



MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE
VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Análisis de la capacidad de
generación de energía
eólica en Europa mediante
dinámica de sistemas.**

Autor: D. José Paniagua Melendre
Tutor: D. Luis Javier Miguel González
Valladolid, Septiembre, 2017

Contenido

1. Introducción y objetivos	9
1.1- Acuerdos del clima de París	9
1.2- Europa Roadmap 2050:	11
2. Sostenibilidad energética en Europa	16
2.1- Retos en torno al cambio climático	16
2.2- Escasez de combustibles fósiles en Europa.....	21
2.3- Cambio en el mix energético en Europa	24
3. Dinámica de los sistemas	28
3.1 – Identificación del problema y definición del sistema	28
3.2- Representación del sistema. Diagrama causal	29
3.3- Tipos de sistemas	30
3.4- Diagrama de Flujos	31
3.5- Introducción al software de dinámica de sistemas utilizado. VENSIM.....	32
3.6- Fases en la construcción de un modelo	32
3.7- Aplicaciones de la dinámica de sistemas	34
4. Desarrollo del modelo.....	36
4.1- Capacidad inicial instalada 1990-2014.....	38
4.2- Tasa de crecimiento. Crecimiento anual.....	39
4.3- Tiempo de vida de un aerogenerador.....	42
4.4- Aerogeneradores retirados (MW).....	44
4.5- Demanda de energía 1990-2014	47
4.6- Demanda de energía eléctrica prevista.....	48
4.7- Factor de capacidad. Periodo 1990-2014.....	52
4.8- Factor de capacidad. Periodo 2015-2050.....	53
4.9- Factor de capacidad (1990-2050).....	55
4.10- Energía eólica generada (GWh).....	55
4.11- CO ₂ ahorrado por kWh de energía eólica generada	56
4.12- CO ₂ ahorrado al año (Toneladas) por uso de energía eólica	57
4.13- Cantidad de agua m ³ ahorrados por el uso de energía eólica	61
4.14- Variación de coste de MW instalado	63

5. Resultados e interpretación de resultados.....	68
6. Conclusiones del trabajo.....	80
7. ANEXOS	86
8. Bibliografía	112

Resumen:

En la agenda de la política comunitaria europea de los últimos años, las medidas en torno a la impulsión de fuentes de energía renovables han sido crecientes ante la realidad de la carencia de combustibles fósiles (petróleo y gas) y las previsible consecuencias del latente cambio climático. Las principales medidas tomadas surgen como consecuencia de los acuerdos del tratado de París de Diciembre de 2015, y de la Europa Roadmap 2050.

Estas medidas orbitan alrededor de establecer un porcentaje mínimo necesario de energías renovables sobre el total de la energía producida y de establecer un límite a las emisiones de gases causantes de efecto invernadero principalmente CO₂.

En este marco la dinámica de sistemas permite modelar el desarrollo de la energía eólica en Europa en el periodo 1990-2050, y comprobar si el comportamiento tiende a satisfacer el objetivo de las políticas europeas en cuanto a la utilización de los recursos energéticos o no.

Palabras claves: Política energética europea, dinámica de sistemas, modelos de energía eólica.

Abstract:

On the last years schedules of European policy, the measures around boost renewable energy sources has been growing due to the lack of fossil fuels (petrol and gas) and the possible consequences of the climate change. The principal measures born from the agreements of Paris treaty and from the Europe Roadmap 2050.

These principal measures are set a minimum percentage of renewable energy over the total energy generated and set a boundary to greenhouse gas emissions.

In this line the dynamic of system allow to modelate the development of the wind energy in Europe during the period 1990-2050, and check if this behaviour meet the requirements of the european politics target or not.

Key words: European energy policy, dynamic of system, wind energy models.

Objetivos y alcance:

El objetivo del presente trabajo es el de conseguir, utilizando los conocimientos en dinámica de sistemas, un modelo de simulación del desarrollo de la energía eólica para los próximos años en Europa basado por una parte en datos históricos hasta el año 2014 y por otra parte en hipótesis que caractericen la evolución del sistema para el futuro próximo, es decir para el periodo 2015-2050.

Estas hipótesis que son individuales para cada variable que forma parte del sistema global, son explicadas y razonadas a lo largo del trabajo. La principal ventaja de trabajar con un software de dinámica de sistemas como es Vensim radica en que estas variables son editables, es decir el trabajo se puede ir mejorando a medida que aparezcan estudios más detallados sobre cada una de estas variables o se formulen nuevas hipótesis. Así mismo se puede estudiar la sensibilidad de cada una de las variables de entrada sobre los objetivos perseguidos.

