustancialmente a los objetivos de políticas medioambientales y socioeconómicos. Es el tercer país europeo por recursos absolutos de biomasa forestal (sólo por detrás de Suecia y Finlandia).

A pesar de estar en esta situación, España se encuentra a la cola en el ranking europeo por aprovechamiento de los recursos forestales y agroganaderos en la generación de energía eléctrica, térmica biogás/biometano y valorización de la fracción orgánica de los residuos municipales (Gregorio, 2019).

Actualmente hay disponibles 677 MW y para 2030, según el PNIEC (2021), el objetivo es tener 1.408 MW.

El resto de las fuentes renovables como se ha mencionado anteriormente sólo han representado el 1%. Esto es debido a que son tecnologías que aún están en desarrollo y que poco a poco irán creciendo. Aunque no será a corto plazo.

2.1.3 Balance energético español

En 2019, la energía bruta disponible era de 134.155,4 ktep, que tras las transformaciones quedó un total de 86.287,4 ktep disponible y de los cuales se consumen 81.512,9. En la Figura 18 se puede observar la evolución de la energía final consumida por fuente desde 1990 hasta 2019. En los últimos años se aprecia un leve crecimiento (Eurostat, 2021).

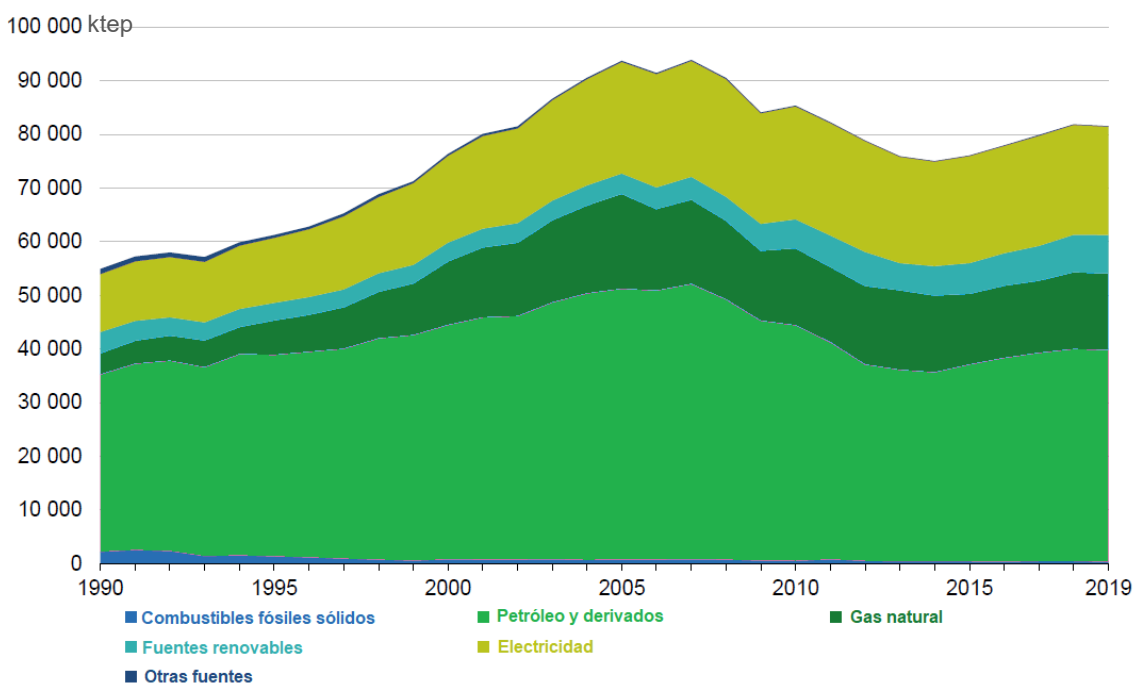


Figura 18. Consumo final de energía por fuente en España, 1990-2019 (Eurostat, 2021).

La energía es necesaria en cualquier actividad. A lo largo de este proyecto se van a distinguir 3 grandes grupos, aparte de la energía no usada.

- **Sector industrial.** Se incluyen cualquier tipo de actividad industrial como las industrias de hierro y acero, química y petroquímica, metales no ferrosos, minerales no metálicos, equipo de transporte, maquinaria, minería y explotación, alimentos, bebidas y tabaco, construcción, etc.
- **Sector transporte.** Están incluidos los medios de transporte por carretera, aire y mar, incluyendo el transporte por tubería.

- **Otros sectores.** Dentro de este grupo se engloban varios sectores, los principales son:
 - Comercial
 - Residencial
 - Agricultura y forestal
 - Pesca

La energía que emplean cada uno de los sectores, es la energía secundaria, o también denominada energía final. Es resultado de la energía primaria tras las transformaciones necesarias para que pueda ser usada. Dentro del balance se va a diferenciar entre las siguientes:

- Derivados del petróleo
- Gas natural
- Renovables
- Electricidad
- Otros, en este apartado se incluyen el resto de las fuentes como los combustibles fósiles sólidos, la turba y derivados, el desecho no renovable y los gases fabricados.

Como se observa en la Figura 19, sector transporte es el que más demanda, seguido por otros sectores, y por último el industrial.

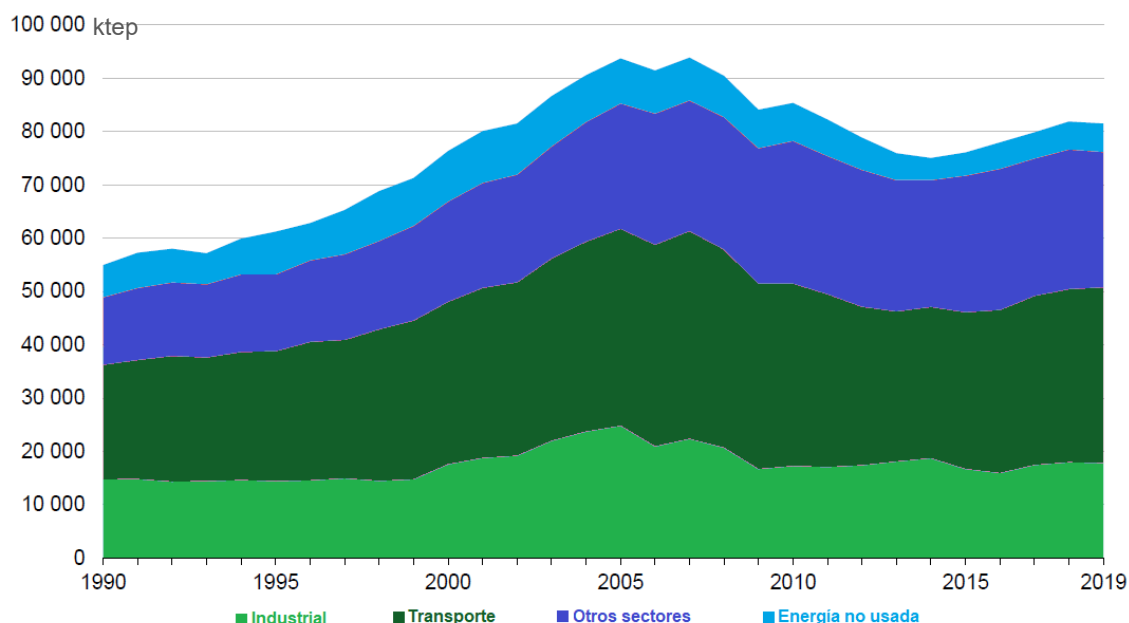


Figura 19. Energía final por sectores en España, 1990-2019 (Eurostat, 2021).

Teniendo en cuenta las cifras de 2019 aportadas por la base de datos de Eurostat, se puede obtener la distribución de uso de cada fuente en cada sector.

Industrial

A lo largo del año 2019, se ha demandado un total de 19.969,3 ktep. Los combustibles sólidos fósiles fueron los que cubrieron el 62,7% de esta demanda, Figura 20 (Eurostat, 2021).

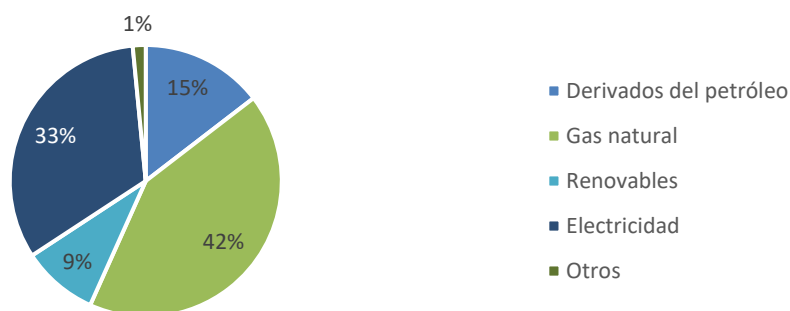


Figura 20. Energía final en el sector industrial en España, en 2019 (Eurostat, 2021).

Transporte

A lo largo del año 2019, ha sido el sector que más energía ha demandado con un total de 32.940,4 (40%). La fuente más demandada en este sector fueron los derivados del petróleo, Figura 21 (Eurostat, 2021).

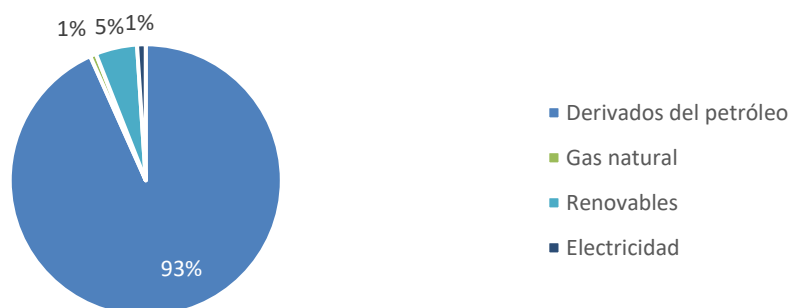


Figura 21. Energía final en el sector transporte en España, en 2019 (Eurostat, 2021).

Otros sectores

En este apartado se engloban el resto de las actividades que no sean ni industriales ni transporte. Han demandado el 35% de la energía total, Figura 22 (Eurostat, 2021).

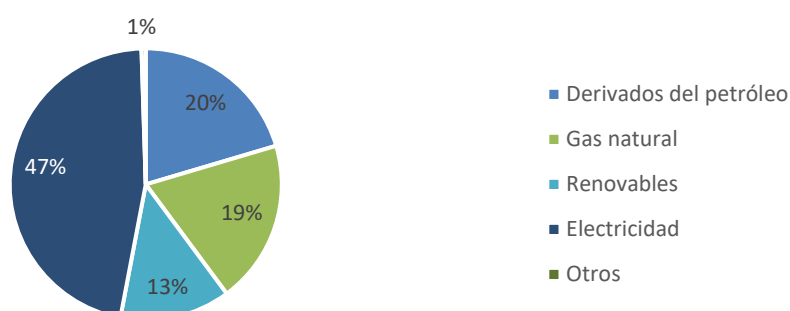


Figura 22. Energía final en los otros sectores en España, en 2019 (Eurostat, 2021).

En la Figura 23 se puede observar dos cosas. En primer lugar, qué sector es el que más demanda. Con más del 50% el residencial es el que más consume dentro de Otros sectores, seguido por el comercial. Lo segundo que se puede comprobar es qué energía secundaria demandan más. Tanto en el residencial como en el comercio, lo que más se demanda es electricidad, seguido por las fuentes renovables en el caso del sector comercio y en el residencial, el gas natural y las energías renovables se demandan prácticamente igual. (Eurostat, 2021).

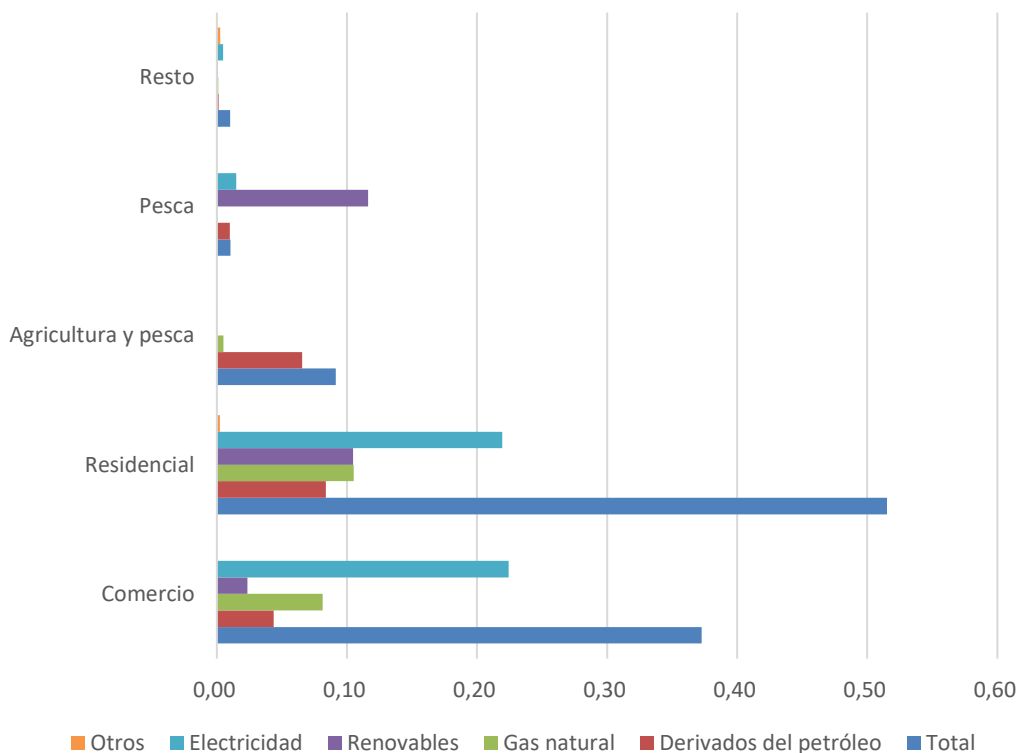


Figura 23. Energía final de cada sector en España en 2019 (Eurostat, 2021).

Por último, se muestra la demanda de energía eléctrica por fuente durante el año 2020, Figura 24. Partiendo de que la potencia instalada en España en 2020 fue de 110.839 MW, siendo 54% de instalaciones de energía renovable. Se han generado un total de 249.991 GWh de los cuales 110.566 MWh son de origen renovable (45%). Es importante destacar que los intercambios de energía eléctrica con otros países han aumentado un 5,4% respecto al año anterior. Se ha exportado 13.507 GWh y se han importado 16.807 GWh (REE, 2021).

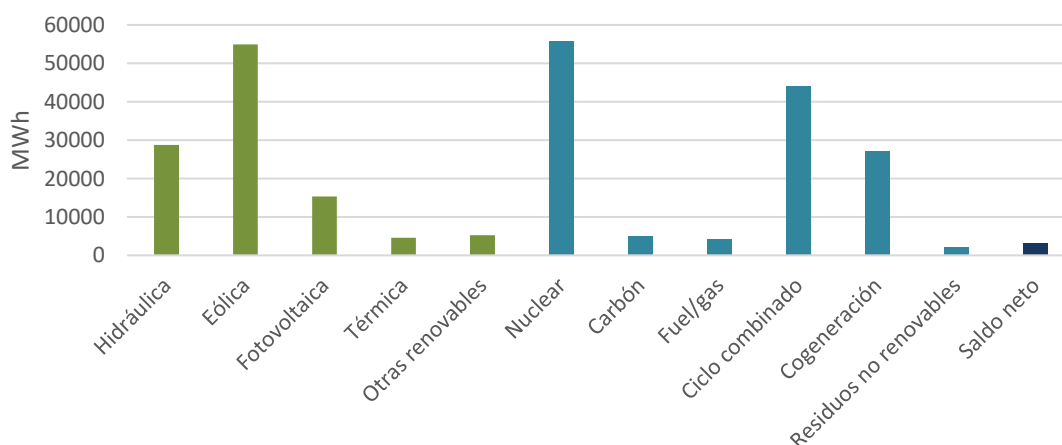


Figura 24. Demanda de energía eléctrica en España durante el 2020 (REE, 2021).

2.2 El sistema energético en Suecia

2.2.1 Evolución del sector energético sueco

Iniciada la era de la industrialización, Suecia, al igual que en España, comienza con el aumento del consumo de carbón. Los suecos intentaron utilizar madera para las locomotoras, pero llegaron a la conclusión de que era inviable. La densidad del carbón es aproximadamente el doble que la de la madera, por tanto, ocuparía mucho espacio y dentro de una locomotora es bastante reducido (Lindmark y Olsson-Spjut, 2018).

A comienzos del siglo XX, como se ve en la Tabla 7, el consumo energético de Suecia se centraba en la madera y en los combustibles fósiles. En comparación con 1950, la dependencia de los combustibles fósiles aumenta, igual que la electricidad y disminuye el consumo de leña. Por otro lado, se observa que la dependencia a los combustibles fósiles en España era mayor que en Suecia. (Gales et al., 2007).

(%)	1900				1950			
	Suecia	Países Bajos	Italia	España	Suecia	Países Bajos	Italia	España
Leña	54	2	56	38	22	0	23	16
Eólica/hidráulica	1	4	2	7	1	0	0	0
Combustibles Fósiles	45	94	43	55	67	100	64	81
Electricidad	0	0	0	0	9	0	14	3

Tabla 7. Composición de la energía consumida en 1900 y 1950 en Suecia, Países Bajos, España e Italia (Gales et al., 2007).

El periodo de 1950 a 1975, la economía sueca perteneció a lo que se conoce como la Edad de Oro europea. Esta época estuvo caracterizada por los desarrollos en la electrificación y motorización, donde el consumo y la producción masiva fueron apoyados por las políticas de mercado (Schön, 2008). En 1967, Suecia, es el primer país del mundo en aprobar una ley de protección ambiental y en 1972, fue sede de la primera conferencia de la ONU sobre el medio ambiente global (Sweden, 2021).

En los años 70, el petróleo crudo y derivados representaban el 77% del suministro total de energía y la mayor parte era destinado al sector residencial y servicios (Energimyndigheten, 2000). La electricidad, en cambio, no tenía tanta dependencia en los productos petrolíferos debido a la producción de energía hidroeléctrica (Tabla 8). Sin embargo, el gobierno de Suecia empieza a preocuparse por la política energética y el objetivo es reducir el consumo de petróleo. Por eso decide apostar por la energía nuclear, porque sustituiría al petróleo y derivados. Desde entonces, la economía de Suecia ha crecido sustancialmente, al mismo tiempo que reducía las emisiones de carbono y limitaba la polución. En 1979, el parque nuclear sueco generaba 20,1 TWh y el gobierno sueco proyectaba un crecimiento hasta alcanzar los 54 TWh de generación nuclear en 1990. Pero tras los accidentes nucleares (Three Mile Island y Chernobyl) el gobierno sueco decide que no se va a construir más reactores (Schön, 2008).

Fuente de energía eléctrica	1973		1993	
	TWh	%	TWh	%
Carbón	0,5	1	3,02	2
Petróleo	15,18	19	3,08	2
Gas	0	0	0,92	1
Nuclear	2,11	3	61,4	42
Solar/Eólica	0	0	0,05	0
Ciclo combinado	0,4	1	2,14	1
Hidroeléctrica	59,87	77	74,6	51
Total	78,06	100	145,21	100

Tabla 8. Consumo de eléctrico en Suecia en 1973 y 1993 (Nordhaus, 1995).

El suministro total de energía de Suecia aumenta en un 36% desde 1970 a 1999, pasa de 457 TWh a 615 TWh. La energía final demandada fue de 392 TWh, siendo el sector industrial y los otros sectores (residencial, comercial) los que más han demandado, 150 TWh y 151 TWh, respectivamente (Energimyndigheten, 2000).

A finales de los años 90, la energía eléctrica producida en Suecia era mayormente hidroeléctrica y nuclear. Alrededor de un 5% procedía de centrales térmicas convencionales (Tabla 8).

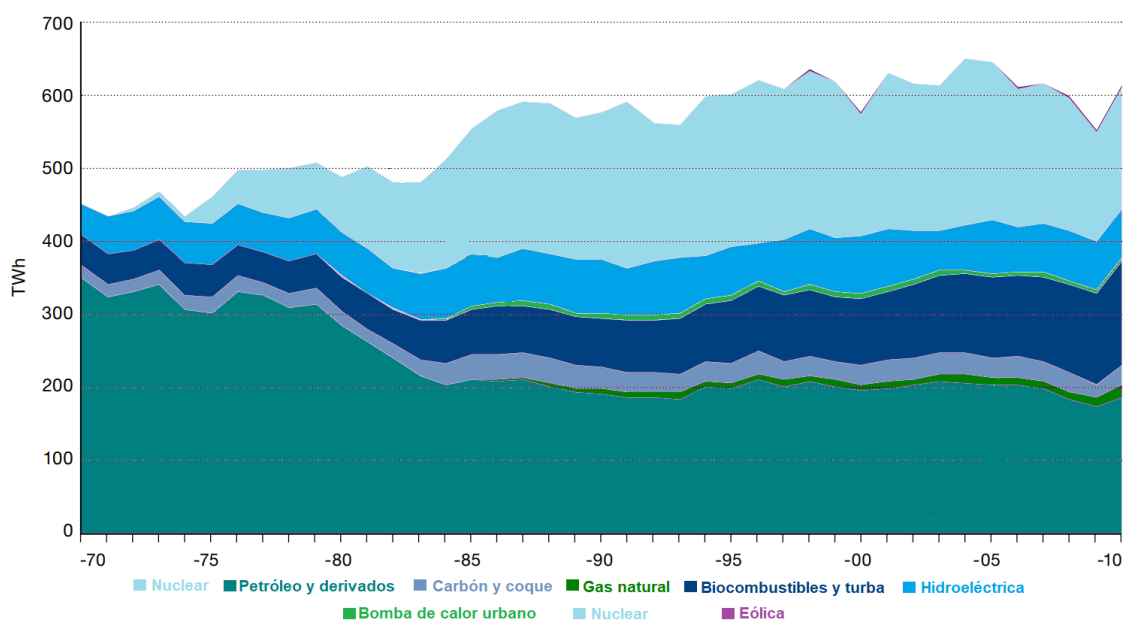


Figura 25. Energía disponible en Suecia, 1970-2010 (Swedish Energy Agency, 2011).

Como se puede ver en la Figura 25, en las últimas décadas, la energía disponible ha sido bastante constante, sin grandes crecimientos. En 2008, hubo una disminución pronunciada debido a la crisis financiera, pero rápidamente se recuperó (Swedish Energy Agency, 2011).

Actualmente el consumo de energía es alto, ocupó el puesto 9 del mundo en 2020, con un consumo de 11.874,5 kWh per cápita, que a diferencia de España está en el puesto 39 (5.276,0 kWh per cápita). A pesar de ello, las emisiones de CO₂ per cápita fueron más bajas que en España. En Suecia se emitieron un total de 42.297 toneladas de CO₂, que equivalen a 4,18 toneladas per cápita, y en España se emitieron un total de 214.847 toneladas de CO₂, que equivalen a 4,62 toneladas per cápita (Expansión, 2021a, 2021b).

Que tenga un consumo alto de energía y al mismo tiempo bajas emisiones de CO₂, se debe en gran parte a las energías renovables. En 2019, el 57,3% del consumo de energía total y el 58,7% de la electricidad demandada procedía de fuentes renovables (Eurostat, 2021). El gobierno sueco acaba de aprobar la ley que les marca el objetivo del 100% renovable en 2045.

Actualmente, en Estocolmo, todo el sistema subterráneo (metro) funciona con electricidad verde y, desde 2017, todos los autobuses con combustibles renovables (Sweden, 2021).

El enfoque de Suecia es cambiar el comportamiento del consumidor, tanto en servicios como en los productos. Para ello las políticas suecas ayudan al crecimiento de las energías renovables.

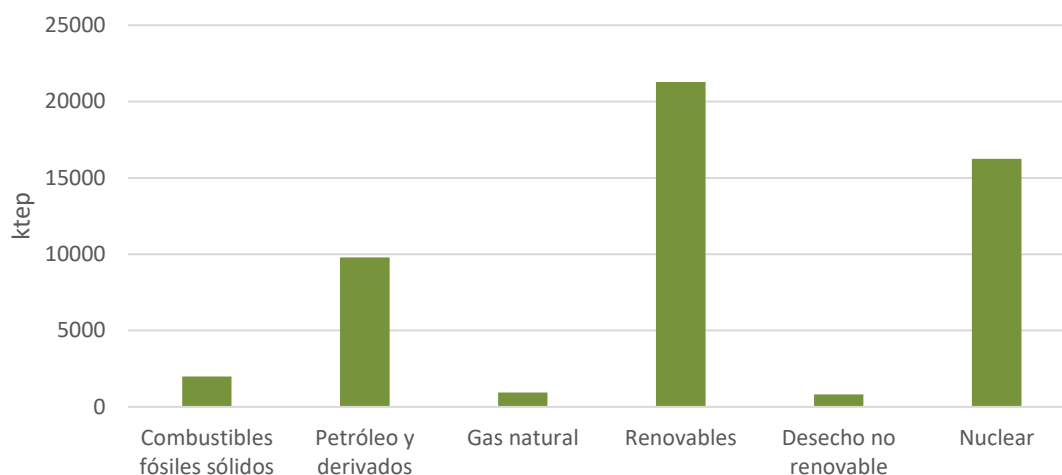


Figura 26. Energía primaria de Suecia en 2019 (Eurostat, 2021).