Con la construcción del modelo se podrá obtener información relevante sobre la evolución del sistema, considerando a este como el desarrollo de la energía eólica en Europa en el periodo 1990-2050. Esta información puede ser utilizada para relacionar en qué grado se aproximan los objetivos de las políticas energéticas europeas con la realidad que ofrece el modelo propuesto.

Entre las variables más relevantes que pueden analizarse en la simulación del modelo desarrollado estarán: el % de energía eólica sobre el total de la energía eléctrica demandada, los MW de energía eólica instalados en la UE o las toneladas de CO₂ cuya emisión ha sido evitada por utilizar una energía eólica en la producción de energía eléctrica.



Estado del arte, Proyecto MEDEAS:

Medeas, acrónimo de sus siglas en inglés “Modeling the renewable energy transition in Europe” es un proyecto de investigación europeo cuyo objetivo es crear herramientas adecuadas para ayudar al diseño de políticas que favorezcan a la transición del sistema energético europeo hacia uno nuevo basado en energía renovable.

Para ello el principal objetivo es el de crear un modelo, que pueda ser ajustado para estudiar diferentes escenarios y caminos hacia esa transición. En este proyecto MEDEAS participan varias entidades europeas y entre ellas el Grupo de Investigación reconocido en Energía, Economía y Dinámica de sistemas de la Universidad de Valladolid.

MEDEAS será un modelo de dinámica de sistemas que introducirá nuevas variables más allá de las habitualmente consideradas, de modo que pueda proporcionar un diagnóstico más detallado de qué es lo que implica implementar un camino u otro, sobre todo en determinados aspectos socioeconómicos no siempre descritos en otros modelos.

[\(http://www.medeas.eu/\)](http://www.medeas.eu/)

Capítulo 1

Introducción y objetivos.

1. Introducción y objetivos

1.1- Acuerdos del clima de París

En Diciembre de 2015 en París, los principales países del mundo se propusieron un ambicioso objetivo de limitar el aumento de temperatura global del planeta por debajo de los 2°C sobre los niveles pre-industriales y de 1,5°C sobre la temperatura media actual. 195 países de todo el mundo se sumaron a un acuerdo global sobre el clima entre ellos China y EEUU, que por primera vez se comprometieron de manera conjunta a realizar acciones climáticas para conseguir el objetivo que saliera de aquel acuerdo.

Dada la limitada participación en el protocolo de Kyoto, la UE formó una amplia coalición de países desarrollados y en desarrollo para acudir de manera conjunta a dicho tratado de París. La UE fue la primera en presentar las medidas para este acuerdo, medidas en torno a tres pilares básicos [1] [2].

- Reducción de al menos el 40% de emisiones de CO₂ y del resto de gases causantes de efecto invernadero “*greenhouse gases*” (GHG), respecto a los valores de emisión de 1990.
- Al menos un 27% de energías renovables respecto al total de energía producida en el año 2030.
- Al menos un 27% de mejora en eficiencia energética para el año 2030.

Reducción de gases GHG de al menos 40% [1]:

Se crea la EU “*emissions trade system*” (EU ETS), que es la piedra angular de la política europea en la lucha contra el cambio climático. Formada por 31 países (EU-28, Islandia, Noruega, Liechtenstein), pone límites de emisión de gases a 11000 instalaciones (complejos industriales y plantas de generación de energía) cubriendo el 45% de las emisiones de GHG.

EU ETS trabaja bajo el principio “*cap and trade*”, eso significa que diferentes industrias y compañías, dentro de un límite de emisión pre-establecido “*cap*”, pueden comprar “*trade*” o recibir emisiones de gases GHG con otras compañías dentro de los 31 países miembros. Este es un método de reducción de emisiones flexibles, las empresas menos contaminantes no necesitan destinar recursos en comprar permisos de emisión a otras empresas, lo que las hace competitivas.

Por el contrario empresas muy contaminantes, destinan parte de sus recursos financieros a comprar permisos de emisiones, perdiendo competitividad en el mercado.

Mediante la EU ETS se fija una reducción de emisiones de GHG del 21% para el año 2020 respecto a las de 2005, y del 43% para el año 2030, también respecto a las emisiones de 2005.

Energías renovables. Objetivo 27% 2030, eficiencia energética para el año 2030 [1]:

Objetivo marcado por los estados miembros (EU-28), lo que supone una inversión en el periodo 2011-2030 de €38 billones, en investigación y desarrollo de implantación de energías renovables con los siguientes objetivos:

- Reducir la dependencia de importaciones de energía y combustibles fósiles.
- Garantizar la capacidad de suministro energético en Europa.
- Asegurar suministro energético a precio competitivo a los ciudadanos de la EU-28.
- Crear nuevos puestos de trabajo.

1.2- Europa Roadmap 2050 [3]:

Ahora bien en el acuerdo de París se fijó una conciencia a nivel mundial sobre el cambio climático, pero no se hablaba de la hoja de ruta a seguir, se habló de objetivos de reducción de CO₂ para el año 2030, pero no se especificaban las políticas para alcanzarlo.

En cambio la European Roadmap 2050 es un estudio de las políticas Europeas necesarias para alcanzar un objetivo de descarbonización del 80% respecto a los valores de emisión de 1990, en línea con la seguridad energética, la responsabilidad medioambiental y económica y los objetivos de la UE.



Figura 1 Instituciones y empresas colaboradoras con el estudio energético elaborado para la Europa Roadmap 2050 [3]

Para lograr este objetivo de descarbonización del 80% en el año 2050, se fijaron una serie de acciones prioritarias para el periodo 2015-2020, este estudio fue desarrollado principalmente por la European Climate Foundation (ECF) con colaboración de algunas de las instituciones de investigación y divulgaciones científicas más prestigiosas de Europa.

Prioridades periodo 2015-2020:

- 1) Eficiencia energética: En este contexto de trabajo, el uso de fuentes de energía renovables como la eólica proporcionan una mayor eficiencia energética que las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles, el ratio GWh producidos entre MW instalados es mayor en las energías renovables, por ejemplo si se compara un parque eólico con una central térmica, y estas diferencias aumentan a medida que se aumentan los costes en investigación

- 2) Low-Carbon Technology: Este objetivo implica una coordinación entre el desempleo de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles y la implementación de energía eólica On-Shore y Off-shore, biomasa, células de combustibles, bombas de calor, sistemas de almacenamiento térmico en paralelo a sistemas de captación o adsorción de CO₂.
- 3) Mercado y red de energía Europea: La idea es producir cada tipo de energía, dónde sea más barato y eficiente producirla y llevarla a otros puntos de Europa por una red de conexión.



Figura 2 Red de intercambio de energía europeo modelado por la Europa Roadmap 2050 [3]

En esta red de energía europea (Figura 2), la ECF propone al Reino Unido, Irlanda y Dinamarca y a la zona Norte de España como los principales productores de energía eólica y a la zona sur de España y a Italia (zona mediterránea) como los principales productores de energía solar. Además en el caso español cabría una tercera fuente de energía que sería la energía hidráulica procedente de saltos de agua en embalses y pantanos.

La red de energía construida comunicaría estos puntos dónde producir cada tipo de energía es teóricamente más barato, a aquellos puntos del territorio europeo dónde se demandase esa energía.

Transformación del modelo energético:

Las consecuencias de esta transformación energética se moverían en torno a tres pilares básicos, menor precio por unidad de energía producida paralelamente a mayor estabilidad en los precios de producción, aumentar la seguridad de suministro energético y finalmente menores emisiones de gases (GHG):

- 1) Menores precios por unidad de energía producida a la vez que precios más estables y predecibles: Mientras la generación de energía procedente de combustibles fósiles es cada vez más cara por el agotamiento de los mismos, el precio de producción de energía eólica disminuye, a medida que se amortizan los costes en investigación y se desarrolla la tecnología.

Cost and technology assumptions for major renewable and conventional technologies in 2030 and 2050.

Technology	Spec. Investment [€/kW]		O&M cost [€/kW/a]		Fuel cost [€/MWh]		Lifetime [years]	Efficiency [%]
	2030	2050	2030	2050	2030	2050		
Wind	1000	900	30	30	0	0	25	-
PV	730	700	30	19	0	0	25	-
CSP	3300	2660	64	45	0	0	30	-
Gas-GT	380	380	9.7	9.7	27.68	26.82	30	40
Gas-CCGT	750	750	11.1	11.1	27.68	26.82	30	60
Coal	1450	1450	34.5	34.5	7.47	6.86	40	48
Lignite	1500	1500	45	45	3.75	3.75	40	47
Pump storage	1700	1700	28.9	28.9	0	0	40	91

Figura 3 Tabla de costes de distintas fuentes de generación de energía eléctrica [4]

Como se puede observar en la anterior tabla elaborada por la IRENA [4](International Renewable Energy Agency), los costes de generación de energía eólica (€/kW) son ligeramente menores respecto a otras tecnologías, tanto en investigación (primera columna), como en operación y mantenimiento (segunda columna).