La Figura 26 representa las diferentes fuentes de energías primarias en Suecia y cuánto han generado. La principal fuente de energía primaria fue la renovable, seguido por la nuclear (Eurostat, 2021).

En 2020, Suecia exportó 25 TWh de electricidad, mayormente a Finlandia, aparte de Lituania, Dinamarca y Polonia. Pero también importó electricidad, de Noruega y Dinamarca.

2.2.2 Principales fuentes de energía de Suecia

2.2.2.1 Petróleo y derivados

Durante el 2019, el petróleo y derivados han representado el 23% del consumo total (Eurostat, 2021). Los productos más usados (Tabla 9) son los gasóleos y la gasolina (Sweden Statistics (SCB), 2018).

Producto	m ³ o ton	%
Gasolina (m ³)	245.274	26,98%
Queroseno de aviación (m ³)	107.661	11,84%
Diésel (m ³)	462.250	50,85%
Aceite de calefacción doméstica (m ³)	53.832	5,92%
Fuelóleo medio y pesado (m ³)	14.539	1,60%
Propano y butano (ton)	25.358	2,79%
Otros (m ³)	128	0,01%
Total	909.042	100,00%

Tabla 9. Consumo productos petrolíferos en Suecia en 2017 (Sweden Statistics (SCB), 2018).

El consumo del petróleo disminuyó desde que Suecia apostó por la energía nuclear. Muchos hogares se cambiaron a la calefacción eléctrica o la calefacción urbana, que más adelante se explicará cómo funciona (Energimyndigheten, 2000). El consumo del petróleo y derivados puede observarse como ha ido disminuyendo desde los años 80 en la Figura 27.

El sector transporte es el que más demanda este tipo de recurso con un 76%, seguido por el sector industrial con un 13% y el resto el 10% (Eurostat, 2021).

Suecia carece de este recurso (petróleo y derivados), para obtenerlo se importa principalmente desde Noruega y Rusia, que durante el 2019 han representado el 41% y el 27%, respectivamente (TASS, 2020).

Hay tan sólo 2 refinerías y ambas a cargo de la empresa Preem que se encarga de suministrar el 80% del petróleo consumido en el país. Proporciona una capacidad de 345.000 barriles por día lo que corresponde al 15% del consumo total de energía de Suecia (Preem, 2019).

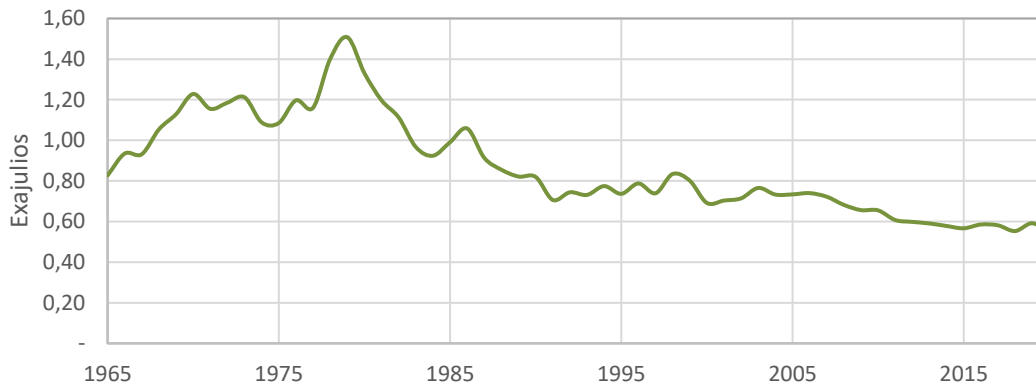


Figura 27. Evolución del consumo de petróleo en Suecia, 1965-2020 (BP, 2021).

2.2.2.2 Gas natural

Durante 50 años hubo planes de contribuir una red de gas natural que cubra parte de Suecia, tomando gas de Rusia o Noruega. Pero hubo campañas por parte de ONG medioambientales que siempre se han opuesto y acaban ganando la batalla. Ven el gas natural como un obstáculo para el desarrollo de las energías renovables.

A diferencia de España, el gas natural, no es una necesidad para Suecia. Sólo una pequeña parte del país, especialmente la región costera desde Malmö (en el sur) hasta Gotemburgo (en el suroeste) está conectada a la red de gas europea, desde Dinamarca (Lundberd, 2015).

El gas apenas se utiliza para calentar viviendas. Los suecos, como se ha mencionado anteriormente, utilizan calefacción urbana que se obtiene principalmente mediante la quema de madera y residuos.

Y para la generación de energía eléctrica tampoco es necesario, como se verá en los siguientes apartados.

En 2019, era el 1,86% de energía bruta disponible, que acabó cubriendo el 1,52% de la energía final (Eurostat, 2021).

2.2.2.3 Carbón

El carbón en Suecia nunca tuvo un alto consumo, como se ve en la Figura 28. Se utiliza principalmente en procesos industriales. El uso en los demás sectores disminuyó con la calefacción urbana.

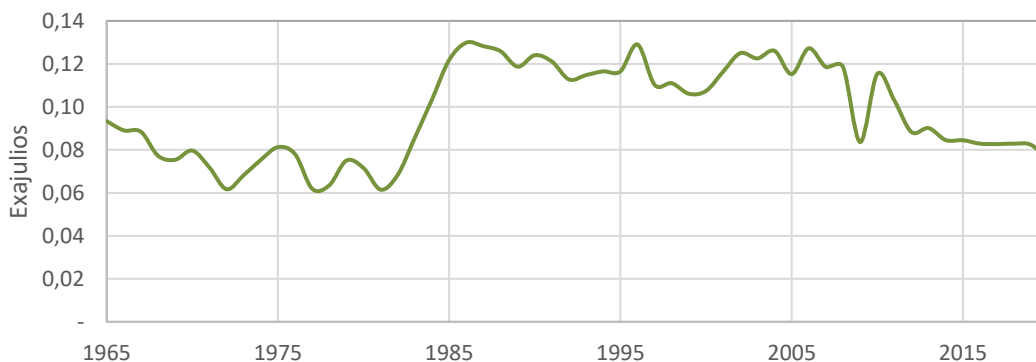


Figura 28. Evolución del consumo de carbón en Suecia, 1965-2020 (BP, 2021).

En la década de 1990 fue cuando más disminuyó tras los impuestos sobre el CO₂ y el azufre. Este carbón fue sustituido por biocombustibles. Sin embargo, las plantas de cogeneración aún utilizaban carbón debido a que las tasas no son tan estrictas como para la producción de sólo calor (Swedish Energy Agency, 2011).

Al igual que en España el consumo del carbón es muy reducido, representando el 1% de la energía demandada (Eurostat, 2021). Contiene reservas de carbón, pero apenas cubriría un año de consumo, así que se importa (BP, 2021).

2.2.2.4 Nuclear

Actualmente hay 6 reactores nucleares activos, en 3 emplazamientos (Figura 29). Todos los reactores son del tipo BWR (Boiler Water Reactor, reactor de agua en ebullición), a excepción de los reactores 2, 3 y 4 de Ringhals, que son PWR.

En 2019, su consumo cubrió el 40% de la demanda de energía eléctrica, que corresponde al 13% del consumo total de energía (Eurostat, 2021).

En 2015 se tomó la decisión de cerrar los cuatro reactores más antiguos para 2020, eliminando así 2.944 MW.

Suecia posee grandes cantidades de uranio de bajo grado. Sin embargo, el contenido del uranio es bajo o muy bajo y los incentivos económicos para explotar minerales de uranio no han sido suficientes para iniciar una explotación (IAEA, 2021).

Al igual que España, Suecia quiere dar el cierre nuclear total, aunque no hay una fecha propuesta. Pero todavía no está preparada para autoabastecerse al 100% de las energías renovables, por tanto, en los reactores existentes se han realizado inversiones para alargar su vida útil y hacerlas más seguras.

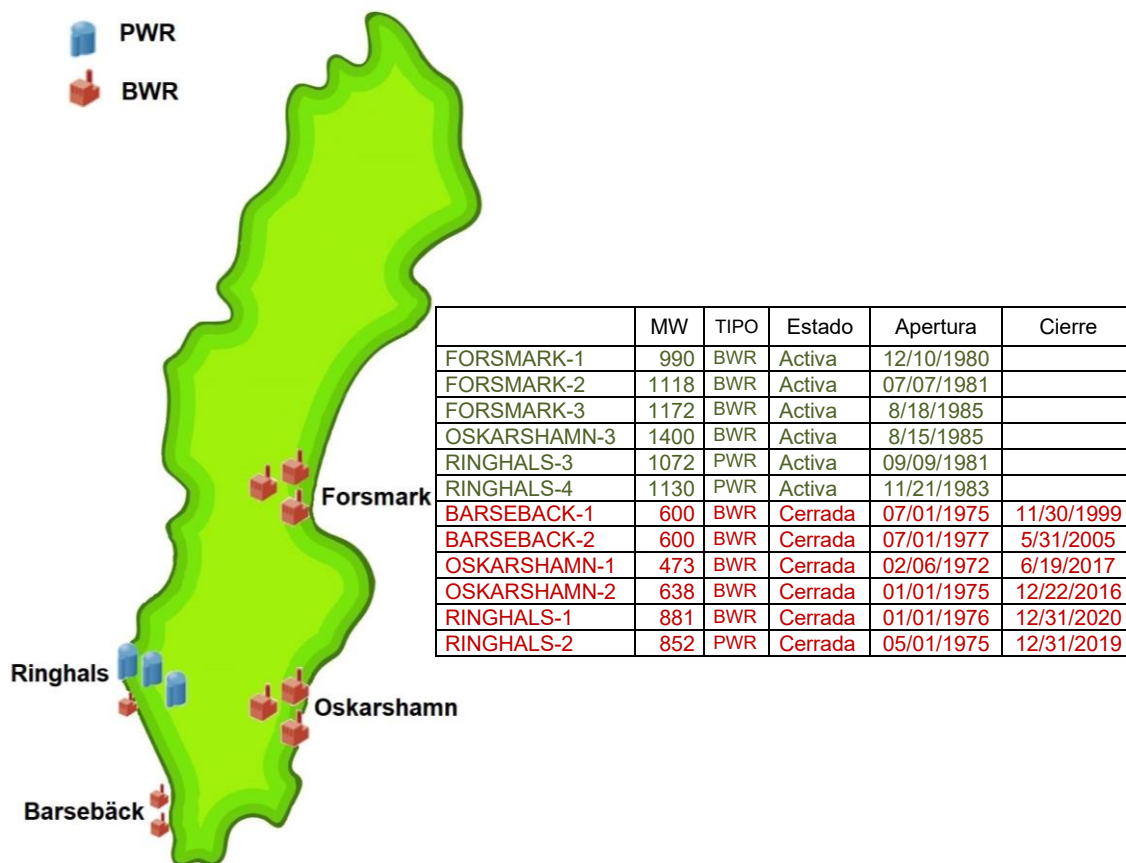


Figura 29. Centrales nucleares de Suecia (elaboración propia a partir de IAEA, 2021).

2.2.2.5 Fuentes Renovables

Gracias a las políticas energéticas del gobierno sueco que han promovido el uso de energías renovables, en 2019, han representado la principal fuente de energía consumida del país con un 57,3% (Eurostat, 2021).

Desde la década de 1980, la generación de electricidad se basa en la energía hidroeléctrica y nuclear. En los últimos años (Figura 30), debido al crecimiento de otras fuentes renovables la dependencia a la energía nuclear está disminuyendo (IEA, 2019).

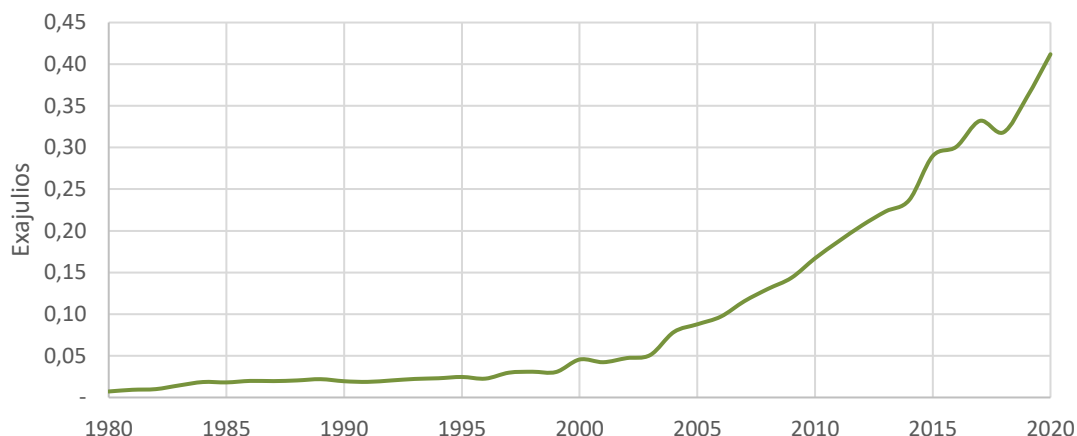


Figura 30. Evolución de las energías renovables en Suecia (BP, 2021).

En los últimos años, los biocombustibles aumentaron en el sector del transporte. Suecia tiene la mayor proporción de combustible renovable para transporte de todos los miembros de la IEA. El aceite vegetal hidrogenado, que es un tipo de biodiésel representa la mayor parte de los biocombustibles en el sector del transporte sueco (IEA, 2019).

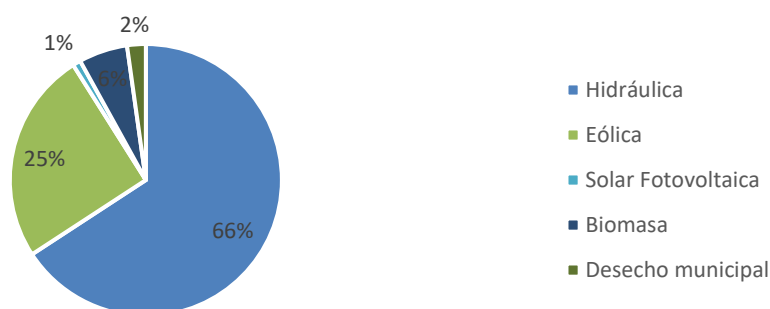


Figura 31. Distribución de las diferentes fuentes de energía renovable Suecia, 2020 (Eurostat, 2021).

Suecia destaca por su hidroelectricidad, viento y biomasa (Figura 31). Aunque la energía solar fotovoltaica está en auge (Eurostat, 2021).

2.2.2.5.1 Eólica

Es la segunda fuente de energía renovable más demandada. En 2020, se han generado más de 28 TWh. Se puede observar que, tras su inicio en 1993, la eólica ha estado en aumento (Figura 32). Actualmente hay 1.082 parques eólicos con 9.801 MW instalados.

En 2020, Suecia ocupa el sexto puesto en UE con mayor potencia instalada (1.007 MW) y el cuarto puesto en relación con el número de turbinas instaladas, 264, con una potencia media por turbina de 3,8 MW (Wind Europe, 2021).

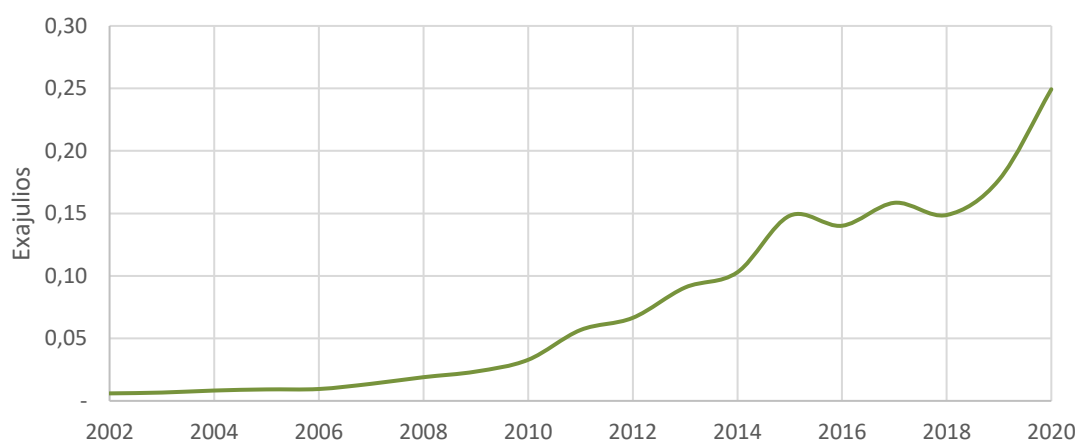


Figura 32. Evolución del consumo de energía eólica en Suecia, 2002-2020 (BP, 2021).

2.2.2.5.2 Solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica, por muy curioso que parezca, es una fuente que se encuentra en crecimiento (Figura 33). Se centra mayormente en la instalación de paneles fotovoltaicos encima de los tejados. Suecia cuenta con alrededor de 66.000 paneles, habiendo instalado 22.000 en el año anterior. Durante el último año se han generado 1035 MWh.

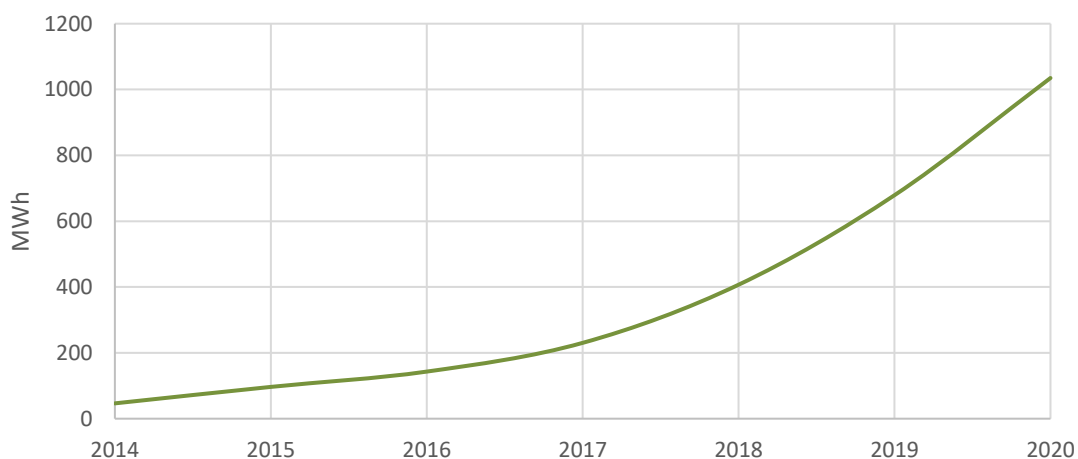


Figura 33. Evolución del consumo de energía solar en Suecia, 2014-2020 (Eurostat, 2021).

2.2.2.5.3 Hidráulica

Es la energía renovable más importante de Suecia. En la década de 1970, la mayoría de la electricidad se producía a partir de la hidroeléctrica y centrales térmicas convencionales (Energimyndigheten, 2000). Desde entonces ha ido creciendo (Figura 34) a pesar de que depende en cada momento de los recursos hídricos.

Ahora, la electricidad se produce a partir de la hidroeléctrica y la nuclear. Hay alrededor de 16.478 MW de capacidad hidroeléctrica instalada y su generación en 2020 alcanzó los 71.806 MWh. Por detrás de Noruega y Turquía. Sólo esta fuente renovable

cubrió el 43% de la electricidad demandada durante ese año. Junto con la energía nuclear, cubren el 83% de la demanda de electricidad (Eurostat, 2021).

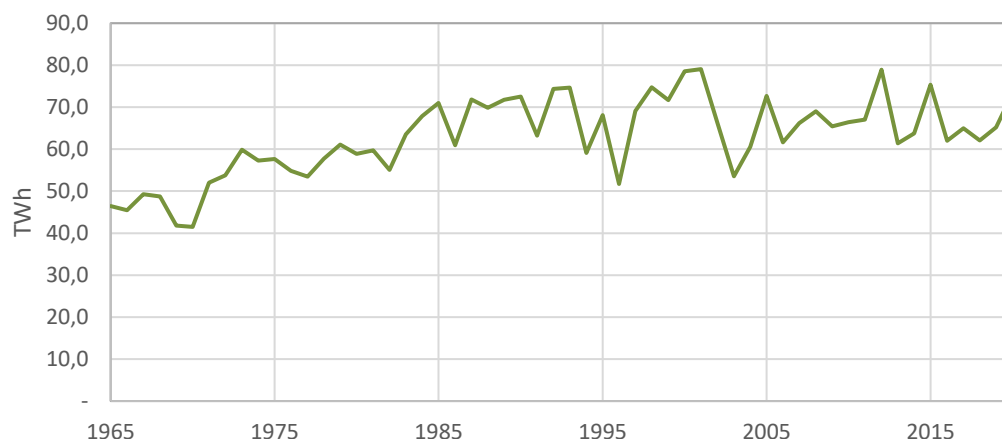


Figura 34. Evolución de la demanda hidráulica en Suecia, 1965-2020 (BP, 2021).

2.2.2.5.4 Otras fuentes

Dentro de otras fuentes la más importante a destacar es la biomasa y el desecho urbano renovable, que han representado el 6% y 2% respectivamente, de la energía renovable destinada para la electricidad.

En Suecia, la biomasa, es la principal fuente de calor, el 2019, el 58% del calor generado procedía de biomasa (Eurostat, 2021). El 69% de la superficie de Suecia es bosque. La biomasa procede de las masas forestales en forma de pellets, astillas y troncos que se utilizan tanto en calderas como calefacciones centralizadas de biomasa “*district heatings*” (Sweden, 2021).

Durante el 2019, ha representado el 19% de la energía bruta disponible. Cubriendo el 16% de la demanda total (Eurostat, 2021).

Una fuente de energía a destacar es el calor corporal o también denominada calor ambiental. En Suecia cubrió un total de 280,4 ktep, que equivalen al 6% del calor demandado (Eurostat, 2021). Una nueva modalidad de construcción de edificios llamada “casas pasivas” que no tienen sistemas de calefacción convencionales y que se mantienen calientes por el calor que desprenden sus ocupantes y los aparatos eléctricos. En Estocolmo, el calor corporal de los viajeros que pasan por la estación central de trenes se utiliza para calentar un edificio cercano (Sweden, 2021).

2.2.1 Balance energético sueco

En 2019, la energía bruta disponible era de 51.719,6 ktep, tras las transformaciones quedó en un total de 33.433,2 ktep y de los cuales se consumieron 31.311,5 ktep. En la Figura 35 se puede observar la evolución de la energía final consumida por fuente desde 1990 hasta 2019 (Eurostat, 2021).

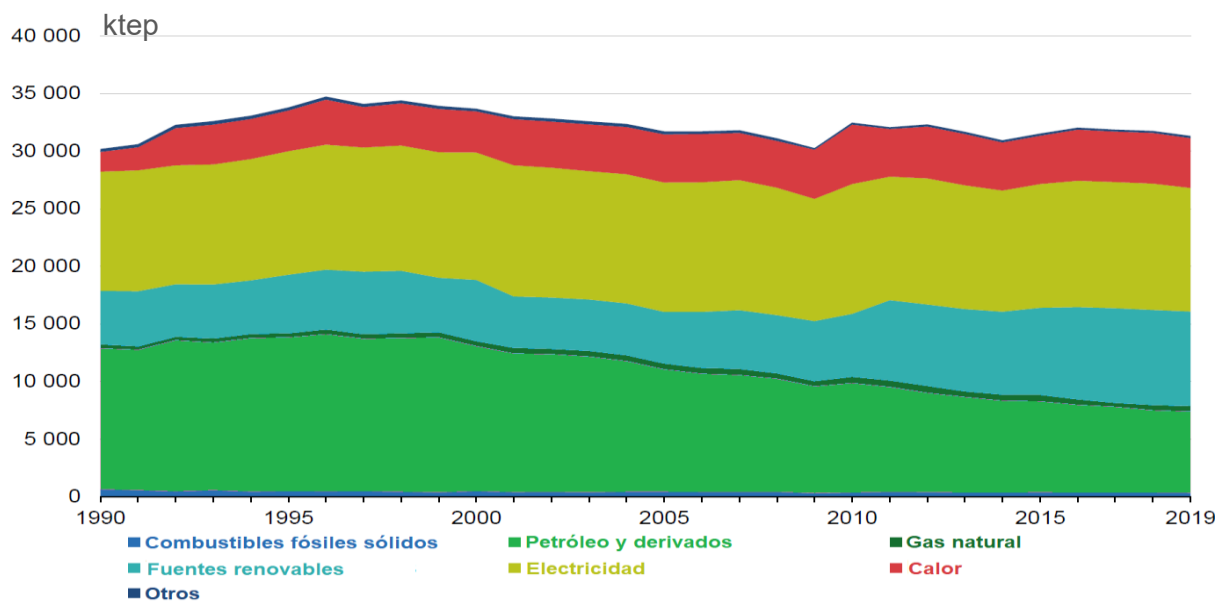


Figura 35. Consumo final de energía por fuente en Suecia, 1990-2019 (Eurostat,2021).

En el caso de Suecia, el grupo que más demanda son los otros sectores (Figura 36), donde estaban incluidos el sector residencial y comercio, entre otros. Después está el industrial y, por último, el sector transporte (Eurostat, 2021).

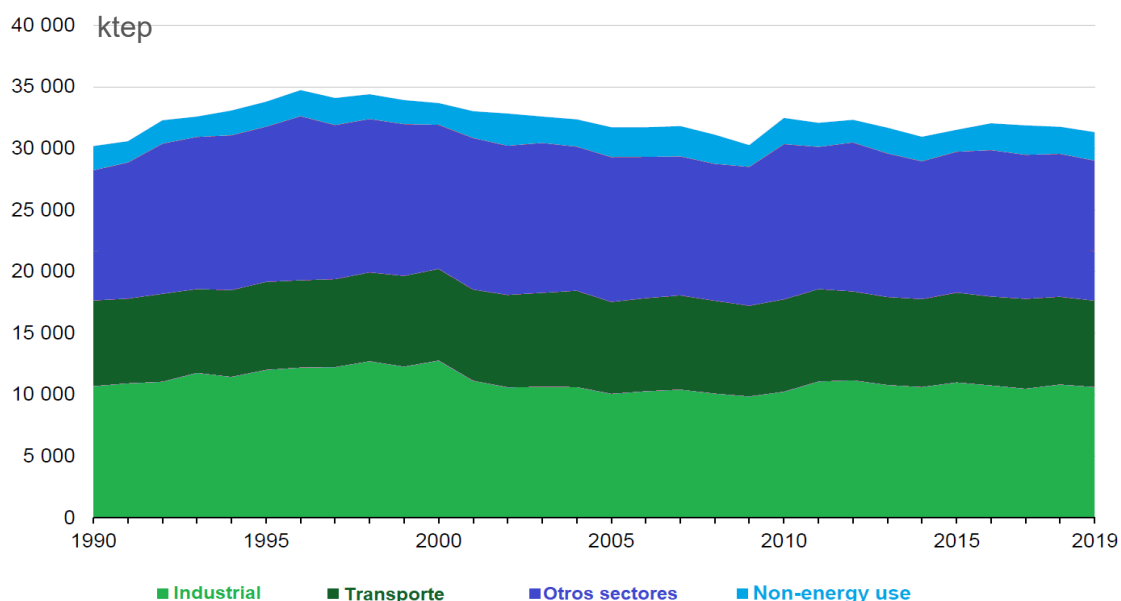


Figura 36. Energía final consumida por sectores en Suecia, 1990-2019 (BP, 2021).

Industrial

En este sector se engloba cualquier actividad industrial. A lo largo del año 2019, se han demandado un total de 10.892,4 ktep. Las energías renovables fueron los que más participaron en este sector (Figura 37) con un 40% seguido por los combustibles fósiles, 39% (Eurostat, 2021).

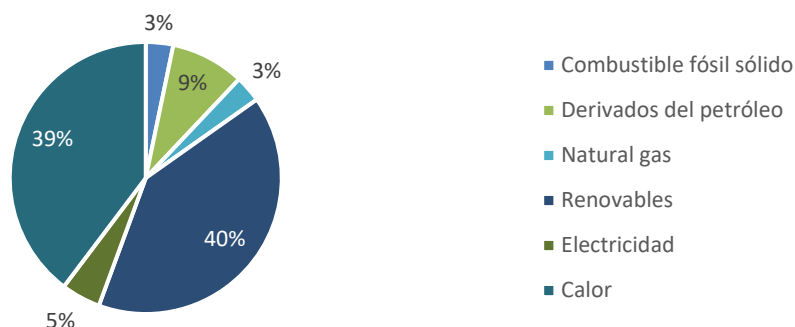


Figura 37. Cobertura de la demanda en el sector industrial en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).

Transporte

A lo largo del año 2019, ha sido el sector que menos energía a demandado, 7.015,8 ktep. La fuente que más cubrió esta demanda ha sido el petróleo y sus derivados con un 77%, seguido por las fuentes renovables, Figura 38 (Eurostat, 2021).



Figura 38. Cobertura de la demanda en el sector transporte en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).

Otros sectores

Se han demandado un total de 13.403,3 ktep. En la Figura 39 se muestra que el 46% de la demanda fue el calor y segundo por la electricidad (Eurostat, 2021).



Figura 39. Cobertura de la demanda en otros sectores en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).

En la Figura 40, al igual que en el caso de España, se ha calculado por cada sector que está dentro de otros sectores, la participación de cada fuente (Eurostat, 2021). Resulta que el sector que más ha demandado ha sido el residencial, seguido por el comercial. En ambos sectores la principal fuente son las fuentes renovables.

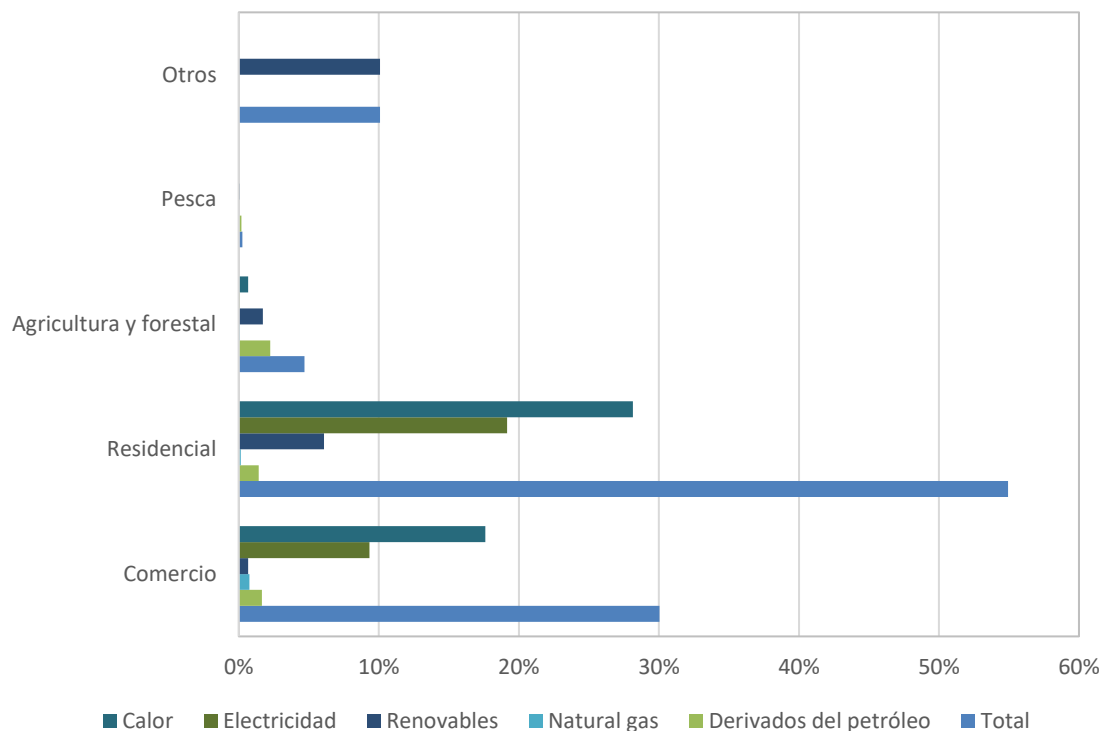


Figura 40. Energía final de cada sector en Suecia, 2019 (Eurostat, 2021).

Por último, se muestra la demanda de energía eléctrica por fuente durante el año 2020 (Figura 41). En Suecia se han consumido un total de 162.618 MWh durante el 2020. El 67,11% de la electricidad fue producida por fuentes renovables, el 30% fue nuclear y el resto de las fuentes han representado el 2,8% (Eurostat, 2021).

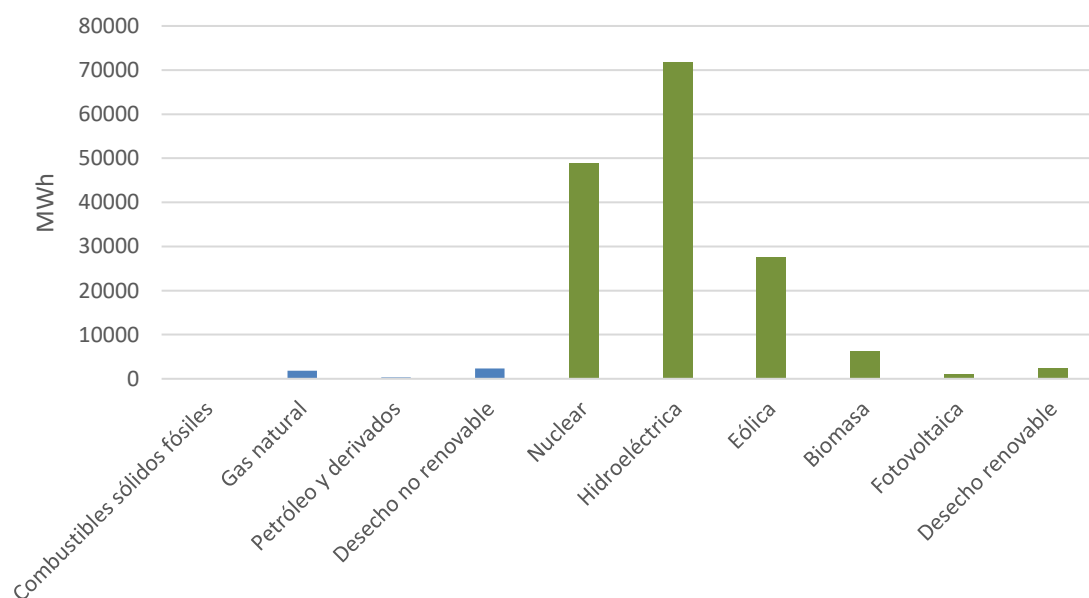


Figura 41. Demanda de energía eléctrica en Suecia durante el 2020 (Eurostat, 2021).

2.3 Situación europea

El sistema energético tanto en Suecia como en España está condicionado por la política climática y energética de la Unión Europea. Sobre todo, por el Acuerdo de París alcanzado en 2015. El objetivo de este acuerdo es tratar de que el aumento de la temperatura media global no supere los 2°C respecto de los niveles existentes antes de la revolución industrial. Para ello se fijó una serie de objetivos para cumplir en 2030 (Comisión Europea, 2021).

- 40% de reducción de GEI respecto a 1990
- 32% de renovables sobre el consumo total de energía final bruta
- 32,5 de mejora de la eficiencia energética
- 15% interconexión de los Estados miembros.

España, en los últimos años ha ido disminuyendo las emisiones GEI, aunque todavía se encuentra con un nivel de emisiones superior al deseado. Es decir, en 2020 se estimó unas emisiones brutas de 271,5 millones de toneladas de CO₂ que son un 13,7% menos que el año anterior, pero siguen siendo un 6,4 % menos con respecto a 1990 (MITECO, 2021).

A partir de los datos disponibles, en 2019, la energía renovable representó el 18,3% del consumo de energía total y la interconexión de España está por debajo del 6% (REE, 2021). Por tanto, estos objetivos tampoco se han cumplido.

Suecia, en cambio, ha reducido sus emisiones en un 32,7% son respecto a 1990 (Ritchie y Roser, 2021). En la Figura 42 se puede ver la evolución de las emisiones de CO₂ desde 1990 a 2020 de ambos países. Con respecto a las energías renovables, han obtenido una participación de 57,3% en la energía final consumida y tiene una interconexión alrededor del 30% (Eurostat, 2021). Por tanto, ha logrado los principales objetivos.

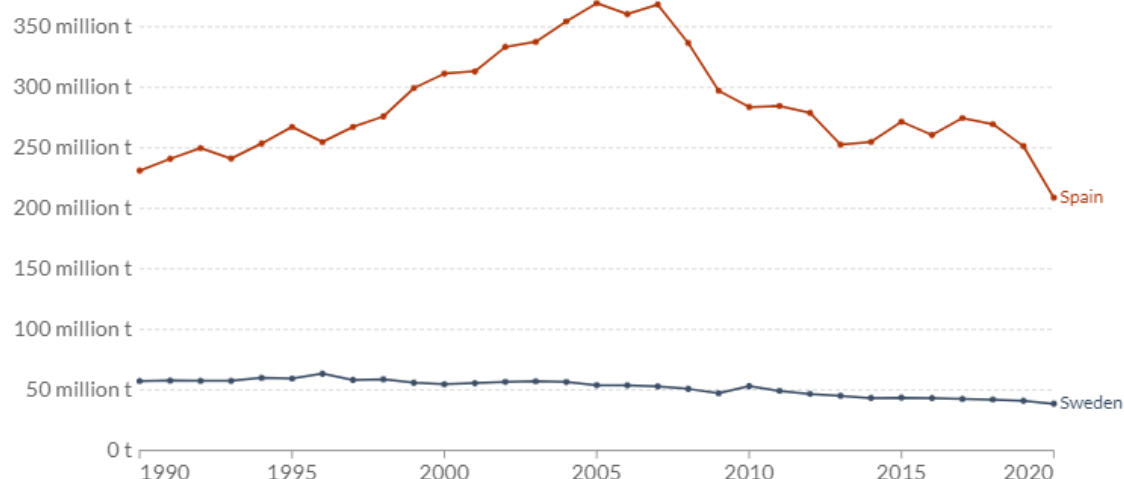


Figura 42. Emisiones anuales de CO₂ de España y Suecia (Ritchie y Roser, 2021).

Con respecto a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la ONU, en 2020, se publicó el segundo informe cuantitativo con el estado de dichos objetivos. En lo que se refiere a términos energéticos, España no ha mejorado como se ha demostrado anteriormente. En general, el nivel de sostenibilidad aún puede ser mejorable ya que se encuentra en el puesto 21 en el ranking de sostenibilidad de Europa, que participan un total de 31 países.

Suecia, en cambio, ha cumplido con todos los objetivos relacionados con la energía limpia y asequible propuestos (ODS 7). Con respecto a otros indicadores también los resultados han sido buenos y por eso ocupa el segundo puesto en el ranking (detrás de Finlandia) (Sustainable Development Solutions Network and Institute for European Environmental Policy, IEEP, 2020).

Todos los objetivos y mejoras cumplidos han sido gracias a las políticas de transición energética del país. Suecia desde siempre ha sabido como explotar sus recursos naturales. La biomasa no podría haber sido relevante sino fuese debido a las políticas que ayudaban a esta fuente y sancionaban a las energías competidoras.

El hecho de crear una política de transición energética tan efectiva ha sido gracias a reacción rápida del gobierno ante las advertencias del cambio climático. Se ha creado un política de eficiencia energética unificada, que incluye organizaciones asociadas en todas las comunidades locales. Estas organizaciones ayudan a los consumidores de energía (un individuo o una empresa) técnica y económicamente. Y sobre todo promueven las energías renovables. Por ejemplo, desde los inicios de la fotovoltaica en Suecia (2009), este tipo de energía fue impulsada por el gobierno con ayuda de incentivos, tanto a pequeños como a grandes productores (Bellini, 2021).

A diferencia de España, que durante 3 años habían implementado un impuesto para la energía fotovoltaica, conocido como impuesto al sol. Actualmente ya no está vigente y España ha apostado también por el autoconsumo, destinará 660 millones de euros inicialmente (ampliables hasta 1.320 millones de euros), a proyectos de autoconsumo energético, climatización con energías renovables y almacenamiento. Se prevé que generarán 25.000 puestos de trabajo (MITECO, 2021).

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, actualmente Suecia ocupa el primer lugar en el índice de Competitividad Global Sostenible (Solability, 2021). Este índice mide la competitividad de los países con base en 131 indicadores cuantitativos medibles. España, a diferencia de Suecia se encuentra en el puesto 27.

A continuación, lo que se pretende es evaluar las principales fuentes de energía eléctrica de cada país y poder evaluar si las medidas tomadas por cada gobierno ayudan a mejorar la sostenibilidad del país.

Los principales objetivos del gobierno sueco para 2030 es aumentar la potencia instalada de la energía fotovoltaica y eólica, 2 y 5 GW de potencia, respectivamente (Regeringen, 2021).

España, también tiene como objetivos aumentar la potencia de energía eólica y solar fotovoltaica, 22 y 30 GW de potencia, respectivamente.

Con respecto las centrales nucleares, Suecia no tiene fecha fija para el cierre de los reactores, menciona en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima que las irá cerrando a medida que vean necesario. España, en cambio sí que prevé dar el cierre a 4 de los 7 reactores antes de 2030 (Regeringen, 2021).

Por tanto, las centrales elegidas para evaluar son: hidráulica, eólica, fotovoltaica, nuclear, biomasa y gas natural. Las razones por la cual se han elegido estas centrales están en el Apartado 4.1.1. de este trabajo.

3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción a la evaluación de la sostenibilidad

Lo primero a tener en cuenta para evaluar la sostenibilidad de cualquier sistema ya sea de una central eléctrica o de un edificio, hay que considerar todo impacto que sucede dentro o fuera del sistema desde que se crea hasta que se termine, no es suficiente con fijarse sólo en los beneficios económicos. Los aspectos sociales y ambientales junto con los económicos están interconectados. No se puede considerar únicamente uno de ellos porque se crearían errores y daría resultados “insostenibles”. En los últimos años se ha empezado a tener en cuenta más aspectos que no sean los económicos. Ahora bien, históricamente, siempre se ha tratado de maximizar los beneficios, lo que conllevó a provocar daños sociales y medioambientales que resultan costosos a largo plazo a la sociedad (Estrango, 2012).



Figura 43. Dimensiones del desarrollo sostenible en la sociedad (Martínez, 2015).

Al evaluar la sostenibilidad de una planta eléctrica, habría que tener en cuenta las tres dimensiones fundamentales mostrados en la Figura 43. Abordando e incorporando de manera equilibrada las tres dimensiones del desarrollo sostenible y sus interrelaciones, viable, soportable y equitativo, se consigue el desarrollo sostenible. Para poder cualificar o cuantificar cada dimensión se hace uso de los indicadores energéticos.

En 1999 se inició el proyecto de largo plazo para el desarrollo de los indicadores energéticos entre los participantes se encuentra el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (UNDESA), IAEA y IEA. Los objetivos fueron desarrollar un conjunto de indicadores energéticos coherentes, para que cada país fuera capaz de generar estadísticas energéticas necesarias para promover la sostenibilidad energética (IAEA et al., 2008).

Para identificar que indicadores usar para la evaluación es importante identificar las actividades significativas del sistema y relacionar el consumo energético con la actividad.

3.2 Selección de indicadores

A lo largo de este capítulo se analizarán los indicadores energéticos que más se ajustan tanto a España como a Suecia y de los que se han encontrado información. Como se ha descrito anteriormente, se necesitarán indicadores para cada una de las tres dimensiones.

Para los indicadores económicos se han usado fuentes como NEA y IEA (2015), otros documentos como los de Galbete (2013), Márquez (2018), y múltiples artículos (Roca, 2019; Invertia, 2021; IDAE, 2006; AEE, 2020) para el caso de España. Para Suecia principalmente se ha usado el Informe Elforsk (2014).

Para los indicadores sociales, para ambos países, España y Suecia, se ha extraído información desde los informes de EurObserv'er (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), Foro Nuclear (2019), Burgherr (2014), Pickard y Scott (2021), Montt et al. (2018), ALINNE (2018), Haddad y Dones (1991), Hirschberg (2006) y las bases de datos de Eurostat y Bp. Además, se ha extraído información de la Fundación Europea del Clima (YouGov, 2021) para el caso de España y para Suecia se ha usado información aportada por la Universidad de Göteborgs (2021).

Para los indicadores medioambientales se han extraído los datos de diversos artículos basados en la evaluación de sostenibilidad para diferentes fuentes energéticas.

3.2.1 Indicadores económicos

Entre los múltiples indicadores económicos el que más se ajusta a este trabajo es el Costo nivelado de la energía, LCOE (Levelized Cost of Energy).

El LCOE en la producción de energía eléctrica se puede definir como el valor presente del precio de la energía producida (expresado en unidad de €/MWh en este caso), considerando la vida económica de la planta y los costos incurridos en la construcción, operación y mantenimiento, y los costos de combustible.

La Ecuación 1, según la Comisión Europea, en 2020, es la fórmula empleada para calcular el LCOE:

$$LCOE \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I+FO\&M_t+VO\&M_t+ F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

Donde:

- I: Coste de inversión en €.
- FO&M_t: Coste fijos de operación y mantenimiento en el año t en €.
- VO&M_t: Coste variable y mantenimiento en el año t en €.
- F_t: Coste de combustible en el año t en €.
- E_t: Energía producida en el año t en MWh.
- (r+1)^{-t}: Tasa de descuento correspondiente al año t en %
- n: Años de vida útil

En este trabajo sólo se va a usar este indicador debido a su robustez, porque en realidad, relaciona varios indicadores dentro de uno, como se puede observar en la ecuación presentada. Debido a la gran cantidad de información encontrada en relación a este indicador en función del tamaño de la central, la ubicación y tipo de central, en lugar de emplear un único valor de LCOE, se empleará una distribución triangular cerrada, caracterizada por un valor mínimo, un valor modal y un valor máximo (Tabla 10).

La tasa de descuento habitual suele estar entre el 5 y 10%, tomándose un valor del 6% para este estudio.

Suecia	min	max	moda
Hidráulica	42	52	43
Fotovoltaica	79	106	91
Eólica	35	63	36
Nuclear	69	97	84
Biomasa	58	115	82
Gas Natural	57	74	67
España	min	max	moda
Hidráulica	35	123	46
Fotovoltaica	124	154	132
Eólica	53	115	53
Nuclear	42	102	69
Biomasa	117	196	154
Gas Natural	42	107	52

Tabla 10. LCOE España y Suecia (elaboración propia a partir del informe Elforsk (2014), NEA y IEA (2015, 2020), Galbete (2013), Márquez (2018)).

3.2.2 Indicadores sociales

Se van a considerar tres indicadores para cada país: aceptación social, empleo y número de accidentes fatídicos, siendo los valores para este indicador comunes a ambos países.

Aceptación social. Con este indicador se pretende evaluar el nivel tolerancia y de aceptación que tiene cada central o fuente de energía en cada país.

Para el caso de España hay una encuesta realizada por la YouGov para la European Climate Foundation (Fundación del Clima Europea) durante el 2021, donde se les daba a elegir qué tipo de central preferían tener cerca de su domicilio. A raíz de esa encuesta los datos extraídos son los equivalentes a la Tabla 11:

España	Totalmente de acuerdo	De acuerdo	En contra	Totalmente en contra	No lo sé
Hidroeléctrico	41	42	5	1	11
Solar	44	33	8	5	12
Eólica	29	37	14	8	13
Nuclear	4	8	17	59	12
Biocombustibles	9	25	26	24	16
Gas natural	4	13	28	42	13

Tabla 11. Resultados aceptación España (YouGov, 2021).

Para el caso de Suecia hay una encuesta realizada para la Som – Institutet (SI) junto con la Universidad de Göteborgs en 2020, donde se les preguntaba en que tipo de central o fuente energética se debería invertir más. Los resultados de dicha encuesta están en la Tabla 12:

Suecia	Apostar más	Apostar igual	Apostar menos	No invertir	No contestar
Hidroeléctrico	41	42	5	1	11
Solar	80	11	1	1	7
Eólica	58	24	7	2	9
Nuclear	17	24	26	19	14
Biocombustibles	35	28	11	3	23
Gas natural	11	21	24	17	27

Tabla 12. Resultados aceptación Suecia (Jönsson y Holmberg, 2021).

Con los datos de las encuestas se podría obtener tanto un indicador determinista como uno probabilista, utilizando etiquetas semánticas. En este proyecto se ha tomado la decisión de hacer un indicador probabilista.

Primero lo que se ha hecho es descartar los datos que no aportan valor, es decir, las respuestas no contestadas. El objetivo es calcular la probabilidad de que ocurra una opción en un rango de 0 a 1, siendo 0 una baja aceptación, y 1 una buena aceptación. Para ello se ha calculado la suma de las respuestas válidas para sacar que fracción del total representa cada opción.

La probabilidad de que no se invierta, directamente es el porcentaje de “no invertir”. Análogamente para el resto de las opciones. Sin embargo, para modelar esto en Matlab a través de la generación de un número pseudo-aleatorio entre 0 y 1, es necesario ir acumulando probabilidades, de forma análoga a cómo hace la función de distribución.

Es decir, tal y como se muestra en la Figura 44, si el número pseudo-aleatorio es inferior o igual a 0.01, se asume la respuesta no invertir (baja aceptación). Sin embargo, si el número pseudo-aleatorio se encuentra entre 0.01 y 0.07, se adopta la respuesta apostar menos, siendo 0.07 la suma de las probabilidades de apostar menos y no invertir. Análogamente para el resto de los casos.