- 2) Seguridad de suministro de energía junto con estabilidad económica: Europa es un conjunto de países con escasez de combustibles fósiles, lo que obliga a comprar combustibles a países de otros continentes. Por otro lado la escasez de combustibles fósiles se hará más notoria a medida que nos acerquemos al año 2050 por lo que Europa se ve obligada a adquirir combustibles a precios cada vez mayores debido a la disminución de la oferta.

3) La reducción del 80% para el año 2050 de gases GHG es tecnológicamente posible, la reducción elaborada por la ECF para la Europa Roadmap 2050 se desglosa por sector a lo largo del periodo 1990-2050. Figura (4).

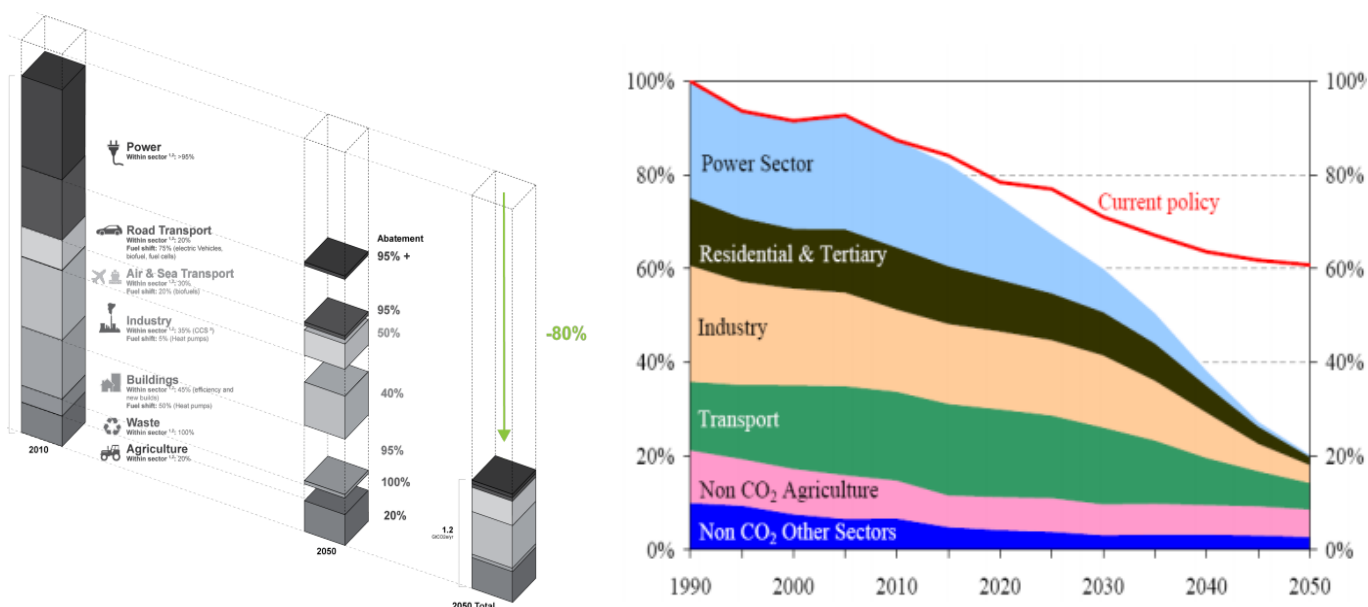


Figura 4 % de reducción de emisión de CO₂ desglosado por sector para el año 2050 [3]

En la hoja de ruta de la Europa Roadmap 2050, se desglosan los sectores que causan más emisiones de CO₂ actualmente, básicamente la generación de energía eléctrica, el transporte por carretera, el transporte marítimo y aéreo, la industria manufacturera en general, la agricultura y otros sectores.

Ahora bien la mayor parte de las emisiones de CO₂ proceden de la generación de energía eléctrica, emisiones desprendidas durante la combustión de combustibles (gas, petróleo, carbón). La Europa Roadmap 2050 fija este sector como un objetivo principal de disminución de las emisiones de CO₂.

Es aquí donde la energía eólica juega un papel determinante a la hora de substituir la cobertura de energía eléctrica generada por las fuentes de energía basadas en la combustión de combustibles fósiles, por energía con prácticamente emisiones nulas de carbono, en este trabajo mediante dinámica de sistemas, se podrá dar un modelo que represente el grado de desarrollo de la energía eólica en Europa, y de esta manera poder comparar los objetivos de reducción de emisiones de CO₂ de la Europa Roadmap 2050 con la realidad.



Capítulo 2

Sostenibilidad energética en Europa

2. Sostenibilidad energética en Europa

2.1- Retos en torno al cambio climático [5]

Actualmente la temperatura media global del planeta es 0'85°C superior a la temperatura media a finales del siglo XIX, de hecho desde que se tienen registros, es decir en el año 1850 las temperaturas medias no han dejado de aumentar (Figura 5).

Los mayores estudios científicos apuntan que la actividad humana es la principal responsable de este calentamiento global, al mismo tiempo la comunidad científica apuntan que un aumento de 2°C sobre la temperatura en la era preindustrial, es el límite más allá del cual se produzcan cambios peligrosos y catastróficos para el medio ambiente global, por esta razón la comunidad internacional ha reconocido la necesidad de mantener este calentamiento por debajo de los 2°C.

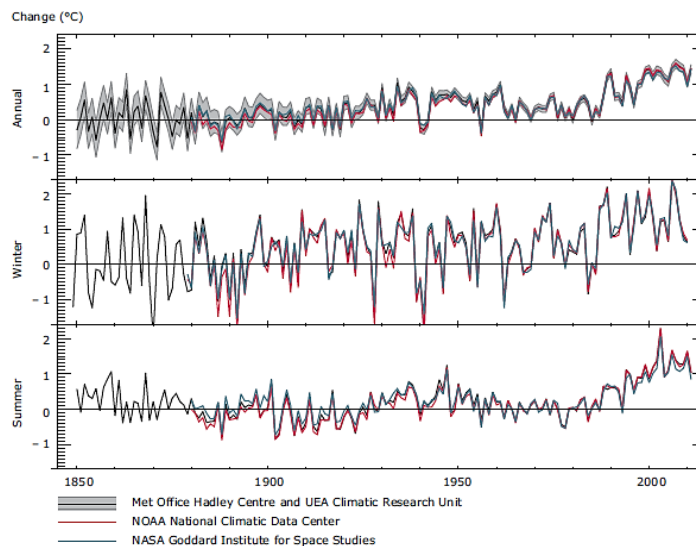


Figura 5 Aumento registrado de la temperatura media del planeta en el periodo 1850-2000 [5]

Las consecuencias del cambio climático son ya evidentes, el aumento de la temperatura media global del planeta, el cambio de régimen de precipitaciones, el deshielo constante de los casquetes polares con el consecuente aumento mundial de la altura del nivel de los mares. Los citados problemas proceden de la emisión de gases de efecto invernadero (Green House Gases GHG) derivados de la actividad humana. Para prevenir el cambio climático, es necesario por tanto mitigar las emisiones de estos gases.

Las principales actividades humanas que provocan la emisión de gases GHG son:

- Combustión de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón) desprendiendo gases principalmente CO₂, en la generación de energía eléctrica, transporte, industria y hogares (CO₂).
- La tala de selva tropicales (deforestación), los árboles absorben CO₂ de la atmósfera y de esa forma ayudan a regular el clima.
- Los fertilizantes con nitrógeno producen emisiones de óxido nitroso.
- El desarrollo de la ganadería, las vacas y ovejas producen metano durante su digestión.
- Uso gases cloro Fluor Carbonados (CFG), su efecto sobre el calentamiento del planeta es 23000 veces más potentes al del CO₂, su uso está legislado por la UE.