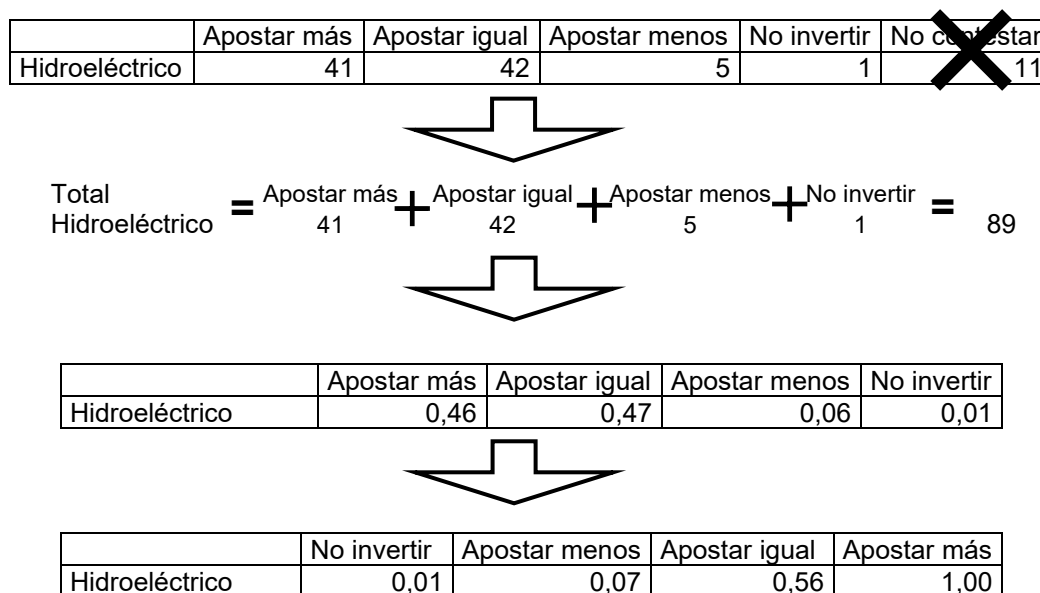


Figura 44. Ejemplo adaptación del indicador Aceptación (elaboración propia).

Empleo. Este indicador muestra el empleo asociado a cada central eléctrica, tanto el empleo directo como el empleo indirecto.

- Empleo directo: son los que derivan directamente de la producción, construcción, operación y mantenimiento y el suministro de combustible.
- Empleo indirecto: Son aquellos que resultan de actividades para otros sectores que abastecen materiales o componentes, como por ejemplo las plantas de fundición de cobre. Su producción puede ser utilizada para la fabricación de equipos solares térmicos, pero también se destinará a electrodomésticos.

Como los datos utilizados son el número de empleados asociados a cada fuente a lo largo de un año, lo que se hará es calcular el número de trabajadores que hubo en función de la energía generada en MWh. De esta manera se tendrá por cada fuente un abanico de datos a partir de los que ha sido posible definir las correspondientes distribuciones de probabilidad triangulares con sus respectivos valores mínimo, moda y máximo.

Principalmente se han usado los reportes de EurObserv'er (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), Foro Nuclear (2019) y la base de datos de Eurostat. Los resultados obtenidos están en la Tabla 13:

Suecia	min	max	moda
Hidráulica	0,06	0,09	0,07
Fotovoltaica	2,10	42,99	2,60
Eólica	0,13	0,88	0,32
Nuclear	2,42	3,28	2,80
Biomasa	1,85	2,99	1,90
Gas Natural	0,16	1,14	0,16
España	min	max	moda
Hidráulica	0,27	0,53	0,33
Fotovoltaica	0,27	2,02	0,82
Eólica	0,35	0,76	0,35
Nuclear	2,23	2,36	2,33
Biomasa	3,38	5,51	4,30
Gas Natural	0,12	1,52	0,12

Tabla 13. Empleo asociado a cada fuente para España y Suecia (elaboración propia a partir de EurObserv'er (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), Foro Nuclear (2019)).

Número de accidentes fatídicos. Este indicador indica el número de víctimas mortales que hubo en accidentes por cada tipo de energía y en sus actividades conexas. Se utiliza para medir el riesgo de las personas que trabajan o están próximas a las fuentes energéticas en cualquier punto de su ciclo de vida. Como se ha mencionado anteriormente reunir datos para este indicador ha sido bastante complicado debido a la falta de pruebas y evidencias que documenten las cifras reales para cada país. Por tanto, se ha tomado la decisión de usar los datos que hay asociados a nivel europeo para ambos países. Debido a la variabilidad de los datos encontrados se presenta la moda, el valor mínimo y máximo que se puede dar por cada fuente (Tabla 14). La unidad de medida será fatalidad/TWh.

Europa	min	max	moda
Hidráulica	3,91E-04	0,06	0,02
Fotovoltaica	1,14E-03	0,29	0,01
Eólica	7,72E-04	0,72	0,21
Nuclear	1,00E-06	0,15	1,00E-06
Biomasa	1,71E-03	4,63	2,36
Gas Natural	5,08E-03	2,82	0,91

Tabla 14. Fatalidades/TWh producido (elaboración propia a partir de Haddad y Dones (1991), Hirschberg (2006) Burgherr (2014) y las bases de datos de Eurostat y Bp).

3.2.3 Indicadores medioambientales

Los indicadores medioambientales utilizados en este estudio se basan en el trabajo de Cartelle Barros et al. (2020). Se considera como ciclo de vida, de la cuna a tumba, es decir, desde que se extraen las materias primas hasta el desmantelamiento, salvo para la solar fotovoltaica e hidráulica, que no se considera esta última fase, tal como lo indica Cartelle Barros et al. (2020). En la Tabla 15 se muestra una etiqueta por cada indicador medioambiental que se usará para las Tablas 16 y 17.

Indicador	
Acidificación	M1
Cambio climático	M2
Ecotoxicidad agua dulce	M3
Eutrofización agua dulce	M4
Eutrofización marina	M5
Eutrofización terrestre	M6
Toxicidad humana, cáncer	M7
Toxicidad humana, no cáncer	M8
Radiaciones ionizantes	M9
Disminución de ozono	M10
Partículas	M11
Creación de ozono fotoquímico	M12
Consumo de recursos, agua	M13
Consumo de recursos, minerales, fósiles y renovables	M14
Uso de la tierra (LANCA)	M15

Tabla 15. Indicadores medioambientales (Cartelle Barros et al., 2020).

A continuación, se muestran los datos de Suecia y España:

Suecia	Hidroeléctrica	Fotovoltaica	Eólica	Nuclear	Biomasa	Gas natural
M1	6,30E-06	4,00E-04	2,60E-05	3,60E-05	1,20E-03	1,50E-04
M2	1,40E-02	7,90E-02	7,70E-03	4,50E-03	4,00E-02	4,90E-01
M3	1,40E-04	5,20E-02	1,70E-03	2,40E-02	3,80E-02	2,10E-04
M4	3,00E-09	2,00E-07	1,70E-08	3,20E-08	1,00E-05	8,50E-09
M5	2,00E-06	6,40E-05	6,40E-06	1,20E-05	6,20E-04	5,60E-05
M6	1,80E-05	6,90E-04	6,80E-05	7,70E-05	3,50E-03	6,40E-04
M7	5,00E-12	1,40E-09	5,60E-11	3,30E-11	3,00E-10	2,90E-11
M8	1,60E-10	1,70E-08	8,00E-10	4,90E-10	5,30E-08	9,10E-11
M9	4,00E-05	8,20E-03	2,30E-04	4,60E-01	2,00E-03	1,00E-03
M10	6,10E-15	1,90E-12	8,90E-14	6,00E-12	2,10E-13	1,40E-14
M11	4,90E-07	4,00E-05	3,90E-06	2,20E-06	5,90E-05	1,00E-05
M12	4,80E-06	2,30E-04	1,80E-05	2,30E-05	8,50E-04	1,70E-04
M13	3,20E-05	1,50E-03	2,20E-04	8,00E-05	2,90E-03	2,70E-05
M14	3,00E-07	1,70E-05	1,10E-06	3,50E-06	3,10E-07	7,70E-08
M15	6,00E-03	3,00E-01	2,90E-02	4,20E-03	2,87E+01	1,70E-02

Tabla 16. Indicadores medioambientales para Suecia (Cartelle Barros et al., 2020)

España	Hidroeléctrica	Fotovoltaica	Eólica	Nuclear	Biomasa	Gas natural
M1	4,91E-06	2,13E-04	2,40E-05	4,10E-05	2,20E-03	4,60E-04
M2	7,58E-03	4,57E-02	7,20E-03	5,70E-03	3,50E-02	4,70E-01
M3	1,02E-04	3,00E-02	1,60E-03	1,90E-02	3,80E-02	2,40E-03
M4	2,21E-09	1,17E-07	1,60E-08	3,40E-08	1,30E-05	1,30E-08
M5	1,30E-06	3,74E-05	6,00E-06	1,30E-05	1,10E-03	1,30E-04
M6	1,41E-05	4,03E-04	6,30E-05	9,00E-05	8,30E-03	1,50E-03
M7	3,72E-12	8,00E-10	5,20E-11	8,20E-11	4,10E-10	7,70E-11
M8	1,24E-10	1,01E-08	8,00E-10	4,70E-10	6,50E-08	2,70E-10
M9	2,97E-05	4,77E-03	2,20E-04	3,05E-01	1,50E-03	1,20E-03
M10	4,93E-15	1,20E-12	8,40E-14	6,30E-10	1,60E-13	2,00E-12
M11	3,90E-07	2,62E-05	3,70E-06	2,40E-06	7,10E-05	3,20E-05
M12	3,65E-06	1,36E-04	1,70E-05	2,60E-05	2,20E-03	4,60E-04
M13	2,50E-05	8,90E-04	2,10E-04	7,70E-02	1,00E-01	3,50E-02
M14	2,55E-07	1,02E-05	1,00E-06	3,60E-06	3,00E-07	1,10E-07
M15	4,79E-03	1,92E-01	2,70E-02	8,90E-03	3,36E+01	2,50E-02

Tabla 17. Indicadores medioambientales para España (Cartelle Barros et al., 2020).

3.3 Principales métodos multicriterio de toma de decisiones

Tras definir los indicadores que se usarán en este trabajo hay que relacionarlos entre sí para determinar un solo índice global de sostenibilidad o como se verá más adelante un conjunto de ellos.

El problema es que cada indicador mide distintos valores y, por tanto, tiene sus propias dimensiones y, además pertenecen a distintas dimensiones de la sostenibilidad. Por eso es necesario aplicar el análisis multidimensional.

El análisis multidimensional se define como la capacidad de contextualizar una variable o más variables (medidas) a través del empleo de dimensiones. Las medidas generalmente serán numéricas, aunque pueden presentarse excepciones (Cano, 2010).

Los métodos empleados para el análisis multidimensional serán los métodos multicriterio de toma de decisiones, más conocido por MCDM, por sus siglas en inglés (Multi-Criteria Decision-Making).

El método multicriterio de toma de decisiones es un subcampo de la investigación de operaciones, relacionado con el diseño de herramientas computacionales y matemáticas para respaldar la evaluación subjetiva de los criterios de desempeño por parte de los tomadores de decisiones. Es un conjunto de metodologías que se usa para comparar, seleccionar o clasificar alternativas donde se involucran factores tangibles e intangibles (Magalhaes, 2018).

Estos métodos son muy útiles porque son capaces de comparar elementos muy diferentes entre sí. Como pueden ser el número de fatalidades con el LCOE.

Hwang y Yoon (1981), dividieron los procesos del MCDM en toma de decisiones de atributos múltiples, MADM por sus siglas en inglés (Multiple Attribute Decision-making) y en toma de decisiones de objetivos múltiples MODM, del inglés Multiple Objective Decision-making (figura 45).

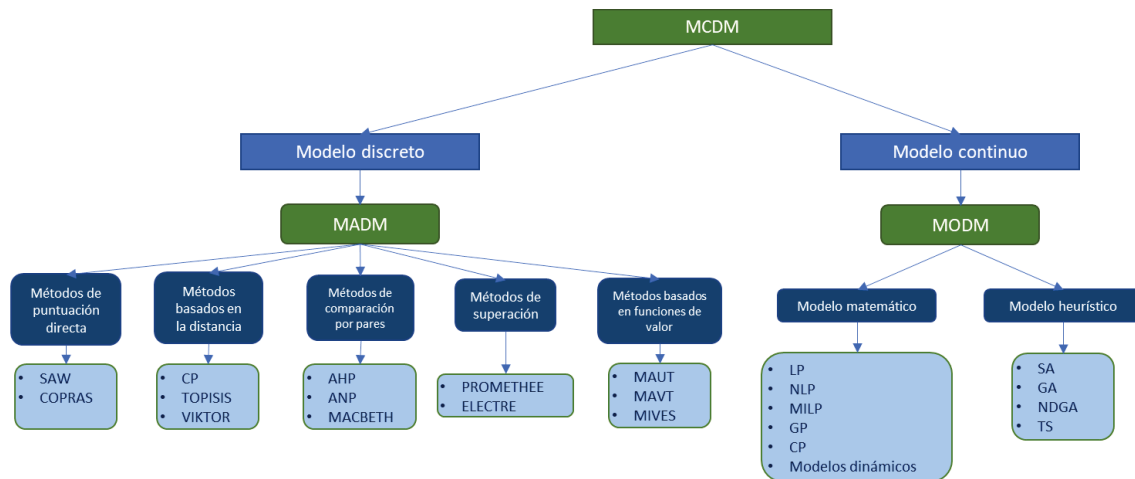


Figura 45. Clasificación MCDM (elaboración propia a partir de Legesse (2021) y Yepes (2018)).

- **MADM**

Es una familia de métodos que se utiliza cuando las alternativas que se van a evaluar son discretas. Es decir, hay un número finito y conocido de alternativas. Una serie de expertos participan en la etapa inicial de la resolución del problema, dando las ponderaciones de los criterios y valorando la importancia de cada uno (Yepes, 2018). En función del tipo de información inicial o dependiendo de los grupos de decisiones, se pueden clasificar de distintas maneras. Según Yepes (2018), la clasificación más común es en los siguientes grupos de métodos:

- **Métodos de puntuación directa.** Son los métodos más sencillos, se basan en evaluar las diferentes alternativas mediante operaciones aritméticas básicas.
- **Métodos de comparación por pares.** Son métodos que se basan en comparar las alternativas entre sí para obtener las ponderaciones de cada uno de los criterios a evaluar.
- **Métodos basados en la distancia.** Calculan la distancia entre cada alternativa y un punto concreto. Dichos punto concreto suele ser una solución ideal o una solución anti-ideal o ambas.
- **Métodos de superación.** Son métodos que se basan en la relación que hay entre las alternativas donde cada una de ellas muestra un grado de dominación sobre las otras respecto a un criterio.
- **Métodos basados en funciones de utilidad o valor.** Definen funciones que determinan el grado de satisfacción de una alternativa respecto a un criterio. Será el método que se usará a lo largo de este trabajo.

- MODM

Es un método que se utiliza para las alternativas continuas. Es decir, las alternativas no están inicialmente determinadas, sino que al seleccionar un valor para cada variable se configura. El número inicial de alternativas es infinito, y no se conoce la mejor hasta que se resuelve el problema. Esto está muy relacionado con la optimización. Las soluciones a este tipo de problemas son aquellas en las que para mejorar en un atributo, es necesario empeorar en otro u otros. Esto se suele denominar frente de Pareto. Las soluciones que pertenecen a dicho frente, se suelen denominar Pareto eficientes o Pareto óptimas. Los métodos MODM se agrupan además en modelos de programación matemática y algoritmos heurísticos basados en el tiempo computacional y la solución.

En la figura 45, se muestra un esquema de la clasificación junto con los métodos de cada grupo mencionado.

El método que se va a emplear está dentro del grupo de métodos basados en funciones de utilidad o valor, MIVES, Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles. El método MIVES es una combinación de técnicas basadas en el árbol de requerimientos, análisis de valor y el Proceso Analítico Jerárquico (De la Cruz et al., 2014).

MIVES es adecuado para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas energéticos tal y como se demostró en la literatura científica existente. Esta técnica, inicialmente determinista, puede combinarse de forma relativamente sencilla con simulación tipo Monte Carlo con el objetivo de considerar la incertidumbre. La incertidumbre se puede considerar en pesos, indicadores y funciones de valor. Sin embargo, en este proyecto sólo se ha considerado en indicadores.

El método MIVES combinado con Monte Carlo (se le suele llamar directamente MIVES – Monte Carlo) se ha programado en Matlab, mientras que el software MIVES se ha empleado como herramienta de apoyo para la definición de las funciones de valor.

3.4 Introducción a MIVES

MIVES es un método multicriterio determinista basado en tres técnicas al mismo tiempo. Combina el árbol de requerimientos con el análisis de valor y la metodología AHP (Proceso Analítico Jerárquico, in inglés, Analytich Hierarchy Process (De la Cruz et al., 2014).

El objetivo de este método es integrar todos los indicadores para obtener un único índice de sostenibilidad y también los subíndices ambiental, social y económico.

La limitación más importante que tiene es que, en su versión original, es determinista, por lo que, desde el punto de vista de los indicadores, sólo permite considerar un único valor de entrada para cada indicador para cada alternativa. Por tanto, no considera la incertidumbre que afecta a las variables probabilistas y que en los modelos de evaluación de la sostenibilidad se podría perder información de gran relevancia. Se tendría que aplicar otros métodos como la simulación Monte Carlo que se detallará más adelante. A este nuevo método se denomina MIVES - Monte Carlo. A continuación, se explica cómo funciona el método MIVES.

3.5 Procedimiento MIVES

El método MIVES contiene los siguientes pasos (Figura 46):

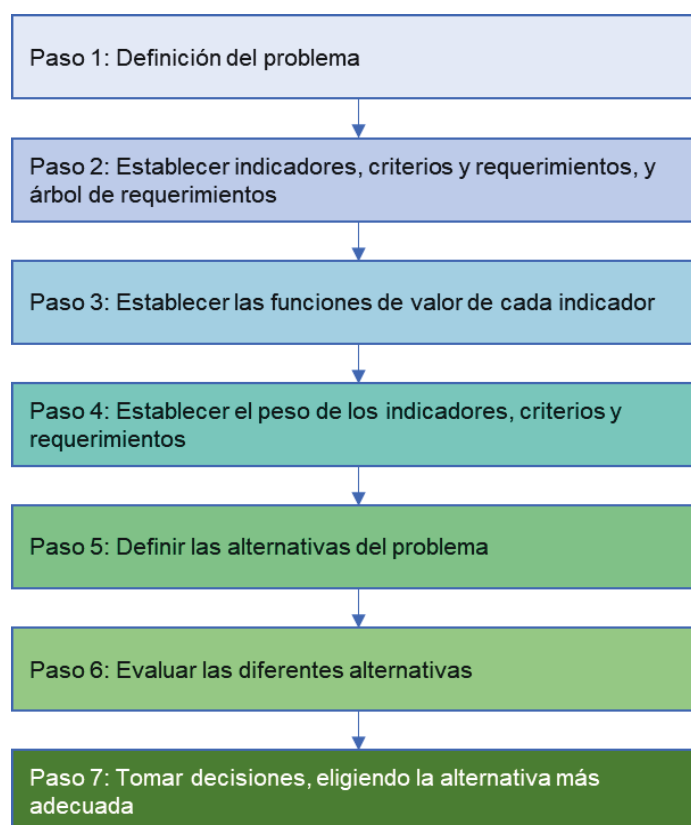


Figura 46. Diagrama de flujo (elaboración propia a partir De la Cruz et al., 2014).

1. **Definición del problema.** Se define el problema a resolver.
2. **Crear un árbol de requerimientos.** Es un esquema jerárquico donde se definen de forma organizada las distintas características del elemento a evaluar. Sirve para ordenar los conceptos y ayuda a comprender el problema. También

estructura los parámetros de la evaluación y los cálculos. El árbol habitualmente tiene tres niveles: requerimientos, criterios e indicadores (Figura 47).

	REQUERIMIENTOS	CRITERIOS	INDICADORES
Índice de sostenibilidad global	Requerimiento Económico (R1)	Criterio E1	Indicador E1.1
	Requerimiento Social (R2)	Criterio S1	Indicador S1.1
		Criterio S2	Indicador S2.1
		Criterio S3	Indicador S3.1
	Requerimiento Medioambiental (R3)	Criterio M1	Indicador M1.1
		Criterio M2	Indicador M2.1
		Criterio M3	Indicador M3.1
		Criterio M4	Indicador M4.1
		Criterio M5	Indicador M5.1
		Criterio M6	Indicador M6.1
		Criterio M7	Indicador M7.1
Criterio M8		Indicador M8.1	

Figura 47. Ejemplo de árbol de requerimientos (elaboración propia a partir De la Cruz et al., 2014)

En el apartado de los requisitos o requerimientos se sitúan los subíndices, que en este caso será económico, social y medioambiental.

En el último irán los indicadores, que son los que se van a medir. Servirán para calcular después cada criterio.

Cada criterio puede tener más de un indicador, aunque en el caso presente cada uno tendrá un único indicador.

3. **Funciones de valor.** Al tener ya el árbol de requerimientos hay que establecer un método de conversión para las distintas magnitudes y unidades de los indicadores en una unidad adimensional común, que se denominará valor o grado de satisfacción. Para poder determinar el grado de satisfacción se parte de una sencilla regla donde 0 representa la mínima satisfacción y 1, la máxima.

Hay que tener en cuenta que se puede considerar no linealidades y también se puede establecer un grado de exigencia en el cumplimiento de un indicador.

En la Figura 48 se puede ver algún ejemplo de tipos de funciones de valor.

La función de valor continua se define mediante cinco parámetros $P_{i,min}$, $P_{i,max}$, n_i , m_i y A_i , en función del autor también se conocen por $X_{i,min}$, $X_{i,max}$, C_i , K_i y P_i , respectivamente. Dependiendo del valor de cada parámetro las funciones continuas de valor se pueden distinguir entre:

- Convexas (a): no se desea que sea exigente y se asigna a cumplimientos mínimos.
- Cóncavas (b): se desea que sea exigente, obteniendo máximas puntuación sólo cerca del nivel máximo de satisfacción.
- Recta (c): se desea un crecimiento proporcional y constante.
- Forma de S (d): el mayor incremento de valor se encuentra en la parte central.

Por otro lado, las funciones discretas se miden a través de etiquetas semánticas y lo que se suele hacer es convertir la etiqueta en una variable

mediante una tabla de puntuación. Un ejemplo sería si la aceptación es muy alta, que se puntuara con 1 y si es muy baja con 0,1.

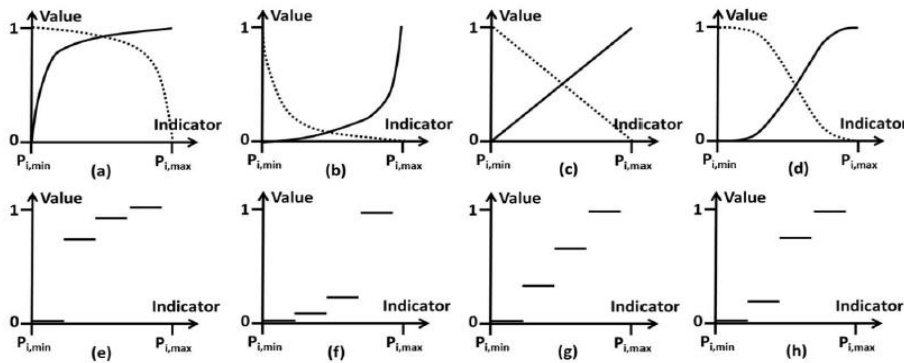


Figura 48. Tipos de función de valor (De la Cruz et al., 2014)

Las funciones de valor vienen dadas por la Ecuación 2, siendo V_i la función de valor de un indicador.

$$V_i = K_i \cdot \left[1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{|P_{i,x} - P_{i,min}|}{n_i} \right)^{A_i}} \right] \quad (2)$$

Donde:

- K_i : factor que se utiliza para que la función se mantenga entre 0 y 1
- $P_{i,x}$: valor del indicador i para la alternativa x .
- $P_{i,min}$: valor en el eje de abscisas que es igual a cero.
- A_i : factor que define la forma de la curva. Es decir, si es cóncava, convexa, lineal o con forma de S.
- m_i : factor que indica cuán lejos se encuentra el punto de inflexión de la ordenada.
- n_i : factor que indica cuán lejos se encuentra el punto de inflexión de la abscisa.

Para calcular el factor K_i , se emplea la Ecuación 3.

Donde:

$$K_i = \frac{1}{\left[1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{|P_{i,max} - P_{i,min}|}{n_i} \right)^{A_i}} \right]} \quad (3)$$

- $P_{i,max}$: valor en el eje de abscisas que es igual a uno en el caso de las funciones crecientes.
- Las demás variables son las mismas que las definidas para la Ecuación 2.

Por tanto, si sustituimos la Ecuación 3 en la 2, se obtiene la Ecuación 4, que es la que se emplea para calcular la función de valor para cada indicador.

$$V_i = \frac{\left[1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{|P_{i,x} - P_{i,min}|}{n_i} \right)^{A_i}} \right]}{\left[1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{|P_{i,max} - P_{i,min}|}{n_i} \right)^{A_i}} \right]} \quad (4)$$

Una vez determinado como se calculan las funciones de valor de cada indicador, se consigue uniformidad en las dimensiones y ahora se puede operar con los indicadores directamente.

4. **Pesos o importancia relativos.** Al estar las funciones de valor ya definidas, es necesario definir los valores de α , β y γ que son las preferencias de los decisores respecto a cada requerimiento, criterio e indicador, respectivamente. Para ello se puede usar valores numéricos establecidos por expertos en el campo, pero también se pueden aplicar métodos de cálculo como:
 - a. Método de las proporciones. Se fija una importancia relativa y se establece la importancia del resto por comparación con el primero fijado.
 - b. Metodología AHP. Se comparan por pares, dos a dos, de la importancia relativa.
5. **Definición de alternativas.** Definir las diferentes alternativas para resolver el problema.

Evaluación de alternativas. Una vez realizado todos los pasos anteriores se procede al cálculo de cada alternativa

Si se tiene que V_i es la función de valor de cada indicador y suponiendo que tiene una γ preferencia sobre los otros indicadores se puede sumar directamente y obtener el V_c de cada criterio, como se muestra en la Ecuación 5, siendo i el número de indicadores:

$$V_c = \sum_i^N \gamma_i \cdot V_i \quad (5)$$

De igual manera se obtendría el valor de V_r de cada requerimiento, pero utilizando los valores obtenidos de los criterios previamente calculados junto con la β preferencia de cada criterio (Ecuación 6), siendo c el número de criterios:

$$V_r = \sum_c^N \beta_r \cdot V_c, \quad (6)$$

Finalmente, el índice de sostenibilidad (IS), se calcula teniendo en cuenta la α preferencia de cada requerimiento, Ecuación 7, siendo r el número de requerimientos:

$$IS = \sum_r^N \alpha_r \cdot V_r \quad (7)$$

Resumiendo, se puede aplicar directamente la Ecuación 8 para calcular el índice de sostenibilidad, IS:

$$IS = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \quad (8)$$

6. **Toma de decisiones.** Los diseñadores del modelo o el tomador de decisiones elegirán qué opción es la mejor que cumpla con todos los requisitos existentes.

3.6 MIVES – Monte Carlo

El método Monte Carlo es un método probabilista (no determinista) usado para resolver problemas que de manera analítica serían muy complejos resolverlos. Las aplicaciones del método son muy amplias, desde estimar la confiabilidad de las redes de comunicación hasta realizar estudios de mercado.

Mediante la simulación de Monte Carlo lo que se hará es simular el modelo descrito anteriormente con la ayuda de números pseudo-aleatorios generados de acuerdo a distribuciones de probabilidad que, en este caso, sólo se han definido para ciertos indicadores del modelo. Aclarar, que podrían definirse también para los pesos o para los parámetros de las funciones de valor.

Los pasos a seguir del método MIVES – Monte Carlo son los siguientes, Figura 50 (De la Cruz et al, 2014):

Paso 1. Identificación de parámetros probabilistas. Hay que elegir que variables del modelo pueden tener un comportamiento probabilístico. Las variables probabilísticas pueden incluir indicadores, pesos y de función de valor.

Paso 2 y Paso 3. Establecimiento de los valores deterministas y los valores probabilistas. Estimar los valores de las variables deterministas y probabilísticas para el modelo. Una parte de las variables del modelo casi siempre debe estimarse utilizando el juicio de expertos. Las oportunidades y los riesgos deben identificarse mediante procesos adecuados de identificación de incertidumbres. En el caso de los valores probabilistas, hay que asignar una función de distribución a cada uno de los parámetros. En la Figura 49 puede encontrar las distribuciones que se suelen emplear de forma habitual en los modelos.

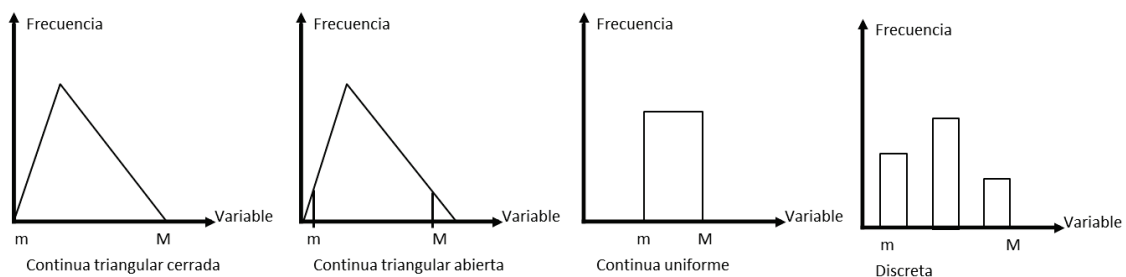


Figura 49. Ejemplos de funciones de distribución (De la Cruz et al., 2014)

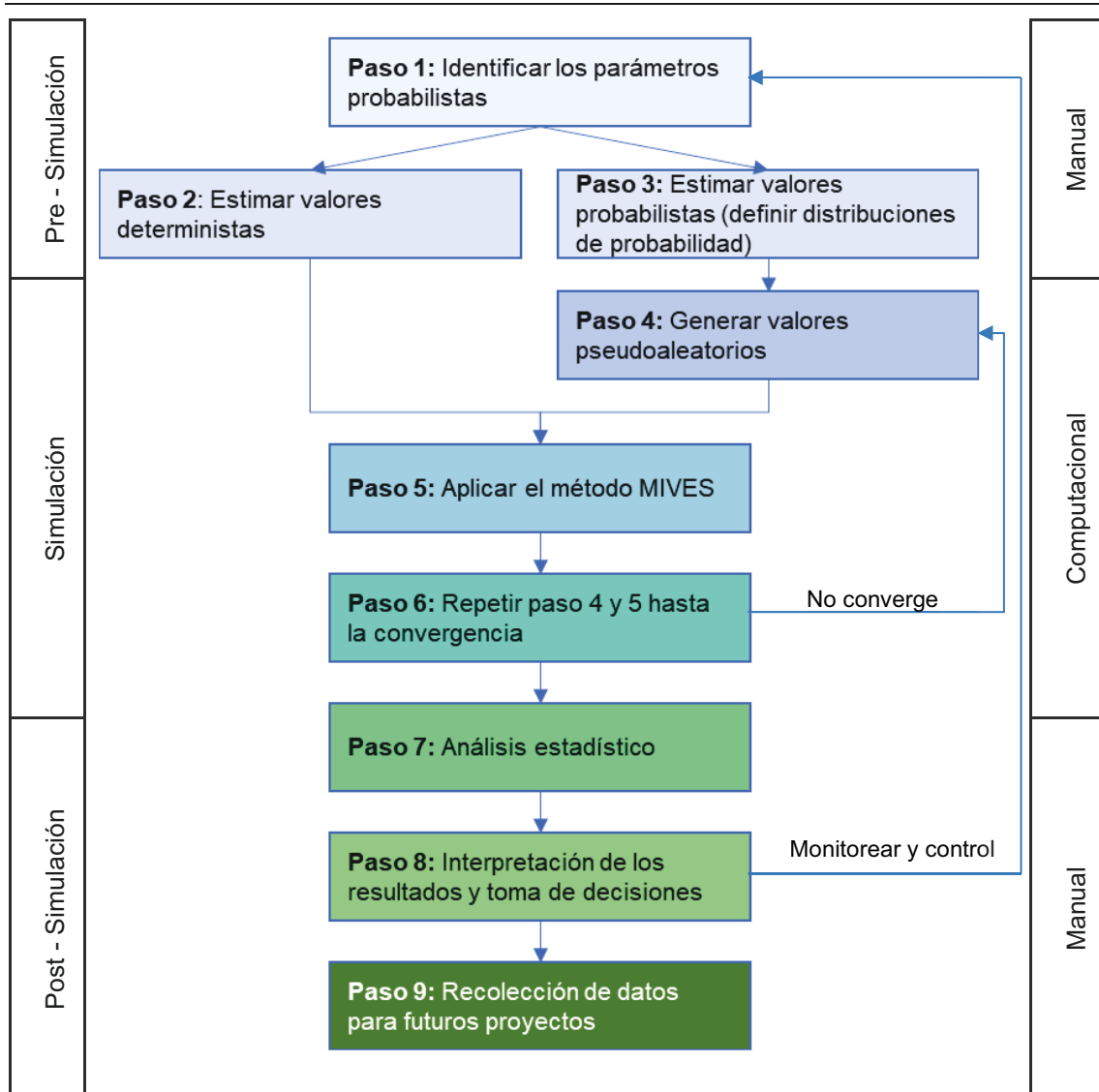


Figura 50. Diagrama de flujo el método MIVES-Monte Carlo (De la Cruz et al., 2014)

Paso 4. Generación de números aleatorios (pseuo). En cada iteración se generarán números pseudo-aleatorios de acuerdo a las distribuciones definidas, para cada una de las variables probabilistas. Para poder generar la aleatoriedad se empleará Matlab. Las distribuciones de probabilidad más frecuentes están en la Figura 49, que son las más sencillas.

- Triangular cerrada (para variables continuas)
- Triangular abierta (para variables abiertas)
- Uniforme (para variables continuas)
- Discreta

En este trabajo se va a considerar la distribución triangular cerrada para los indicadores probabilistas y para poder conseguir un número pseudo-aleatorio se usará el método de la transformación inversa.

El procedimiento a seguir es, partiendo de la función de densidad $f(x)$ (Figura 51) conociendo los valores de a (mínimo), b (moda) y c (máximo). Integrar la función de $f(x)$ por tramos desde menos infinito hasta x . Con esto se consigue la distribución de probabilidad triangular $F(x)$ (Ecuación 9). Y en realidad lo que permite es que $F(x)$ mida la probabilidad de que la variable sea menor o igual que un determinado valor x . Es decir, una probabilidad acumulada.

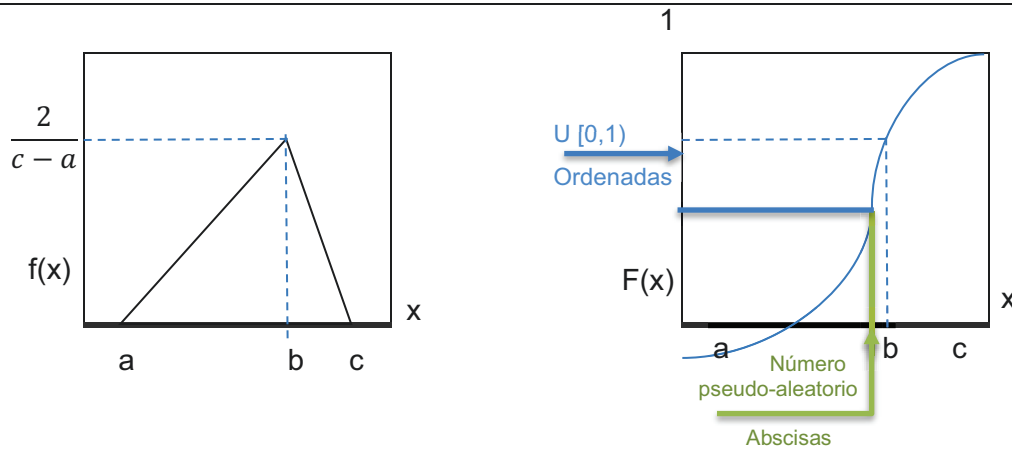


Figura 51. Función triangular (elaboración propia a partir de Cartelle Barros et al. (2021))

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a) \cdot (c-a)}, & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 - \frac{(c-a)^2}{(c-b) \cdot (c-a)}, & \text{si } b \leq x \leq c \\ 1, & \text{si } x > c \end{cases} \quad (9)$$

Aplicando el método de la transformación inversa se obtiene la ecuación 10:

$$X = \begin{cases} a + \sqrt{F(x) \cdot (b-a) \cdot (c-a)}, & \text{si } 0 \leq F(x) \leq \frac{(b-a)}{(c-a)} \\ c - \sqrt{(1-F(x)) \cdot (c-a) \cdot (c-b)}, & \text{si } \frac{(b-a)}{(c-a)} \leq F(x) \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

Siendo:

- X: número pseudo-aleatorio que está comprendido en el rango dado.
- F(x): a efectos prácticos, es un número pseudo-aleatorio comprendido entre 0 y 1, proporcionado en este caso por Matlab.

Paso 5. Evaluación Método MIVES. Con los valores pseudo-aleatorios obtenidos en el paso anterior junto con los valores deterministas se evalúa el método MIVES, explicado en el apartado 3.5 de este proyecto.

Paso 6. Simulación: se realizan las iteraciones obteniéndose un IS en cada una de ellas. Se podría hacer un número de iteraciones infinito. Sin embargo, llega un momento en el que realizar más iteraciones no aporta información de valor a los resultados. Cuando esto ocurre, se dice que se ha alcanzado la convergencia. En este caso se ha

definido una exigencia (tolerancia) para alcanzar la convergencia y se ha estimado un número máximo de iteraciones por si no se llega a cumplir la tolerancia definida.

Paso 7. Análisis estadístico sobre el conjunto de índices de sostenibilidad (IS) que se generaron en el paso anterior. Una vez terminada la simulación se puede obtener el resultado de distintos parámetros estadísticos: mínimo, máximo, media, desviación estándar, moda, entre otros. En este caso se obtendrá también la curva de probabilidad acumulada y el histograma de frecuencias.

Paso 8. Interpretación y toma de decisiones. En este paso se asegura que los resultados obtenidos se ajustan a la solución final. De no ser así habría que volver a empezar.

Paso 9. Recogida de datos. Se guardan los datos para producir una base de datos histórica, que en un futuro permitirá perfeccionar el modelo con mayor eficacia.

En el siguiente capítulo se detallará como se ha seguido cada uno de los pasos, tanto del método MIVES, como de la simulación de Monte Carlo.

4 APLICACIÓN DEL MÉTODO MIVES – MONTE CARLO

4.1 Aplicación del Método MIVES

4.1.1 Identificación del problema

Calcular el índice de sostenibilidad (IS) para cada tipo de fuente de energía eléctrica en España y en Suecia. Para elegir las fuentes del estudio lo primero que se ha tenido en cuenta es que estuviesen presentes en ambos países. Las fuentes elegidas para el estudio son:

- Hidroeléctrica: Es la principal fuente renovable en Suecia.
- Fotovoltaica: Es una fuente que se encuentra en crecimiento en ambos países.
- Eólica: Es la principal fuente renovable en España.
- Nuclear: España ha tomado la decisión de cerrar este tipo de centrales, a diferencia de Suecia, que todavía no tiene un cierre programado.
- Biomasa: Es una fuente principal en Suecia.
- Gas Natural: Es una fuente principal en España.

4.1.2 Árbol de requerimientos

Una vez que ya se conocen todos los indicadores del estudio se procede a construir el árbol de requerimientos, como se muestra en la Figura 52.

REQUERIMIENTOS	CRITERIOS	INDICADORES
ECONÓMICO	LCOE	LCOE
SOCIAL	Aceptación social	Aceptación
	Accidentes	Nº Accidentes
	Empleo	Empleo
MEDIOAMBIENTAL	Acidificación	Acidificación
	Cambio climático	Cambio climático
	Ecotoxicidad agua dulce	Ecotoxicidad agua dulce
	Eutrofización agua dulce	Eutrofización agua dulce
	Eutrofización marina	Eutrofización marina
	Eutrofización terrestre	Eutrofización terrestre
	Toxicidad humana, cáncer	Toxicidad humana, cáncer
	Toxicidad humana, no cáncer	Toxicidad humana, no cáncer
	Radiaciones ionizantes	Radiaciones ionizantes
	Disminución de ozono	Disminución de ozono
	Partículas	Partículas
	Creación de ozono fotoquímico	Creación de ozono fotoquímico
	Consumo de recursos, agua	Consumo de recursos, agua
	Consumo de recursos, minerales, fósiles y renovables	Consumo de recursos, minerales, fósiles y renovables
Uso de la tierra (LANCA)	Uso de la tierra (LANCA)	

Figura 52. Árbol de requerimientos (elaboración propia de Cartelle Barros et al., 2020))

En la Tabla 18 y 19 se muestran las características principales de los indicadores empleados en este trabajo, así como las unidades de medida, si se trata de un indicador discreto o continuo y si se trata de un indicador determinista o probabilista:

INDICADORES	Unidades de medida	Discreto/ Continuo	Determinista/ Probabilista
LCOE	[€/MWh]	Continuo	Probabilista
Aceptación	---- Cualitativo	Discreto	Probabilista
Nº de accidentes	[fatalidades/TWh]	Continuo	Probabilista
Empleo	[trabajadores/MWh]	Continuo	Probabilista
Acidificación	[Mole of H+ eq./kWh]	Continuo	Determinista
Cambio climático	[kg CO2-Equiv. /kWh]	Continuo	Determinista
Ecotoxicidad agua dulce	[CTUe/kWh]	Continuo	Determinista
Eutrofización agua dulce	[kg P eq/kWh]	Continuo	Determinista
Eutrofización marina	[kg N-Equiv. /kWh]	Continuo	Determinista
Eutrofización terrestre	[Mole of N eq. /kWh]	Continuo	Determinista
Toxicidad humana, cáncer	[CTUh/kWh]	Continuo	Determinista
Toxicidad humana, no cáncer	[CTUh/kWh]	Continuo	Determinista
Radiaciones ionizantes	[kBq U235 eq/kWh]	Continuo	Determinista
Disminución de ozono	[kg CFC-11 eq/kWh]	Continuo	Determinista
Partículas	[kg PM2,5-Equiv. /kWh]	Continuo	Determinista
Creación de ozono fotoquímico	[kg NMVOC/kWh]	Continuo	Determinista
Consumo de recursos, agua	[m³ eq. /kWh]	Continuo	Determinista
Consumo de recursos, minerales, fósiles y renovables	[kg Sb-Equiv. /kWh]	Continuo	Determinista
Uso de la tierra (LANCA)	puntos/kWh	Continuo	Determinista

Tabla 18. Propiedades de los indicadores del modelo (elaboración propia a partir de Cartelle Barros et al., 2020)

Respuesta	Valor
MB (Muy bajo)	0,1
B (Bajo)	0,3
M-A (Medio-Alto)	0,7
MA (Muy alto)	1,0

Tabla 19. Respuestas y valores equivalentes del indicador discreto Aceptación (elaboración propia)

4.1.3 Definición de las funciones de valor

Para definir las diferentes funciones de valor se ha utilizado el software MIVES. Se introducen los valores de mínima y máxima satisfacción para cada indicador junto con una geometría que se pretende generar (cóncava, convexa, forma de S). Los valores de funciones de valor son los parámetros A, m y n, junto con los valores mínimo y máximo.

Para el indicador económico, **LCOE**, se ha decidido por una función decreciente en forma de S (Figura 53). Se ha ajustado para que valores altos de LCOE determinen una satisfacción mínima y que sea exigente para valores altos de LCOE. Es decir, necesita que se tome distancia del valor máximo para que la satisfacción aumente. Para valores bajos de LCOE, la satisfacción se quiere que sea alta y que no sea tan exigente, a medida que se tome distancia del valor mínimo, la satisfacción seguirá siendo buena.

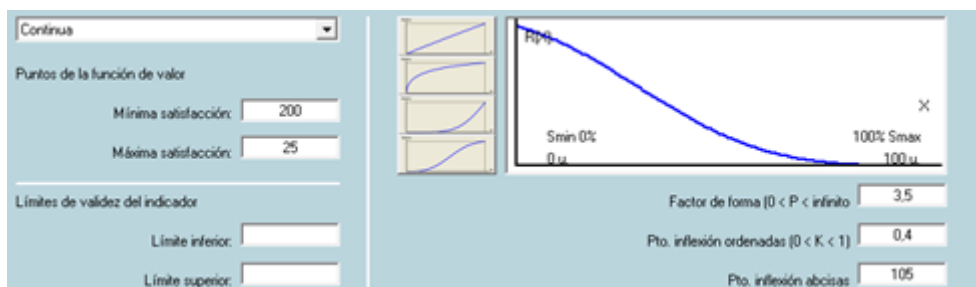


Figura 53. Definición de la función de valor del indicador LCOE (elaboración propia)

Para el indicador discreto, **aceptación**, se ha decidido establecer 4 niveles: muy baja (MB), baja (B), media alta (M-A) y muy alta (MA). Los valores asociados a cada etiqueta se pueden ver tanto en la Tabla 19 como en la Figura 54.

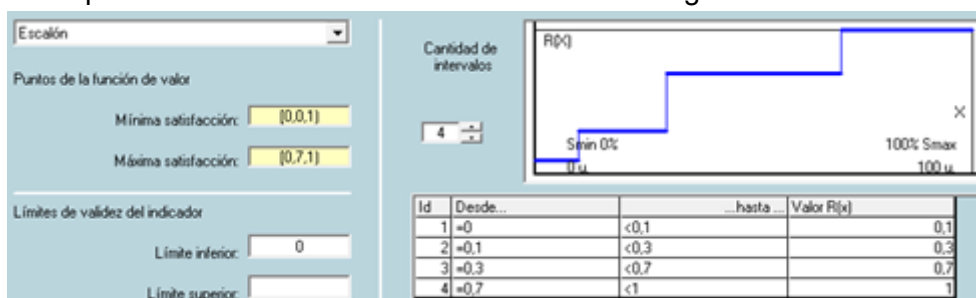


Figura 54. Definición de la función de valor del indicador aceptación (elaboración propia)

Para el indicador de **accidentes fatídicos** se ha usado una función cóncava decreciente, Figura 55. Se ha querido ser muy exigentes para valores próximos al valor máximo. Dando así valores de satisfacción alta para los casos cercanos a cero y, por el contrario, calificando severamente a los que se alejen del mínimo, que como se observa casi la mitad de la función de valor es 0.

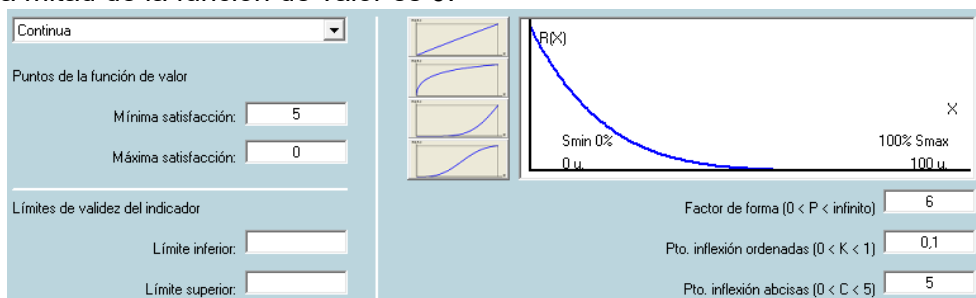


Figura 55. Definición de la función de valor del indicador accidentes (elaboración propia)

Para el indicador del **empleo** se ha usado una función en forma de S creciente, Figura 56. El mayor incremento del valor se encuentra en la parte central. Los valores próximos a los límites son poco exigentes, de hecho, hay un tramo muy grande en el límite superior dónde es prácticamente una línea recta.

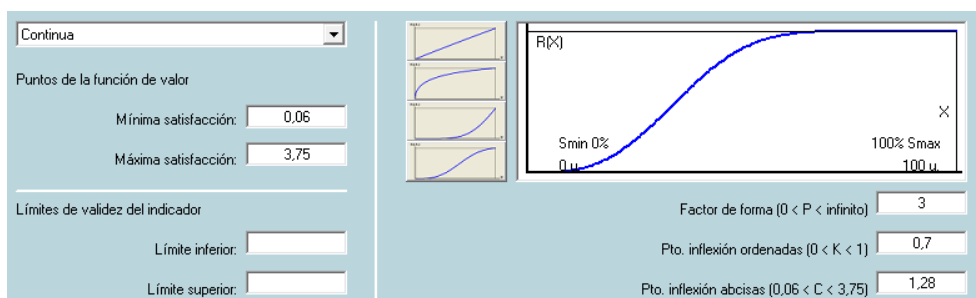


Figura 56. Definición de la función de valor del indicador empleo (elaboración propia)

Para el resto de los indicadores (Figura 57) se ha decidido usar las funciones de valor usadas por Cartelle Barros et al., (2020).