Las consecuencias predecibles a causa del cambio climático desglosado por distintas zonas de la UE se resumen en la siguiente figura (Figura 6)(Tabla 1)(Tabla 2)(Tabla 3):

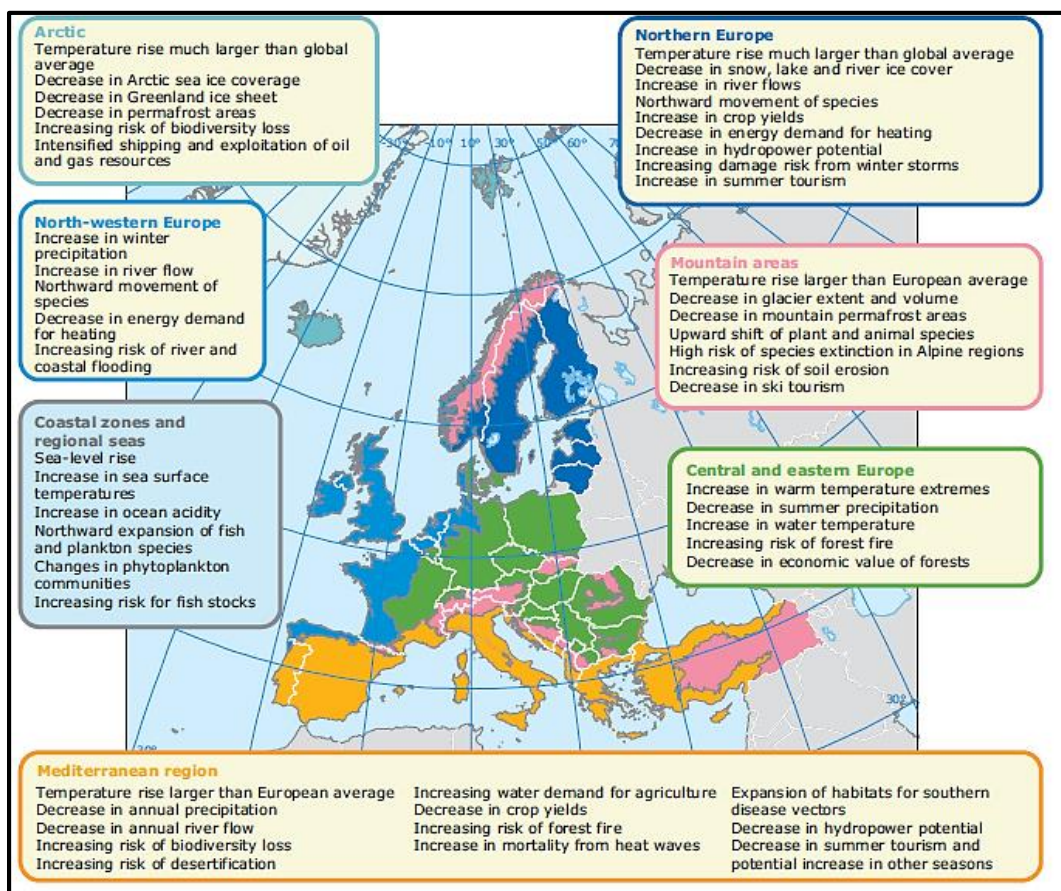


Figura 6 Impactos predecibles del cambio climático para cada zona de Europa [5]

[5] Impacto regional y vulnerabilidad por zonas (Figura 6):

Centro y Este de Europa:

Temperaturas extremas y variantes día noche junto con un régimen de escasez de precipitaciones durante el periodo estival pueden suponer un gran riesgo de sequías, incrementando a su vez la demanda de energía durante el verano (climatización). El aumento de precipitaciones durante el invierno y la primavera supone un mayor riesgo de desbordamiento de ríos e inundaciones. El rendimiento de los cultivos será menor debido al régimen de precipitaciones. La escasez de precipitaciones en verano también facilita la aparición y propagación de incendios.

Zona ártica:

Esta zona se ve afectada por un aumento de la temperatura superior a la de otras zonas, el deshielo de parte de la superficie y la descongelación del permafrost. Estos fenómenos afectan gravemente sobre el frágil ecosistema de esta zona, muy sensible al cambio de condiciones climáticas. Por otra parte también puede verse como una oportunidad de negocio, explotando nuevas zonas con previsiblemente potencialidad de combustibles fósiles.

Zona mediterránea:

La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura implican una menor accesibilidad al agua, un menor rendimiento de los cultivos, un mayor riesgo de incendios y deforestación junto con pérdida de biodiversidad. La energía producida por fuentes hidroeléctricas será menor, mientras tanto las condiciones climáticas serán menos agradables para el turismo, fortaleza económica de la región.