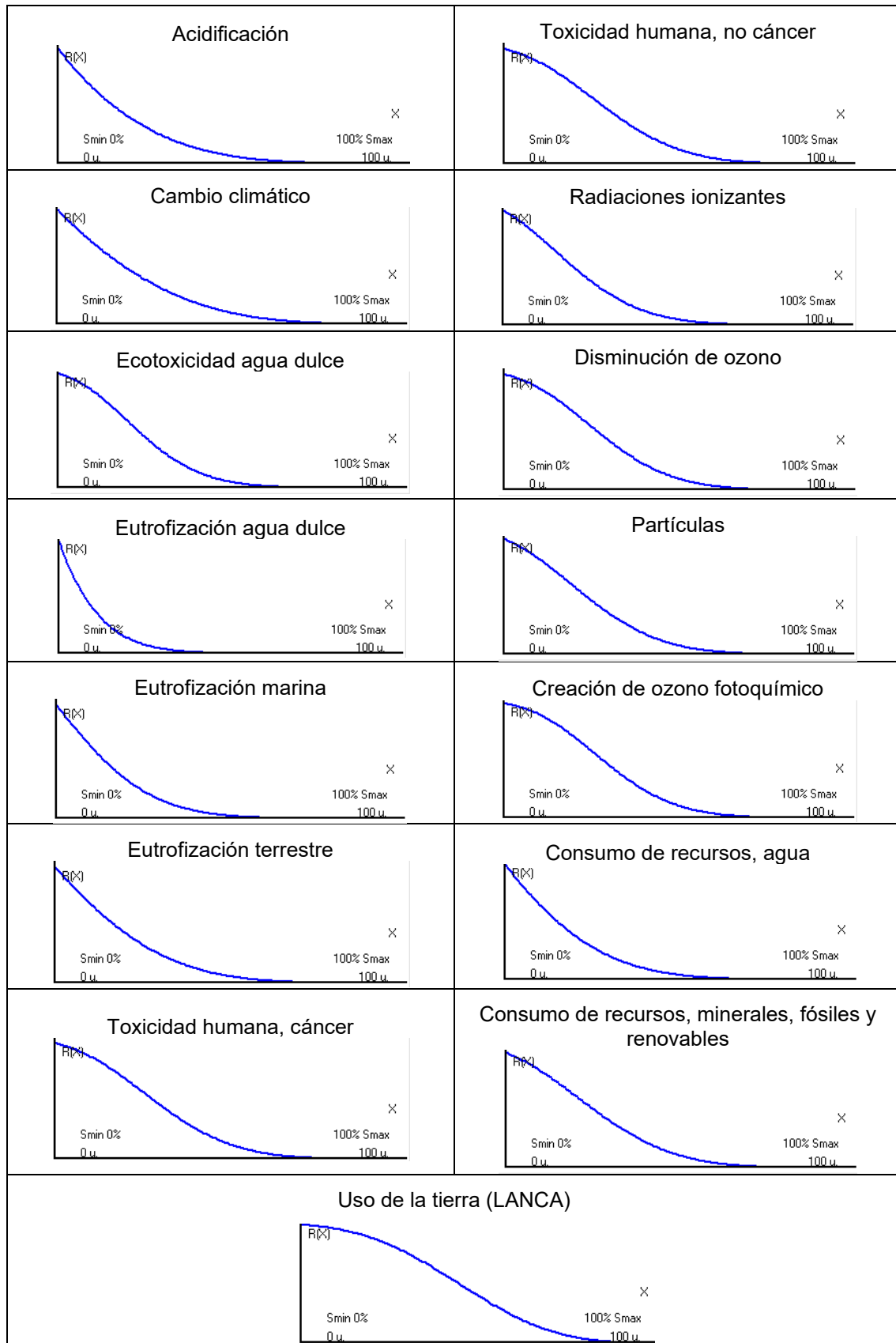


Figura 57. Funciones de valor de los indicadores medioambientales (elaboración propia a partir de Cartelle Barros et al., 2020)

En la Tabla 20 se encuentra el resumen de parámetros de todas las funciones continuas de valor utilizadas en el proyecto. Los parámetros de la función discreta están en la Tabla 19, anteriormente mostrada.

INDICADORES	P_{min}	P_{max}	n	m	A	Tendencia	Geometría
LCOE	200	25	105	0,4	3,5	Decreciente	s
Nº de accidentes	5	0	6	0,01	5	Decreciente	cóncava
Empleo	0,06	3,75	1,3	0,7	3	Creciente	s
Acidificación	7,00E-03	2,00E-05	4	0,05	7,00E-03	Decreciente	cóncava
Cambio climático	1,20E+00	1,00E-02	3,5	0,1	9,00E-01	Decreciente	cóncava
Ecotoxicidad agua dulce	1,00E+00	0,00E+00	6	0,1	5,00E-01	Decreciente	s
Eutrofización agua dulce	1,00E-05	1,00E-08	9	0,1	1,00E-05	Decreciente	cóncava
Eutrofización marina	1,60E-03	1,00E-05	6	0,5	1,45E-03	Decreciente	cóncava
Eutrofización terrestre	2,10E-02	1,00E-04	4,5	0,3	1,80E-02	Decreciente	cóncava
Toxicidad humana, cáncer	1,00E-08	0,00E+00	4,5	0,2	5,50E-09	Decreciente	s
Toxicidad humana, no cáncer	4,00E-08	0,00E+00	4,5	0,2	2,20E-08	Decreciente	s
Radiaciones ionizantes	1,00E-02	1,00E-04	5,5	0,2	6,50E-03	Decreciente	s
Disminución de ozono	4,00E-12	0,00E+00	5	0,1	2,00E-12	Decreciente	s
Partículas	5,00E-04	1,00E-06	5	0,1	2,60E-04	Decreciente	s
Creación de ozono fotoquímico	3,50E-03	1,00E-05	5	0,1	1,70E-03	Decreciente	s
Consumo de recursos, agua	5,00E-02	1,00E-04	5	0,3	4,50E-02	Decreciente	cóncava
Consumo de recursos, minerales, fósiles y renovables	1,00E-05	0,00E+00	4,5	0,1	5,00E-06	Decreciente	s
Uso de la tierra (LANCA)	1,00E+00	0,00E+00	3	0,5	5,00E-01	Decreciente	s

Tabla 20. Parámetros de las funciones de valor (elaboración propia a partir de elaboración propia basada en Cartelle Barros et al., 2020)

4.1.4 Elección de pesos

Todas aquellas ramas del árbol de requerimientos (Figura 52) que tengan un único elemento, el peso de dicho elemento será del 100%. Este es caso de todos los indicadores en el modelo propuesto.

Para el peso de cada criterio, en los medioambientales se ha usado el artículo de Cartelle Barros et al. (2020). Para el económico no es necesario al tener un solo criterio y para los sociales se han discutido los valores posibles y se ha llegado a una decisión que se puede ver en la Tabla 21.

En el peso de los requerimientos está basado en la publicación, Assessing the global sustainability of different electricity generation systems de Cartelle Barros et al. (2015).

Peso (α)	REQUERIMIENTOS	Peso (β)	CRITERIOS	Peso (γ)	INDICADORES
28%	ECONÓMICO	100%	LCOE	100%	LCOE
33%	SOCIAL	15%	Aceptación social	100%	Aceptación social
		55%	Accidentes	100%	Accidentes
		30%	Empleo	100%	Empleo
39%	MEDIOAMBIENTAL	7%	Acidificación	100%	Acidificación
		11%	Cambio climático	100%	Cambio climático
		8%	Ecotoxicidad agua dulce	100%	Ecotoxicidad agua dulce
		6%	Eutrofización agua dulce	100%	Eutrofización agua dulce

	1%	Eutrofización marina	100%	Eutrofización marina
	1%	Eutrofización terrestre	100%	Eutrofización terrestre
	1%	Toxicidad humana, cáncer	100%	Toxicidad humana, cáncer
	8%	Toxicidad humana, no cáncer	100%	Toxicidad humana, no cáncer
	7%	Radiaciones ionizantes	100%	Radiaciones ionizantes
	8%	Disminución de ozono	100%	Disminución de ozono
	8%	Partículas	100%	Partículas
	8%	Creación de ozono fotoquímico	100%	Creación de ozono fotoquímico
	10%	Consumo de recursos, agua	100%	Consumo de recursos, agua
	8%	Consumo de recursos, minerales, fósiles y renovables	100%	Consumo de recursos, minerales, fósiles y renovables
	8%	Uso de la tierra (LANCA)	100%	Uso de la tierra (LANCA)

Tabla 21. Elección del peso (elaboración propia a partir de Cartelle Barros et al, 2015; Cartelle Barros et al, 2020)

4.1.5 Definición de alternativas

Las alternativas se van a dividir inicialmente en dos bloques las centrales de España y las centrales de Suecia. A continuación, se adjuntan los datos (valores de entrada que toman los indicadores) utilizados para ambos países.

España	Hidroeléctrica	Fotovoltaica	Eólica	Nuclear	Biomasa	Gas natural
M1	4,91E-06	2,13E-04	2,40E-05	4,10E-05	2,20E-03	4,60E-04
M2	7,58E-03	4,57E-02	7,20E-03	5,70E-03	3,50E-02	4,70E-01
M3	1,02E-04	3,00E-02	1,60E-03	1,90E-02	3,80E-02	2,40E-03
M4	2,21E-09	1,17E-07	1,60E-08	3,40E-08	1,30E-05	1,30E-08
M5	1,30E-06	3,74E-05	6,00E-06	1,30E-05	1,10E-03	1,30E-04
M6	1,41E-05	4,03E-04	6,30E-05	9,00E-05	8,30E-03	1,50E-03
M7	3,72E-12	8,00E-10	5,20E-11	8,20E-11	4,10E-10	7,70E-11
M8	1,24E-10	1,01E-08	8,00E-10	4,70E-10	6,50E-08	2,70E-10
M9	2,97E-05	4,77E-03	2,20E-04	3,05E-01	1,50E-03	1,20E-03
M10	4,93E-15	1,20E-12	8,40E-14	6,30E-10	1,60E-13	2,00E-12
M11	3,90E-07	2,62E-05	3,70E-06	2,40E-06	7,10E-05	3,20E-05
M12	3,65E-06	1,36E-04	1,70E-05	2,60E-05	2,20E-03	4,60E-04
M13	2,50E-05	8,90E-04	2,10E-04	7,70E-02	1,00E-01	3,50E-02
M14	2,55E-07	1,02E-05	1,00E-06	3,60E-06	3,00E-07	1,10E-07
M15	4,79E-03	1,92E-01	2,70E-02	8,90E-03	3,36E+01	2,50E-02

Tabla 22. Indicadores medioambientales España (elaboración propia a partir Cartelle Barros et al, 2015)

Suecia	Hidroeléctrica	Fotovoltaica	Eólica	Nuclear	Biomasa	Natural gas
M1	6,30E-06	4,00E-04	2,60E-05	3,60E-05	1,20E-03	1,50E-04
M2	1,40E-02	7,90E-02	7,70E-03	4,50E-03	4,00E-02	4,90E-01
M3	1,40E-04	5,20E-02	1,70E-03	2,40E-02	3,80E-02	2,10E-04
M4	3,00E-09	2,00E-07	1,70E-08	3,20E-08	1,00E-05	8,50E-09
M5	2,00E-06	6,40E-05	6,40E-06	1,20E-05	6,20E-04	5,60E-05
M6	1,80E-05	6,90E-04	6,80E-05	7,70E-05	3,50E-03	6,40E-04
M7	5,00E-12	1,40E-09	5,60E-11	3,30E-11	3,00E-10	2,90E-11
M8	1,60E-10	1,70E-08	8,00E-10	4,90E-10	5,30E-08	9,10E-11
M9	4,00E-05	8,20E-03	2,30E-04	4,60E-01	2,00E-03	1,00E-03
M10	6,10E-15	1,90E-12	8,90E-14	6,00E-12	2,10E-13	1,40E-14
M11	4,90E-07	4,00E-05	3,90E-06	2,20E-06	5,90E-05	1,00E-05
M12	4,80E-06	2,30E-04	1,80E-05	2,30E-05	8,50E-04	1,70E-04
M13	3,20E-05	1,50E-03	2,20E-04	8,00E-05	2,90E-03	2,70E-05
M14	3,00E-07	1,70E-05	1,10E-06	3,50E-06	3,10E-07	7,70E-08
M15	6,00E-03	3,00E-01	2,90E-02	4,20E-03	2,87E+01	1,70E-02

Tabla 23. Indicadores medioambientales Suecia (elaboración propia Cartelle Barros et al, 2015)

A continuación, en la Tabla 24 se muestran los valores correspondientes para el indicador discreto, tanto para España como para Suecia:

España	PMB	PB	PM-A	PMA
Hidroeléctrico	0,01	0,07	0,54	1,00
Solar	0,06	0,14	0,51	1,00
Eólica	0,09	0,25	0,67	1,00
Nuclear	0,67	0,86	0,95	1,00
Biomasa	0,29	0,60	0,89	1,00
Gas natural	0,48	0,80	0,95	1,00
Suecia	PMB	PB	PM-A	PMA
Hidroeléctrico	0,01	0,07	0,54	1,00
Solar	0,01	0,02	0,14	1,00
Eólica	0,02	0,10	0,36	1,00
Nuclear	0,22	0,52	0,80	1,00
Biomasa	0,04	0,18	0,55	1,00
Gas natural	0,23	0,56	0,85	1,00

Tabla 24. Indicadores discretos (elaboración propia a partir de YouGov (2021), Jönsson y Holmberg, 2021)

En la Tabla 25, se muestran los valores correspondientes a los indicadores probabilistas LCOE y aceptación para cada país, se indican los valores mínimos, máximos y modas. En la Tabla 26, se muestran los mismos parámetros, pero para el indicador accidentes, que se considera el mismo para los dos países. La fuente de estos datos se encuentra dentro de los apartados 3.2.1 Indicadores económicos e 3.2.2 Indicadores sociales de este presente trabajo.

Suecia	LCOE			Empleo		
	min	max	moda	min	max	moda
Hidroeléctrico	42	52	43	0,06	0,09	0,07
Solar	79	106	91	2,10	42,99	2,60
Eólica	35	63	36	0,13	0,88	0,32
Nuclear	69	97	84	2,42	3,28	2,80
Biomasa	58	115	82	1,85	2,99	1,90
Gas natural	57	74	67	0,16	1,14	0,16
España	min	max	moda	min	max	moda
Hidroeléctrico	35	123	46	0,27	0,53	0,33
Solar	124	154	132	0,27	2,02	0,82
Eólica	53	115	53	0,35	0,76	0,35
Nuclear	42	102	69	2,23	2,36	2,33
Biomasa	117	196	154	3,38	5,51	4,30
Gas natural	42	107	52	0,12	1,52	0,12

Tabla 25. Indicadores probabilistas LCOE y aceptación para España y Suecia (elaboración propia)

Europa	Accidentes		
	min	max	moda
Hidroeléctrico	3,91E-04	0,06	0,02
Solar	1,14E-03	0,29	0,01
Eólica	7,72E-04	0,72	0,21
Nuclear	1,00E-06	0,15	1,00E-06
Biomasa	1,71E-03	4,63	2,36
Gas natural	5,08E-03	2,82	0,91

Tabla 26. Indicador probabilista accidentes para España y Suecia (elaboración propia)

4.2 Evaluación de la sostenibilidad

Una vez que se tenga todos los datos se procede a la evaluación. En este momento se puede utilizar cualquier tipo de programa. Los más habituales son MIVES, Excel (utilizando Risk para los valores probabilistas) y Matlab.

Se ha decidido utilizar Matlab debido a que ofrece mayor libertad al desarrollador a la hora de definir ciertos parámetros como los relativos a la convergencia y también permite definir como probabilistas pesos y funciones de valor, aspecto que todavía no está implementado en el software MIVES. Aunque en este trabajo no se han tenido en cuenta pesos y funciones de valor probabilistas, se descarta poder realizarlo en el futuro.

4.3 MIVES - MONTE CARLO - Matlab

Para realizar la evaluación se han creado 5 funciones:

Función 1: Generador de números pseudo-aleatorios

```
function x=PRNG_triangular(a,b,c)
```

Esta función recibe los valores de la distribución de probabilidad triangular de manera que a es mínimo valor, b es moda y c es máximo valor, y devuelve un número pseudo-aleatorio que esté comprendido en el rango dado y de acuerdo a la geometría de la distribución triangular. El valor aleatorio se crea utilizando la función de Matlab "rand" que crea valores comprendidos entre 0 y 1.

Aplicando el método de la transformación inversa se obtiene el valor aleatorio de acuerdo con la distribución de probabilidades.

Función 2: Función de valor continua

```
function V=FVcontinua(Px,Pmin,Pmax,n,m,A,c)
```

Esta función tiene como valores de entrada Px que es el valor de entrada a la función de valor, Pmin es el valor mínimo que devuelve un 0, Pmax es el valor máximo que devuelve un 1, n, m y a son parámetros que se han definido previamente y que indican la geometría de la función de valor, y c que indica si es creciente o decreciente.

Con la función 2 lo que se pretende es que devuelva es un valor comprendido entre 0 y 1, que indique el grado de satisfacción del valor de entrada introducido. Esta función se corresponde con la Ecuación 10 de la función de valor.

Función 3: Función de valor discreta

```
function V=FVdiscreta(respuesta,Nsat,N)
```

Esta función tiene tres valores de entrada. La primera, respuesta, es un número que hace referencia a una etiqueta semántica, N es el número de etiquetas semánticas y Nsat es un vector con los niveles de satisfacción asociados a las posibles respuestas.

En función del valor introducido (respuesta), es el nivel de satisfacción asociado a la etiqueta semántica correspondiente.

Función 4: Cálculo de IS de una alternativa (MIVES)

```
function IS=CentralPAIS
```

El cálculo se divide en 3 apartados, uno por cada requerimiento, económico, social y medioambiental.

En el **económico** para el cálculo de LCOE se necesita llamar a la función 1, porque se trata de un indicador probabilista. De esta manera se crea un valor aleatorio para el LCOE según la distribución de probabilidades dada.

Con el valor aleatorio calculado se usa la función 2 porque la función de valor del indicador LCOE es continua.

Como sólo se tiene un criterio para el ámbito económico, este requerimiento quedaría ya calculado. Solo faltaría aplicarle la ponderación correspondiente al valor de α .

En el ámbito **social**, para el criterio de accidentes y empleo se repetirá el mismo procedimiento explicado anteriormente para el LCOE.

Para el criterio de aceptación social, se creará un valor aleatorio con la función rand y después se comprobará en que grupo semántico se encuentre. Una vez determinado un valor de 1, 2, 3 o 4, se utiliza la función 3, la función de valor discreta, que devuelve el grado de satisfacción.

Un ejemplo de cálculo para la aceptación en el caso de la central nuclear puede ser el siguiente. Partiendo de que 0,4218 es un número aleatorio creado con la función rand, se comprueba en que rango se encuentra. Si es menor o igual que 0,67, (hecho que pasa) se guarda dentro de una variable un 1, si hubiese sido mayor pero menor o igual que 0,86, se guardaría un 2, y así sucesivamente. Los valores de 0,67 y 0,86 son los determinados al calcular la probabilidad acumulada de aceptación de cada central. Utilizando la función 3, teniendo en cuenta el valor obtenido y la satisfacción de cada etiqueta, lo que hace es mirar a que satisfacción pertenece el valor guardado, en este caso es un 1, por tanto, devolverá la mínima satisfacción, un 0,1.

Una vez que se tenga los 3 indicadores, se procede a calcular el índice social, con las ponderaciones anteriormente dadas.

En el ámbito **medioambiental**, por cada indicador hay un valor directo (determinista) que se envía a la función 2, para que devuelva el grado de satisfacción dada la función de valor de cada uno. Hay que repetir el mismo procedimiento para cada indicador y finalmente hacer una suma junto con las ponderaciones mostradas en la Tabla 21.

Al tener los índices económico, social y medioambiental, se hace la suma total teniendo en cuenta qué peso tiene cada requerimiento. Y así se determina un valor de IS.

Función 5: Simulación Monte Carlo

```
function [IS]=MonteCarloFuentePAIS
```

Esta función es para simular. Se define previamente la tolerancia para la media, la tolerancia para la varianza y un número máximo de iteraciones lo suficientemente grande.

Se inicializa el proceso, para ello se necesita crear 200 primeras iteraciones. Se crean dos variables donde se guarda cada grupo de 100. Se calcula la media y varianza del primer grupo de 100 iteraciones. Se crea un tercer grupo que contiene las 200 iteraciones y se calcula la media y varianza de este nuevo grupo creado.

Se procede a comparar las medias y varianzas para ver si cumple con la tolerancia dada inicialmente. Si no cumple hay que volver a realizar 100 iteraciones y volver a comprobar si se cumple con el grupo anterior.

El programa está diseñado para que se cumpla el criterio de la tolerancia hasta que se alcancen 5 convergencias consecutivas. Hay un contador para las convergencias

que se pone a cero cuando después de una o varias convergencias, la comprobación posterior no indica otra convergencia. Si no se consigue la convergencia, cuando se alcance el número de iteraciones marcado al inicio del programa se para y devuelve el valor que tenga en el momento de paro.

Para el cálculo de los parámetros estadísticos se usarán las propias funciones de Matlab:

Media = $mean(ISF)$

Desviación estándar = $std(ISF)$

Varianza = $var(ISF)$

Mínimo = $min(ISF)$

Máximo = $max(ISF)$

Por último, quedarían las representaciones gráficas. Para representar la curva de probabilidad acumulada se ordena el vector utilizado para almacenar los índices de sostenibilidad (ISF). Se ordena de menor a mayor y se muestra utilizando la función plot de Matlab.

Para la representación del histograma de frecuencias, se utiliza la función de Matlab “*histc*” que cuenta el número de elementos que pertenecen a cada uno de los intervalos definidos en el vector ISF. Al usar esta función también se puede mostrar cuál es el intervalo donde se encuentra el intervalo modal y la frecuencia de aparición.

4.4 Resultados – Discusión

Antes de proceder a comentar los resultados obtenidos de la simulación, se quiere recordar que los pilares económico y social están afectados por la incertidumbre mientras que, en este caso, el pilar medioambiental es determinista, ya que no ha sido posible definir distribuciones de probabilidad.

Por tanto, podrían estudiarse los índices parciales de sostenibilidad de la misma manera que se ha hecho para el IS haciendo simulación hasta alcanzar la convergencia y realizando el posterior análisis estadístico, tanto para el social como para el económico. Para el índice medioambiental, esto no tiene sentido ya que siempre se obtiene el mismo valor.

Sin embargo, con el objetivo de no complicar en exceso la discusión de los resultados y, con el objetivo de facilitar la extracción de conclusiones, se ha optado por presentar en la tabla 27 el índice de sostenibilidad y los índices parciales para ambos países para todas las alternativas, usando los valores modales para los indicadores probabilistas.

Los resultados obtenidos en la Tabla 27 no dejan de ser uno de los escenarios posibles de los que se obtendrían de la simulación.

ESPAÑA	IS	IE	ISOC	IM
Hidráulica	0,83	0,24	0,19	0,39
Fotovoltaica	0,60	0,03	0,22	0,35
Eólica	0,80	0,22	0,18	0,39
Nuclear	0,76	0,18	0,28	0,30
Biomasa	0,41	0,01	0,14	0,26
Gas Natural	0,68	0,23	0,08	0,37
SUECIA	IS	IE	ISOC	IM
Hidráulica	0,85	0,25	0,21	0,39
Fotovoltaica	0,77	0,11	0,31	0,35
Eólica	0,86	0,26	0,21	0,39

Nuclear	0,75	0,13	0,29	0,33
Biomasa	0,57	0,14	0,13	0,30
Gas Natural	0,63	0,18	0,07	0,37

Tabla 27. índices económico, social y medioambiental (elaboración propia)

En la Tabla 28 se muestran los resultados de España tras haber ordenado los valores de los índices y subíndices de menor a mayor. La central con el IS más elevado es el de la hidráulica y el peor el de la biomasa.

En relación con el índice económico, la mejor opción sigue siendo la hidráulica y la peor, biomasa. Esto era de esperar ya que al partir de un solo indicador para el requerimiento económico hubiera bastado con analizar las modas de este indicador.

Por otro lado, el mejor índice social es el nuclear, eso es posible debido al valor del indicador de empleo asociado a este tipo de central (que es relativamente alto en comparación con las otras fuentes, según los datos encontrados para este proyecto) y también al indicador accidentes, que tiene un valor parecido al resto de fuentes renovables. El peor subíndice social es el de gas natural.

Por último, el medioambiental, los datos obtenidos son los esperados a excepción de la fotovoltaica, que debería de estar por encima del gas natural, aunque la diferencia es muy pequeña de un valor a otro.

IS	Económico	Social	Medioambiental
Biomasa	Biomasa	Gas Natural	Biomasa
Fotovoltaica	Fotovoltaica	Biomasa	Nuclear
Gas Natural	Nuclear	Eólica	Fotovoltaica
Nuclear	Eólica	Hidráulica	Gas Natural
Eólica	Gas Natural	Fotovoltaica	Eólica
Hidráulica	Hidráulica	Nuclear	Hidráulica

Tabla 28. Clasificación de las centrales españolas de menor a mayor en función de los datos de la Tabla 31 (elaboración propia)

En la Tabla 29 se muestran las clasificaciones de Suecia en función de cada índice. La central con el IS más elevado es la eólica y el peor la biomasa.

A nivel económico, el mejor resultado es para la eólica y la peor el de la fotovoltaica. A nivel social, a diferencia del otro índice, la mejor alternativa es la fotovoltaica, seguida por la nuclear. Al igual que en España, estos resultados son debido a la alta empleabilidad de estas fuentes de energía. A nivel medioambiental, se obtienen la misma clasificación que España.

IS	Económico	Social	Medioambiental
Biomasa	Fotovoltaica	Gas Natural	Biomasa
Gas Natural	Nuclear	Biomasa	Nuclear
Nuclear	Biomasa	Eólica	Fotovoltaica
Fotovoltaica	Gas Natural	Hidráulica	Gas Natural
Hidráulica	Hidráulica	Nuclear	Eólica
Eólica	Eólica	Fotovoltaica	Hidráulica

Tabla 29. Clasificación de las centrales suecas de menor a mayor en función de los datos de la Tabla 31 (elaboración propia)

La Figura 58 ilustra una mejor comparación entre ambos países, donde se puede encontrar agrupados por cada tipo de central los índices económicos, sociales y medioambientales, empleando las modas de los valores probabilistas. A simple vista lo que más destaca es la variación que hay en el caso de la fotovoltaica, que Suecia tiene mejores resultados en los índices económicos y sociales, aunque España es un poco

superior en el medioambiental. Esto ocurre como se ha mencionado anteriormente debido al gran empleo que hay actualmente en Suecia relacionado con este tipo de energía. Por otro lado, en Suecia, los incentivos para esta fuente energética también son más elevados.

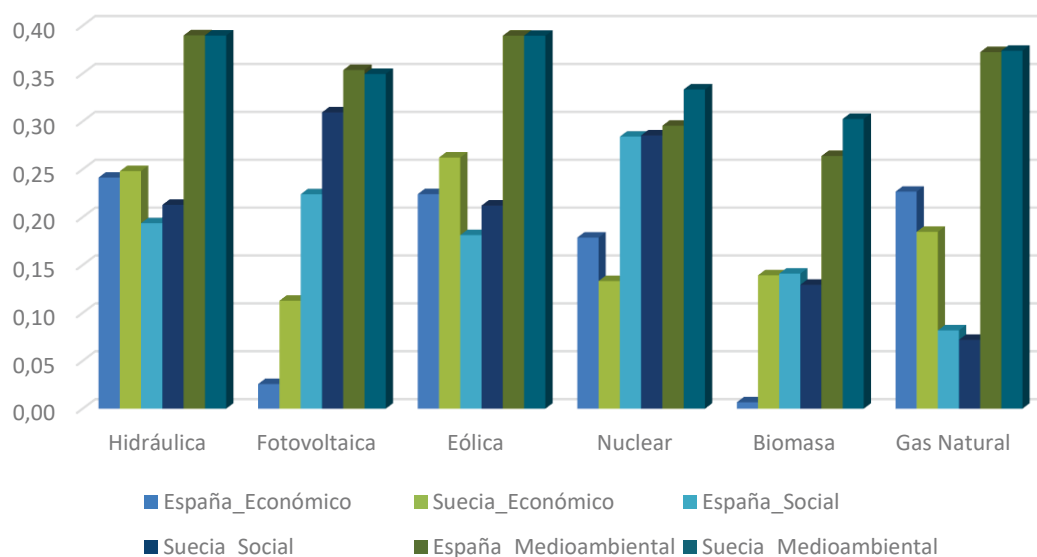


Figura 58. Comparación subíndices de España y Suecia usando modas para los indicadores probabilistas (elaboración propia)

Mencionar la gran diferencia de la biomasa en Suecia, que a nivel económico es mucho mejor que en España. Esto puede deberse a que en Suecia apoya con incentivos el uso de este tipo de centrales porque así no tiene que incurrir a las importaciones de otras fuentes como podría ser el gas natural.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación con Matlab. En la Tabla 30 están los resultados numéricos de las distintas centrales analizadas para el caso de España y, más adelante, en la Tabla 31 están los de Suecia.

ESPAÑA	Intervalo modal	%	ite	media	desv	var	min	max
Hidráulica	0,8-0,9	49%	29400	0,7878	0,0560	3,10E-03	0,6168	0,8839
Fotovoltaica	0,6-0,7	73%	19700	0,6180	0,0283	8,01E-04	0,5367	0,7055
Eólica	0,7-0,8	67%	22200	0,7271	0,0492	2,40E-03	0,5564	0,8403
Nuclear	0,7-0,8	79%	20400	0,7487	0,0385	1,50E-03	0,6437	0,8643
Biomasa	0,4-0,5	58%	19800	0,4128	0,0326	1,10E-03	0,3680	0,5956
Gas Natural	0,6-0,7	61%	30700	0,6343	0,0575	3,30E-03	0,4619	0,8505

Nota: % es la frecuencia del intervalo modal

Tabla 30. IS y datos estadísticos de España (elaboración propia)

Lo primero que se van a analizar son los intervalos modales, que como se puede observar, el mejor intervalo es para la hidráulica de 0,8-0,9 con un 49% de frecuencia y si se analiza el histograma de frecuencias (Tabla 33) los otros tramos más visibles están a la izquierda del intervalo modal. Esto lo que quiere decir es que el resto de los valores de IS son peores. Si se analiza la curva de probabilidad acumulada (Tabla 32), se observa que hay bastante rango de valores, tal como se puede comprobar analizando los valores mínimos y máximos, que van desde 0,6168 a 0,8839.

Siguiendo con los intervalos modales, después de la hidráulica, están las centrales eólica y nuclear que ambas están en un intervalo de 0,7-0,8, pero la nuclear con un

porcentaje de aparición superior. Analizando los histogramas de frecuencias respectivos (Tabla 33), en el caso de la nuclear hay dos tramos a ambos lados del intervalo principal con casi un 10% de probabilidad acumulada cada uno. En el de la eólica, lo que se observa es que tiene hasta 3 tramos más, de los cuales 2 están al lado izquierdo del principal y el más próximo a él, tiene casi un 30% de frecuencia. Esto lo que quiere decir, es que la eólica es más variable que la nuclear y que además la eólica puede tener peores resultados que la nuclear.

Después están la fotovoltaica y gas natural, siendo la fotovoltaica la que presenta una mayor frecuencia del intervalo modal. Si se observa los histogramas de frecuencia (Tabla 33) la central de gas natural puede obtener valores más altos de IS.

Y por último está la biomasa, con el peor intervalo modal entre 0,4 y 0,5 y una frecuencia de 58%. Analizando el histograma de frecuencias (Tabla 33), se determina que la mayoría del resto de valores de IS están en el lado izquierdo del intervalo modal, aunque también tiene un 2% de probabilidad de que sea superior.

Pero el intervalo modal no lo es todo, si analizamos ahora los valores mínimos que sería los peores IS posibles para cada fuente, observamos que la central nuclear es el que tiene mejor IS, por tanto, en el peor escenario posible, la hidráulica dejaría de ser la mejor opción y lo pasaría a ser la nuclear.

Ahora si se tiene en cuenta el mejor escenario posible, la hidráulica nuevamente, sería la mejor alternativa seguida por la nuclear.

Hay que tener en cuenta que no siempre se van a dar esos escenarios y que puede haber multitud de casos posibles. Como en el mejor escenario posible para la biomasa, que podría ser mejor alternativa que la eólica, teniendo en cuenta el peor IS de la eólica. O si se tiene en cuenta el mejor IS para el gas natural, podría ser la mejor opción suponiendo peores escenarios para las demás centrales.

Si sólo se analizan las medias obtenidas durante la simulación, el orden de centrales de manera ascendente sería: biomasa, fotovoltaica, gas natural, eólica, nuclear e hidráulica. Aunque el escenario más habitual, en condiciones normales y no excepcionales sería: biomasa, nuclear, gas natural, fotovoltaica, hidráulica y eólica.

SUECIA	Intervalo modal	%	ite	media	desv	var	min	max
Hidráulica	0,8-0,9	100%	9500	0,8487	0,0118	1,39E-04	0,7961	0,8698
Fotovoltaica	0,7-0,8	97%	18100	0,7644	0,0197	3,86E-04	0,6774	0,8218
Eólica	0,8-0,9	63%	12000	0,8089	0,0287	8,22E-04	0,6939	0,8807
Nuclear	0,7-0,8	91%	20800	0,7658	0,0244	5,94E-04	0,6973	0,8388
Biomasa	0,5-0,6	63%	34300	0,5919	0,0404	1,60E-03	0,4978	0,8222
Gas Natural	0,6-0,7	76%	39400	0,6437	0,0412	1,70E-03	0,5497	0,8144

Nota: % es la frecuencia del intervalo modal

Tabla 31. IS y datos estadísticos de Suecia (elaboración propia)

Para Suecia, se analizará de la misma manera teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Tabla 31.

Los mejores intervalos modales son los de la eólica e hidráulica. Pero en el caso de la hidráulica, casi el 100% está dentro de este intervalo. Al mirar los valores mínimos y máximos, se observa que el valor mínimo está en 0,7961, por tanto, este valor estaría fuera del intervalo. La eólica a diferencia de la hidráulica, es más variable. Incluso si se analiza los histogramas de frecuencias (Tabla 33) y las curvas de probabilidad acumulada (Tabla 32), el resto de los valores de IS obtenidos están la mayoría al lado izquierdo del intervalo principal, por tanto, el resto de los valores serían peores a los del intervalo modal.

Los siguientes son la nuclear y la fotovoltaica, con un intervalo modal de 0,7-0,8, con frecuencias del 91% y 97%, respectivamente. Al analizar los histogramas de frecuencias (Tabla 33) y las curvas de probabilidad acumulada (Tabla 32) de ambas centrales, se ve que los otros resultados suelen estar a la derecha del intervalo principal. Esto quiere decir, que hay más probabilidad de que ocurra mejores escenarios que peores.

El intervalo modal del gas natural es de 0,6-0,7 con un 76% de frecuencia de aparición. Analizando el histograma de frecuencias (Tabla 33), se observa que en ambos lados del intervalo principal hay posibilidades de aparición.

Y, por último, estaría biomasa, con un intervalo de aparición entre 0,5 y 0,6 con un 63% de frecuencia de aparición. Según el histograma de frecuencias (Tabla 33), el resto de los valores de IS están al lado derecho del intervalo principal, por tanto, es posible tener mejores resultados.

Si se analiza el peor escenario posible, es decir, los valores mínimos obtenidos de IS, la hidráulica seguiría siendo mejor, pero seguido por la nuclear. La eólica bajaría al tercer puesto, seguido por la fotovoltaica. Y al final, la biomasa seguiría siendo la peor opción.

Si, por la contra, se proyecta el mejor escenario para todas las centrales, la eólica ocupa el mejor puesto, seguido por la hidráulica y nuclear. Ahora bien, la biomasa pasaría a ser la cuarta mejor opción, por encima de la fotovoltaica.

Es importante mencionar que sería posible un escenario en el cual la biomasa sería la mejor opción, teniendo en cuenta que el mejor IS obtenido fue de 0,8222, incluso sin tener que proyectar los peores escenarios para el resto de las fuentes, solo comparándolo con las medias obtenidas, la única que tiene un valor superior es la hidráulica.

El escenario posible teniendo en cuenta las medias en el orden ascendente sería el siguiente: biomasa, gas natural, fotovoltaica, nuclear, eólica e hidráulica. Aunque el escenario más habitual, en condiciones normales y no excepcionales sería: gas natural, nuclear, biomasa, fotovoltaica, eólica e hidráulica.

En la Figura 59, se muestra una comparación entre las frecuencias de los intervalos modales, teniendo en cuenta que, para las centrales de gas natural, nuclear e hidráulica, los intervalos modales son los mismos para ambos países. En el caso de la eólica el intervalo modal de Suecia es superior y se muestra cual es la frecuencia de aparición de la central española en ese intervalo. De la misma manera, se muestra el intervalo modal de la central eólica española y se muestra cual es la frecuencia de aparición de la central sueca dentro de ese intervalo.

Por último, están biomasa y fotovoltaica. No se ha realizado una comparación entre los mismos intervalos debido a que, el intervalo modal de la biomasa española es de 0,5-0,6 y el resto de los valores, la mayoría, se encuentra en el lado izquierdo. Al contrario que Suecia, el intervalo modal está comprendido entre 0,6-0,7 y la mayoría de los valores están en el lado derecho.

Al igual ocurre con la fotovoltaica, que Suecia, está en un intervalo superior y el resto de los valores crecen, a diferencia de España, que está en un intervalo inferior y que, además, los otros valores decrecen.

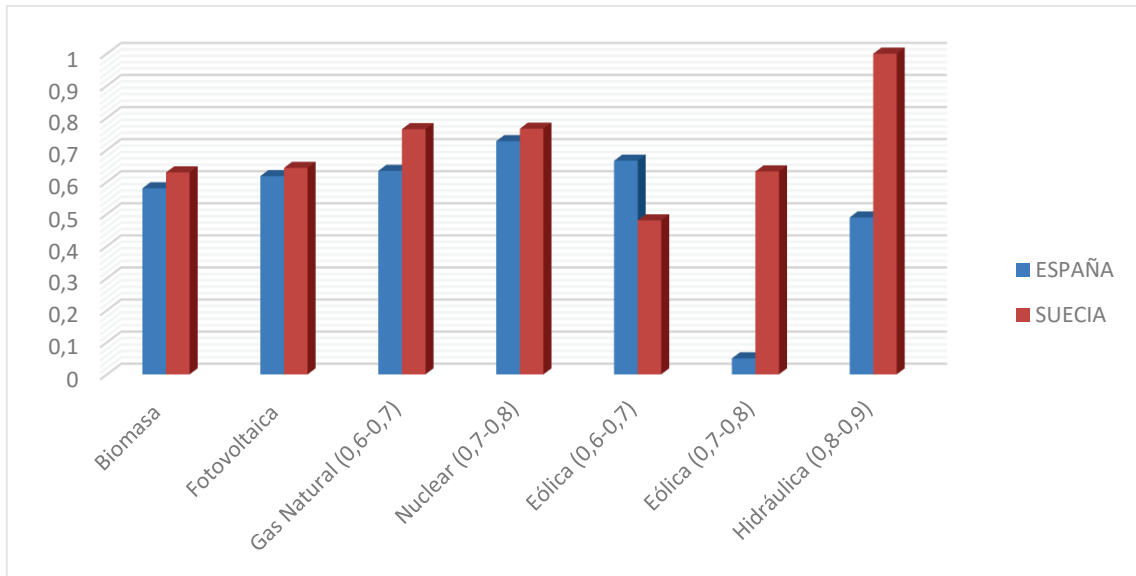
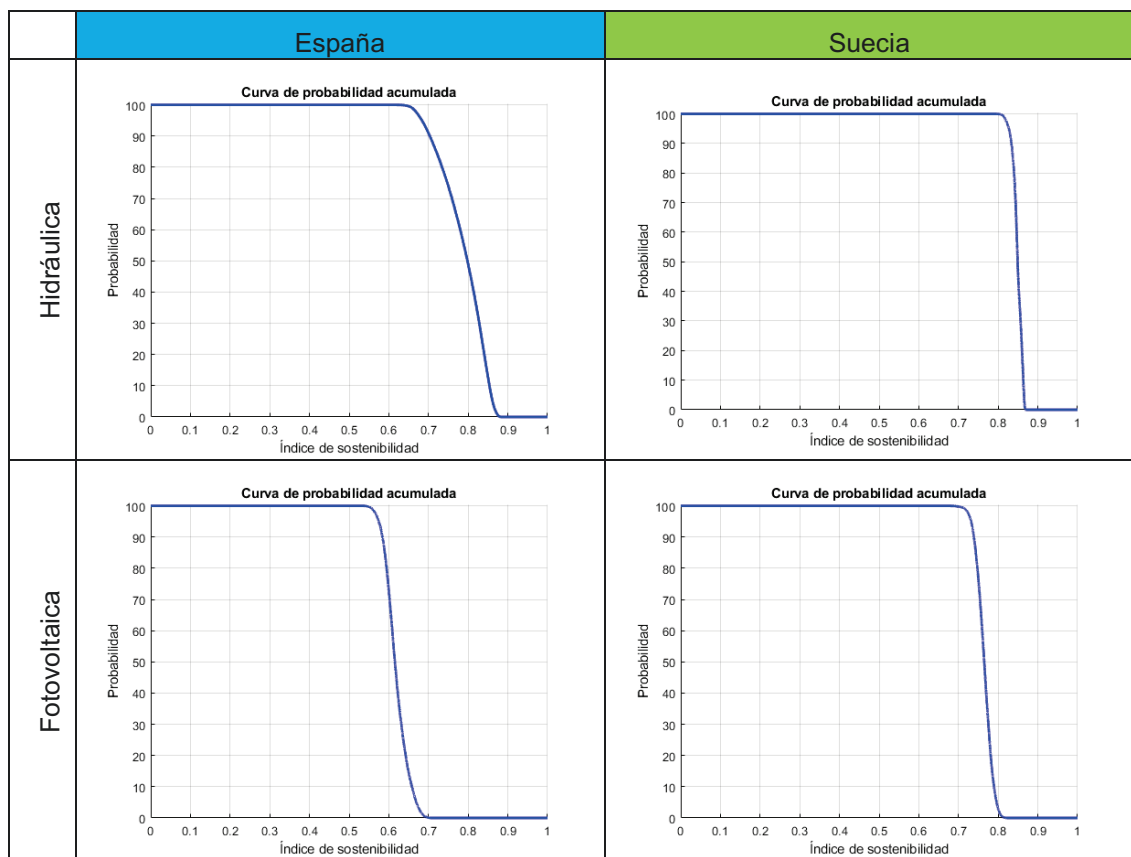


Figura 59. Frecuencias de los rangos modales de cada central. Comparación entre España y Suecia (elaboración propia)



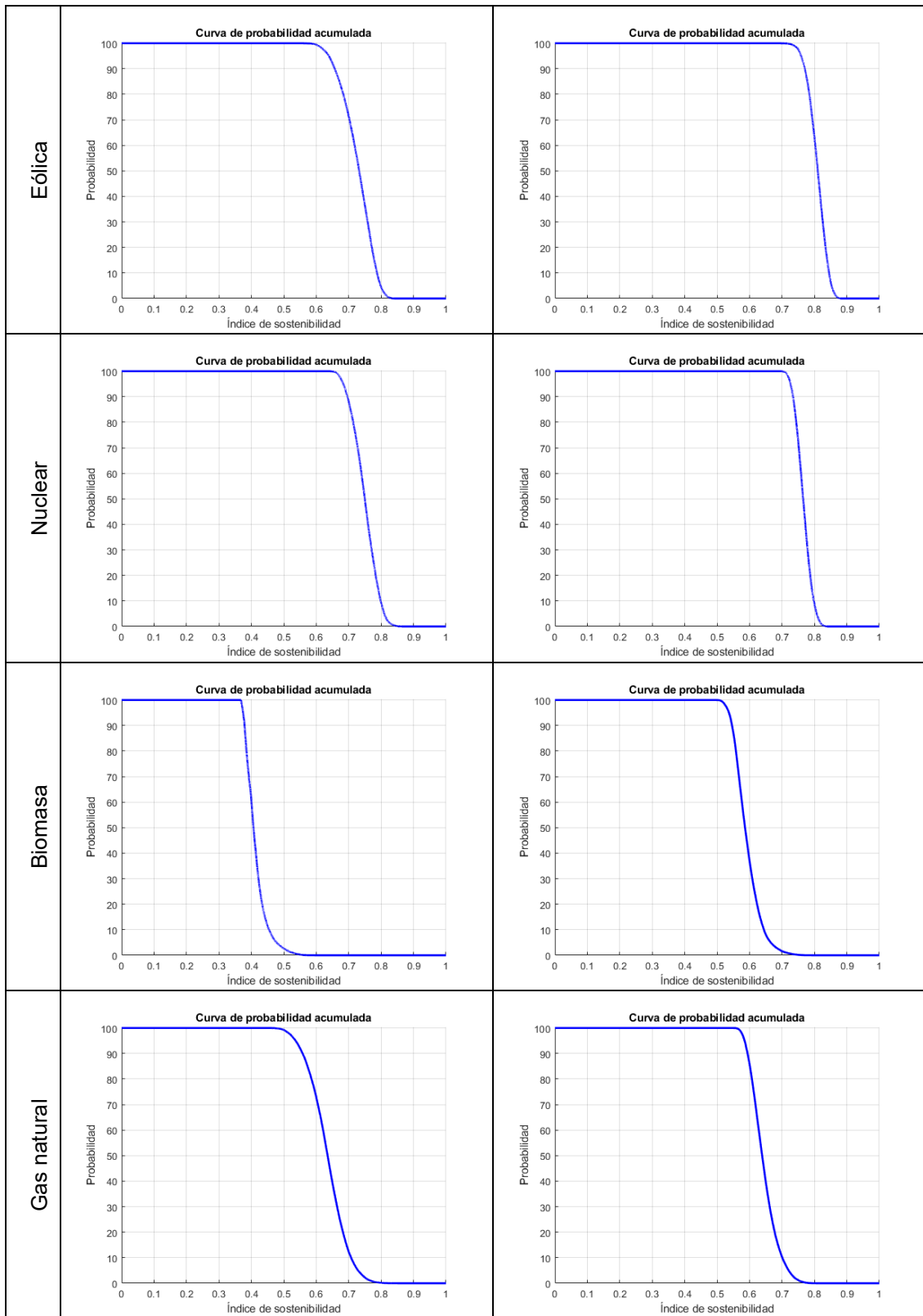
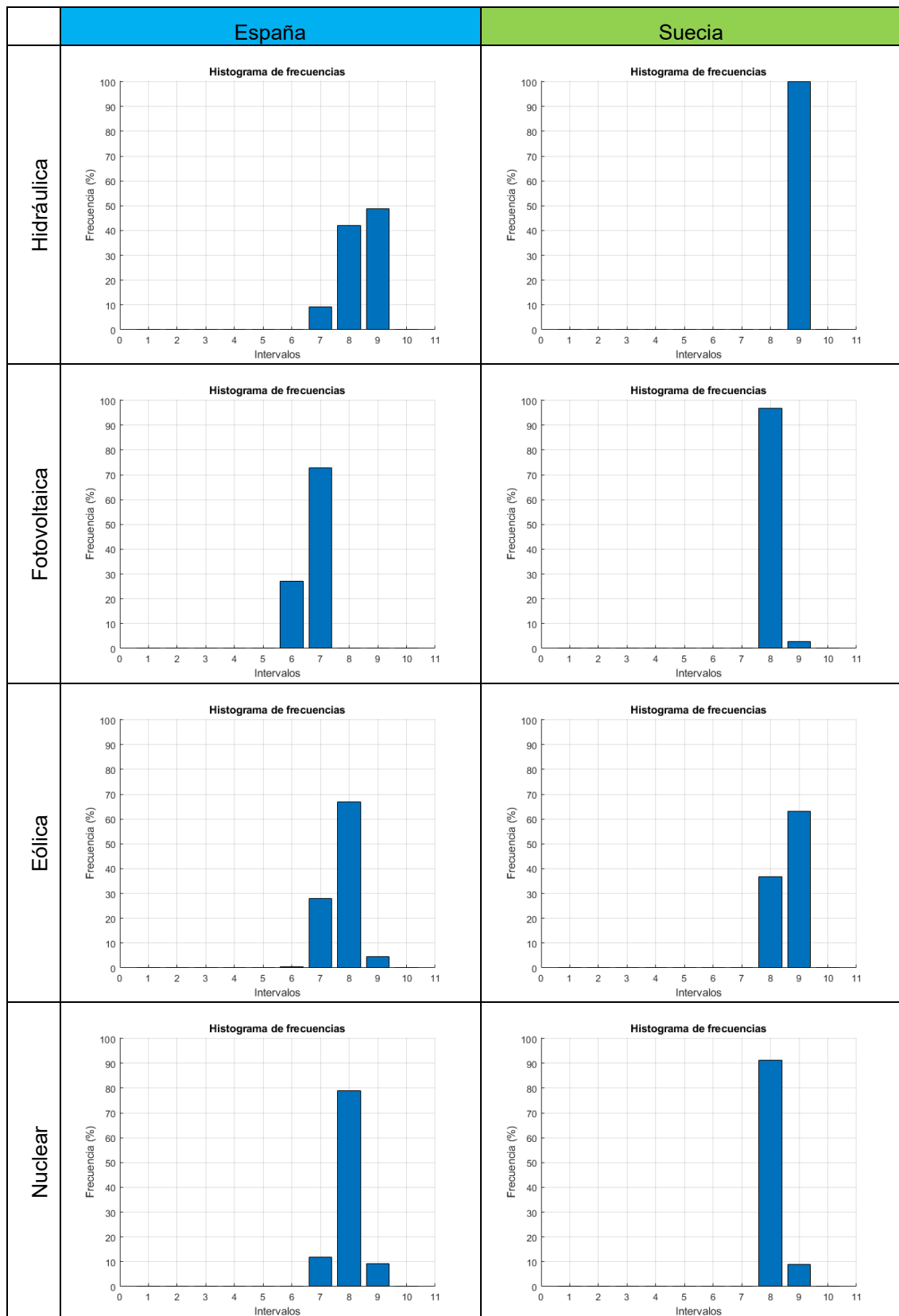


Tabla 32. Curvas de probabilidad acumulada (elaboración propia)



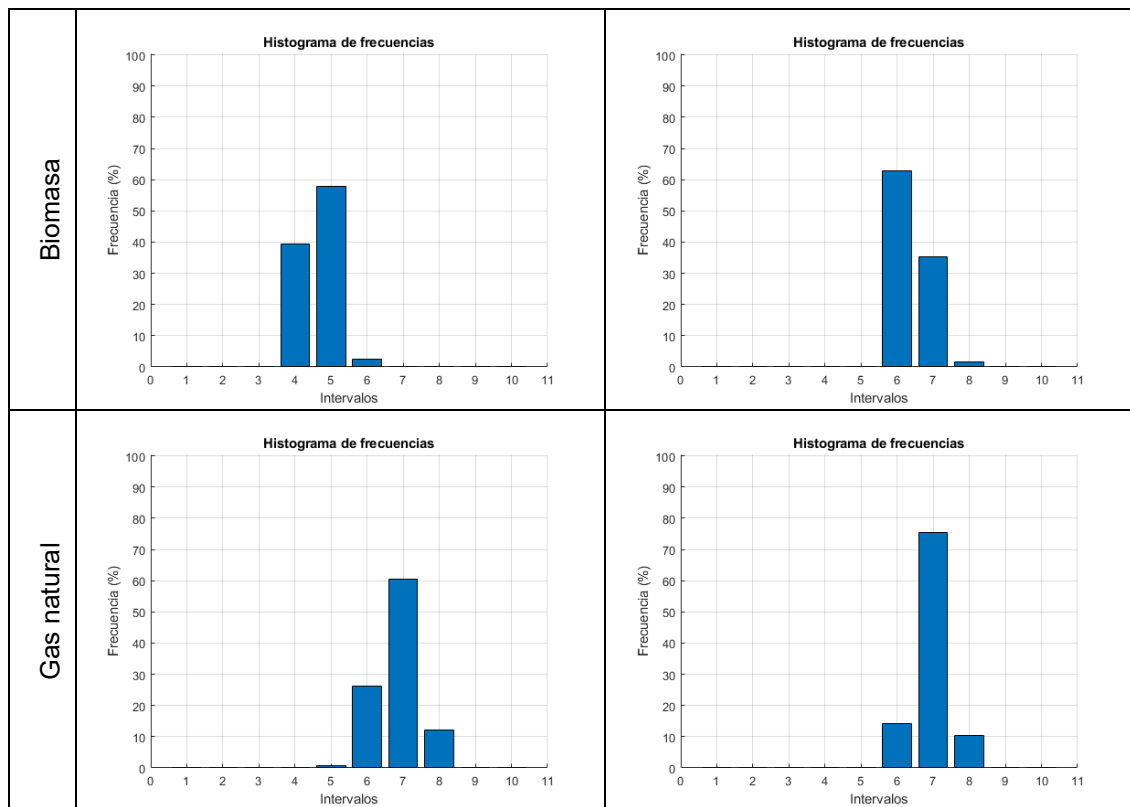


Tabla 33. Histogramas de frecuencias (elaboración propia)

5 CONCLUSIONES

Una vez acabadas las interpretaciones de los resultados y la toma de decisiones, que es el penúltimo paso del método MIVES – Monte Carlo, se procede a la recolección de datos para futuros proyectos, así como a la extracción de conclusiones.

Es importante mencionar que tras analizar los sistemas energéticos de ambos países y conocer tanto la evolución como el balance energético de los mismos, se podría determinar que España podría alcanzar a este país, si bien no es algo trivial o inmediato, pero es posible.

En los resultados obtenidos, en la mayoría de los casos, proyecta a la hidráulica como la mejor opción, tanto en un país como en el otro.

Para Suecia, puede que sea una buena opción porque tiene la suerte de contar con una buena hidraulicidad. A diferencia de España que, en los últimos años debido al cambio climático, el aprovechamiento hidroeléctrico está disminuyendo debido a las sequías. Por tanto, aunque pueda ser una opción sostenible, en este caso se estaría desaprovechando la posibilidad de poder fomentar otras energías y no tendría sentido instalar más potencia de la que hay porque no aumentaría la producción hidroeléctrica.

Como se ha mencionado de igual manera, tanto España como Suecia, no tienen previsto aumentar la hidráulica.

Las siguientes mejores fuentes según el índice de sostenibilidad obtenido, serían las centrales eólicas. En España es la principal fuente renovable y en Suecia la segunda. En general, se puede considerar una buena alternativa sostenible. Desde el punto de vista medioambiental es la que mejor índice tiene. Esto no quiere decir que no contamine, simplemente que los valores son relativamente bajos. Por tanto, sí que sería una buena opción para invertir y aumentar su potencia instalada.

Por tanto, las decisiones de los respectivos gobiernos de apostar por este tipo de central son acertadas.

Con respecto a la fotovoltaica, ya los resultados cambian. Para ambos países dan el mismo valor desde el punto de vista medioambiental, pero hay una gran diferencia entre los indicadores económicos y sociales. En Suecia, como se comentó anteriormente es una fuente que está creciendo actualmente, por tanto, los valores de empleabilidad son superiores porque en los primeros años se genera más empleo debido a las construcciones y la extracción de materias primas. En cambio, en España, es una fuente que lleva más años asentada.

También influye el tipo de construcciones, España actualmente se enfoca más hacia instalaciones grandes y, en cambio, Suecia, es más partidaria de los paneles sobre edificios. Desde el punto de vista económico, Suecia tiene altos incentivos para este tipo de central de tal manera que el LCOE sin las políticas energéticas suecas aumentaría casi 70 €/MWh en función del tipo de construcción. En España, aun recientemente se está empezando a incentivar más por este tipo de central renovable y está empezando a dar más apoyo al autoconsumo, que en Suecia es lo que más predomina. También hay que comentar que este tipo de energía solar es la que más apoyo está teniendo actualmente en Suecia.

En relación con la nuclear destaca el hecho de que sea la mejor opción socialmente. Como se ha explicado anteriormente, se debe al empleo, tanto en un país como en otro. Los datos con los que se trabaja indican un alto valor de empleo. A pesar de que año tras año no se genera empleo nuevo asociado a dicha fuente. Sin embargo, sí que es necesario un número elevado de empleados para poder llevar a cabo la producción de este tipo de energía. Es decir, si se decide cerrar las centrales nucleares se estarían perdiendo más de 27.000 puestos de trabajo. Desde el punto de vista medioambiental da un resultado bastante negativo en comparación con las otras fuentes, estando por

debajo la biomasa. Las decisiones de cerrar estas centrales puede ser una buena opción desde el punto de vista medioambiental, pero afectaría mucho al ámbito económico.

En relación con la biomasa, en Suecia es tan rentable económicamente, debido a lo mencionado anteriormente. Los incentivos por usar este tipo de combustible alcanzan una diferencia del LCOE de 15 €/MWh. En cambio, en España, no está bien visto este tipo de recurso.

Por último, el gas natural, aunque sea una alternativa sostenible para Suecia, no es una fuente por la cual están apostando. Principalmente porque carece de este recurso y uno de los objetivos es disminuir las importaciones. En cambio, España, sí apuesta por este tipo de energía, a pesar de carecer también de él.

Suecia prefiere la biomasa antes que el gas natural, aunque desde el punto de vista de la sostenibilidad, el gas natural sería un mejor recurso. Pero si careces de él también es un impedimento.

Lo único que falta por decir es que queda demostrado que las energías renovables son un buen recurso sostenible, a excepción de la biomasa y la fotovoltaica.

Al analizar cada país y compararlo, la principal diferencia que ha destacado son las ayudas que ofrece las políticas energéticas suecas para el uso de energías renovables y autóctonas. En el caso de España, socialmente está empezando a apoyar más este tipo de tecnologías, aunque aún queda mucho camino por delante. Económicamente, las ayudas están empezando a crecer y posiblemente en un futuro se pueda alcanzar los datos de energía renovable de Suecia actuales. Aunque desde mi punto de vista no creo que sea posible sin la energía nuclear.

Al usar el método MIVES se ha podido desagregar el IS en función del requerimiento económico, social y medioambiental (utilizando las modas para los indicadores probabilistas) y se ha determinado que central es mejor en cada caso. Aunque esto no deja de ser solo un simple escenario posible dentro de lo que se hizo utilizando la simulación.

Para poder acercarse a la realidad, es mejor emplear el método MIVES – Monte Carlo, ya que ofrece una multitud de posibilidades, pero que al mismo tiempo se pueden crear escenarios muy posibles y el análisis estadístico ayuda a comprender la complejidad de la multitud de variantes.

Sería interesante para un futuro trabajo, seguir estos datos y realizar la simulación de los datos económicos y sociales, para ver qué resultados se obtendrían. También se han quedado fuera ciertos indicadores relevantes para los que no se han encontrado información como el porcentaje de ingresos de los hogares dedicado a combustibles y electricidad, la eficiencia de la conversión y distribución de energía, intensidad energética de los hogares. Por tanto, esto podría cambiar ligeramente los resultados y las clasificaciones, si bien, grandes variaciones no deberían ser esperadas.

Por otro lado, comentar, por tanto, como futuros desarrollos, la inclusión de nuevos indicadores y el análisis de otros tipos de centrales que quedaron fuera del alcance de este TFG como centrales térmicas de carbón o fuel-oil, centrales térmicas,

6 BIBLIOGRAFÍA

AEE, 2020. Anuario Eólico 2020. Disponible en:

<https://www.aeelica.org/anuario/2020/#p=1>.

ALINNE, 2018. Análisis del Potencial de Desarrollo de Tecnologías Energéticas. Disponible en:

<http://www.alinne.es/documents/17669/3303955/Anexo+APDTE+Energbia+Nuclear+d e+Fision/1c3deec1-4ae7-4415-b290-0d35f06b4b8b>.

Álvarez, C., 2021. Cuánto ocupan las megacentrales solares: investigadores alertan del impacto del 'boom' fotovoltaico. El País. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2021-01-23/cuanto-ocupan-las-megacentrales-solares-investigadores-alertan-del-impacto-del-boom-fotovoltaico.html>.

Anpier, 2021. Anuario Fotovoltaico 2020. Asociaciones nacional de productores de energía fotovoltaica. Disponible en: <https://anpier.org/wp-content/uploads/2020/09/ANUARIO-ANPIER-2020.pdf>.

Barrero, A., 2021. Cinco empresas controlan el 90% del mercado eléctrico doméstico. Energías Renovables. <https://www.energias-renovables.com/panorama/cinco-empresas-controlan-el-90-del-mercado-20210629>.

Bellini, E., 2021. Sweden to devote another \$30.8 million to PV rebates for homeowners. Pv magazine. <https://www.pv-magazine.com/2021/04/22/sweden-to-devote-another-30-8-million-to-pv-rebates-for-homeowners/>.

BOE, 2021. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. BOE-A-2021-15778. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-15778>.

BP, 2021. Statistical Review of World Energy 2021, 70th edition. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.

Brundtland, G. H., 1987. Our common future. Oxford University Press, Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.

http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf.

CARBUNION. 2015. Memoria 2014. Federación nacional de empresarios de minas de carbón. Disponible en:

http://www.carbunion.com/panel/memoria/uploads/CARBUNION_Memoria_2014.pdf.

Cartelle, J.J., Lara, M., de la Cruz, M. P., Caño, A., (2015). Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy*. 89. 473-489.

Cartelle, J.J., Lara, M., de la Cruz, M. P., Caño, A., (2017). Comparative analysis of direct employment generated by renewable and non-renewable power plants. *Energy*. 139. 542-554.

Cartelle, J.J., Lara, M., de la Cruz, M. P., Caño, A., (2016). Probabilistic life-cycle cost analysis for renewable and non-renewable power plants. *Energy*. 112. 774-787.

Cartelle, J.J., Lara, M., de la Cruz, M. P., Caño, A., Soares, I., (2020). Probabilistic multicriteria environmental assessment of power plants: A global approach. *Applied Energy*. 260. 114344.

Comisión Europea, 2021. Marco sobre clima y energía para 2030.

https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_es.

CORES, 2021. Memoria 2020. Disponible en:

https://www.cores.es/sites/default/files/archivos/publicaciones/memoria_2020.pdf.

Cucci, M., 2021. La energía renovable. Parlamento Europeo.

<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/70/la-energia-renovable>
(consultada el 15 de octubre de 2021).

De la Cruz, P., Del Caño, A., Castro, A., Gómez, D., 2014. Métodos integrales para lidiar con la incertidumbre en la evaluación de la sostenibilidad. Parte 1: el método MIVES-Monte Carlo.

Delgado, J., 2019. Cuando el carbón era un gran regalo de Reyes. *El Independiente*.
<https://www.elindependiente.com/economia/2019/01/06/cuando-carbon-gran-regalo-reyes-espana/>.

Nohlgren, I., Herstad, S., Jansson, M., Rodin, J., 2014. Electricity from new and future plants 2014. *Elforsk*. Disponible en:

<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19920/electricity-from-new-and-future-plants-2014-elforskrapport-2014-45.pdf>.

Endesa, 2020. ¿Qué son los comercializadores de electricidad?

<https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/otros/comercializadoras-electricas>

(consultada el 5 de octubre 2021).

Energía y Sociedad, 2021. Manual de la Energía. <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/electricidad/> (consultada el 25 de septiembre 2021).

Energimyndigheten, 2000. Energy in Sweden 2000. Swedish National Energy Administration.

Engás, 2021. Informe Anual 2020. Disponible en:

https://www.enagas.es/enagas/es/Comunicacion/Publicaciones-Nueva/Informe_Anual-Publicaciones.

Espejo, C., 2004. La energía eólica en España. Investigaciones geográficas, 35; 45-65.

EurObserv'er, 2011. 11th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2012. 12th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2013. 13th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2014. 14th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2015. 15th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2016. 16th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2017. 17th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2018. 18th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

EurObserv'er, 2019. 19th annual overview barometer. Disponible en:

<https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>

Eurobserv'er, 2021. Solar thermal and concentrated solar power barometer 2021. Disponible en: <https://www.eurobserv-er.org/solar-thermal-and-concentrated-solar-power-barometer-2021/>.

Exolum, 2021. Dónde operamos.

https://exolum.com/donde-operamos/?exm_country=espana#exm-country-selector
(consultada el 13 de octubre 2021).

Expansión, 2021. Consumo de electricidad. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-consumo> (consultada el 17 de noviembre 2021).

Expansión, 2021. Emisiones de CO₂. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2> (consultada el 17 de noviembre 2021).

Expansión, 2021. Precio del petróleo OPEP por barril en 2021.

<https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec> (consultada el 15 de noviembre 2021).

Fano, J. M., 2002. Historia y panorama actual del sistema eléctrico español. Física y Sociedad, 10-17. 113-8953. https://www.cofis.es/pdf/fys/fys13/fys13_10-17.pdf.

Fernández, J., 2007. Energía de la Biomasa. Energías renovables.

<http://media1.webgarden.es/files/media1:4befe685c2de5.pdf.upl/E.Biomassa.pdf>
(consultada el 30 de septiembre).

Flores, M. R., 2015. El mercado eléctrico en España: La convivencia de un monopolio natural y el libre mercado. Revista Europea de Derechos Fundamentales, 25, 257-297.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5264979>.

Foro Nuclear, 2021. Energía nuclear en España.

<https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Sweden/Sweden.htm> (consultada el 17 de octubre 2021).

Foro Nuclear, 2015. Resultados nucleares y perspectivas de futuro. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2020/05/Informe-resultados-nucleares-2019.pdf>.

Fundación Endesa, 2021. Red de distribución.

<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/red-de-distribucion> (consultada el 1 de octubre 2021).

Fundación Endesa, 2021. Subestaciones eléctricas.

<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesaeduca/recursos/subestaciones-electricas> (consultada el 1 de octubre).

Fundación Endesa, 2021. Transporte de electricidad.

<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/transporte-de-electricidad> (consultada el 1 de octubre 2021).

Fundación Endesa, 2021. El mercado eléctrico.

<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/el-mercado-electrico> (consultada el 2 de octubre 2021).

Gales, B., Malanima, P., Kander, A. Rubio, M., 2007. North versus South: Energy transition and energy intensity in Europe over 200 Years. Cambridge University Press European 11, 215–249. <https://doi.org/10.1017/S1361491607001967>.

García, A., 2020. La energía nuclear salvará al mundo, primera ed. Planeta, Madrid. 978-84-08-22731-1.

García, M., 2016. Estudio comparativo de diferentes tecnologías renovables en un horizonte 2020. Trabajo Fin de Grado. Universidad Pontificia Comillas (ICAI).

García, S., 2012. Fundamentos técnicos de los ciclos combinados. Díaz de Santos, Madrid. 2012. 987-84-9969-217-3.

Galbete, S. 2013. Viabilidad técnico - económica para un suministro eléctrico 100% renovable en España. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra.

Gebre, S., D, C., O, J., 2021. Multi-Criteria Decision-Making Methods to Address Water Allocation Problems. A Systematic Review. Water. 13. 125. [10.3390/w13020125](https://doi.org/10.3390/w13020125).

Gregorio, M., 2019. Biomasa en España. Generación de valor añadido y análisis prospectivo. Presupuesto y Gasto Público 97/2019: 41-57

https://www.ief.es/docs/destacados/publicaciones/revistas/pgp/97_03.pdf.

Haddad, S., Dones, R., 1991. Comparación de los efectos de diversas fuentes de energía en el medio ambiente y la salud. IAEA. Disponible en:

https://www.iaea.org/sites/default/files/33302041419_es.pdf.

Hwang, C., Yoon, K. 1981. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.

Hirschberg, S., 2008. A comparative Analysis of Accident Risks in Fossil, Hydro, and Nuclear Energy Chains. Human and Ecological Risk Assessment. DOI: 10.1080/10807030802387556.

IAEA, 2019. Country Nuclear Power Profiles Spain.

<https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Spain/Spain.htm>.

IAEA, 2021. Country Nuclear Power Profiles Sweden

<https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Sweden/Sweden.htm>.

IAEA, UNDESA, IEA, Eurostat, AEMA, 2008. Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías. Organismo Internacional de Energía Atómica.

IEA, 2019. Global Energy Review 2019. Disponible en:

<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>.

IEEP, 2020. Europe Sustainable Development Report 2020. Sustainable Development Solutions Network and Institute for European Environmental Policy. Disponible en: https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2020/europe_sustainable_development_report_2020.pdf.

Iberdrola, 2021. ¿Qué es la energía hidroeléctrica?

<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/que-es-energia-hidroelectrica> (consultada el 10 de septiembre de 2021).

IDAE, 2006. Minicentrales hidroeléctricas. Disponible en:

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Minicentrales_hidroelectricas_125f6cd9.pdf.

IDAE, 2020. Cogeneración.

<https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/transformacion-de-la-energia/cogeneracion> (consultada el 11 de septiembre de 2021).

IDAE, 2020. Energías del mar.

<https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/energias-del-mar> (consultada el 15 de septiembre de 2021).

IDAE, 2020 Solar fotovoltaica

<https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica> (consultada el 15 de septiembre de 2021).

Invertia, 2021. Anpier pide limitar el tamaño de los parques fotovoltaicas a las Administraciones. El Español.

https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20210302/anpier-pide-limitar-tamano-parques-fotovoltaicas-administraciones/562944293_0.html.

Jönsson E., Holmberg, S., 2021. Opiniones sobre energía y energía nuclear. Universidad de Göteborgs y Som Institutet. Disponible en: <https://www.gu.se/som-institutet/resultat-och-publikationer/rapporter>.

Lara, M., 2021. Apuntes de la asignatura, Planificación Energética. Universidad de La Coruña.

Lazcano, A., 2014. Análisis del mercado eléctrico en Escandinavia. Trabajo Fin de Grado. Universidad del País Vasco.

Lindmark, M., Olsson-Spjut, F., 2019. The transformation of the organic energy system: the Swedish perspective, Historia Agraria. 77, 59-80.

https://historiaagraria.com/en/issues/magnus_lindmark_fredrik_olsson_spjut-the-transformation-of-the-organic-energy-system-the-swedish-perspective.

Lundberg, F., 2015. Sweden without gas. Acid News. 2.

<https://www.airclim.org/acidnews/sweden-without-gas>.

Magalhaes, D., Silva, F., 2018. A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering. Applied Computing and Informatics. Doi: 10.1016/j.aci.2018.04.004.

Márquez, J.V., 2018. Evolución y perspectivas de la eólica offshore en España. AEE. Disponible en: https://www.aeeolica.org/images/AEE_Opina/181001-CUADERNOS-DE-ENERGIA_Evolucion-y-perspectivas-de-la-eolica-offshore-en-Espana_JV-Marquez.pdf.

MITECO, 2021. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en:

<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>.

Montt, G., Maître, N., Amo-Agyei, S., 2018. The transition in play: Worldwide employment trends in the electricity sector. International Labour Office. Disponible en: https://labordoc.ilo.org/discovery/fulldisplay/alma994987492402676/41ILO_INST:41ILO_V1.

Naciones Unidas, 2015. Objetivos de desarrollo sostenible.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (consultada el 10 de noviembre 2021).

Naturgy, 2021. Historia del gas natural y Nedgia. <https://www.nedgia.es/conocenos/gas-natural/historia-del-gas-natural-y-nedgia/> (consultada el 16 de octubre 2021).

NEA, IEA, 2015. Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition. Disponible en: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14756/projected-costs-of-generating-electricity-2015-edition?details=true.

NEA, IEA, 2021. Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>.

Nord Pool, 2020. History. <https://www.nordpoolgroup.com/About-us/History/> (consultada el 19 de noviembre de 2021).

Nord Pool, 2015. List of changes in day-ahead and intraday areas.

<https://www.nordpoolgroup.com/4a7b04/globalassets/download-center/day-ahead/elspot-area-change-log.pdf> (consultada el 19 de noviembre de 2021).

Nordhaus, W., 1995. The Swedish Dilemma. Occasional Paper. Studieförbundet Näringsliv och Samhälle, Estocolmo. 1400-2159.

OMIE. 2021. Mercado de electricidad.

<https://www.omie.es/es/mercado-de-electricidad> (consultada el 1 de noviembre 2021).

Pickard, S., Scott, A., 2021. FAQ 2: oil and gas, poverty and economic development. Odi. <https://odi.org/en/about/our-work/climate-and-sustainability/faq-2-oil-and-gas-poverty-and-economic-development/>.

Preem, 2019. Europe's most modern refineries. <https://www.preem.se/en/in-english/about/refineries/> (consultado el 24 de octubre 2021).

REE, 2021. Informe del sistema eléctrico español 2020, Madrid. Disponible en: https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2021/06/downloadable/inf_sis_elec_ree_2020_0.pdf.

REE, 2015. Informe del sistema eléctrico español 2014, Madrid. Disponible en: <https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/informe-anual-sistema/informe-del-sistema-electrico-espanol-2014>.

Regeringen, 2021. Sweden's Integrated National Energy and Climate Plan The Ministry of Infrastructure. Disponible en:

https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/se_final_necp_main_en.pdf

Ritchie, H., Roser, M., 2020. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Published. OurWorldInData.org. Retrieved <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.

Roca, J., 2019. Suecia plantea escenarios con 25 GW de solar en 2040 para descarbonizar su sistema energético. El periódico de la energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/suecia-plantea-escenarios-con-25-gw-de-solar-en-2040-para-descarbonizar-su-sistema-energetico/>.

Schön, L., 2008. Suecia - Crecimiento económico y cambio estructural, 1800-2000. Enciclopedia EH. <http://eh.net/encyclopedia/sweden-economic-growth-and-structural-change-1800-2000/>.

Selectra, 2021. Precio del kWh de Gas Natural en España. <https://preciogas.com/faq/precio-kwh> (consultada el 12 de octubre 2021).

Sudriá, C., 2006. Un bosquejo histórico de la energía en la industrialización de España. Energía: Del Monopolio al Mercado. CNE, diez años en perspectiva. 41-65. <https://www.ariae.org/servicio-documental/un-bosquejo-historico-de-la-energia-en-la-industrializacion-de-espana-en>.

Sweden, 2021. Swedes use a lot of energy – yet, emissions are low. The key? Renewable energy. <https://sweden.se/climate/sustainability/energy-use-in-sweden> (consultada el 24 de octubre 2021).

Sweden Statistics, 2019. Annual Report 2018. 1654-1677. Disponible en: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/other/other/other-publications-non-statistical/pong/publications/official-statistics-of-sweden---annual-report-2018/>.

Swedish Energy Agency, 2011. Energy in Sweden 2011. Swedish National Energy Administration.

Swedish Energy Agency, 2021. Energy in Sweden 2021. Swedish National Energy Administration. Disponible en: <https://www.energimyndigheten.se/en/news/2021/an-overview-of-energy-in-sweden-2021-now-available/>.

TASS, 2020. Russia remains one of Sweden's major oil suppliers, agency says. Russian news agency. <https://tass.com/economy/1118509>.

Villasur, S., 2021. Energía Hidráulica en España ¿es importante? <https://energia.roams.es/energia-renovable/energia-hidraulica/espana/> (consultada el 6 de noviembre 2021).

Viñolas, B. et al., 2009. MIVES: modelo integrado de valor para evaluaciones de sostenibilidad. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Barcelona. pp. 1–24. 978-84-96736-81-8. <http://hdl.handle.net/2117/9704>.

Wind Europe. 2021. Wind energy in Europe. Disponible en:

https://s1.eestatic.com/2021/02/24/actualidad/210224_windeurope_combined_2020_stats.pdf.

Yepes, V., 2018. Clasificación de los métodos de toma de decisión multicriterio multiatributo. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/26/clasificacion-metodos-madm/> (consultada el 24 de noviembre 2021).

YouGov, 2021. Cross-EU polling on renewable energy. European Climate Foundation. Disponible en: <https://europeanclimate.org/resources/europeans-support-new-wind-and-solar-projects-in-their-local-area/>.

Bases de datos:

Wind Power. https://www.thewindpower.net/store_country_es.php?id_zone=3.

Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.

BP. British Petroleum:

<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.