Norte de Europa:

Deshielo de cierta áreas, provocando el aumento del nivel de los ríos en algunas partes (ej Noruega) y la disminución en otras (ej Finlandia). También se producirá un mayor número de tormentas. En el lado contrario también supone algunas oportunidades como un aumento de la variedad de los cultivos, mayor energía producida por fuentes hidroeléctricas y menor uso de energía en calefacción.

Noroeste de Europa:

En esta región, existen zonas terrestres vulnerables, susceptibles de ceder terreno al mar como consecuencia del deshielo, esto podría ocurrir en determinadas áreas costeras de Dinamarca, Bélgica, Países Bajos, y Reino Unido. Además el mayor régimen de precipitaciones en invierno supone un aumento del nivel de los ríos y del peligro de inundaciones.

A continuación se recoge en las siguientes tablas (Tabla1), (Tabla 2), (Tabla 3), información sobre el impacto actual y previsible que el cambio climático provoca, desglosado por variables afectadas y por zona de influencia:

Indicador	Variable	Norte de Europa (ártico)		Nor-oeste Europa		Centro y Este Europa		Zona mediterránea	
		O	P	O	P	O	P	O	P
Temperatura global	Tª	+	+	+	+	+	+	+	+
Tª extremas (calor)	Frecuencia	+	+	+	+	+	+	+	+
Tª extremas (frio)	Frecuencia	-	-	-	-	-	-	-	-
Precipitaciones abundantes	Cantidad	+	+	+	+		+	-	+
Sequías	Duración	+		+				+	
Tormentas	Viento	+	+	+	+	+	+		-
Nieve (capas)	Duración	+	+	-	-	-	-	-	-
Glaciares	Masa	+	-	-	-	-	-	-	-
Permafrost	Masa	+	+	-	-	-	-	-	-

Tabla 1 Variables observadas y predecibles del cambio climático en Europa [5]

(+) Aumento de magnitud, consecuencias positivas

(+) Aumento de magnitud, consecuencias negativas

(-) Disminución de magnitud, consecuencias positivas

(-) Disminución de magnitud, consecuencias negativas

	variable	Norte de Europa (ártico)		Nor-oeste Europa		Centro y Este Europa		Zona mediterránea	
		O	P	O	P	O	P	O	P
Nivel de los mares	Altura	+	+	+	+	+	+	+	+
Caudal de los rios	Flujo	+	+	+	+	+	+	-	-
Inundaciones	Max flujo	+	+	+	+	+	+	+	+
Tª del agua	Tª	+	+	+	+	+	+	+	+
Crecimiento cultivos	Duración	+		+		+			-
Agrofenología	Días al año	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua necesaria en cultivos	Rendimiento	+	+	+	+		+	-	-

Tabla 2 Variables observadas y predecibles del cambio climático en Europa [5]

	variable	Norte de Europa (ártico)		Nor-oeste Europa		Centro y Este Europa		Zona mediterránea	
		O	P	O	P	O	P	O	P
Masa de monte	Biomasa		+		+		+		-
Incendios forestales	Área							+	+
Inundaciones	Mortandad				+				+
Salud personas altas Tª	Mortandad						+		+
Polución del aire	Nivel ozono	+		+		+		+	+
Calor demandado	GJ	-	-	-	-	-	-	-	-
Electricidad demandada	GJ		-					+	
Producción electricidad	GJ		+		-		-		-
Turismo General	Turistas		+		+		+		-
Turismo invierno	Turistas		+		+		+		
Acidificación mares	pH							+	+

Tabla 3 Variables observadas y predecibles del cambio climático en Europa [5]

(+) Aumento de magnitud, consecuencias positivas

(+) Aumento de magnitud, consecuencias negativas

(-) Disminución de magnitud, consecuencias positivas

(-) Disminución de magnitud, consecuencias negativas

2.2- Escasez de combustibles fósiles en Europa

En el siglo XVIII el economista inglés Robert Malthus publicó en “Ensayo sobre el principio de la población” un estudio donde demostraba que la población crecía exponencialmente mientras los recursos sólo lo hacían aritméticamente, y apuntaba a la desigualdad económica y a la pobreza de las clases trabajadoras de la época como consecuencia del crecimiento de la población y a la escasez de los recursos.

En relación con la anterior, Europa actualmente es una región con población estanca en torno a los 320 millones de habitantes (sXXI), pero que si presenta escasez de algunos recursos como los combustibles fósiles (petróleo y gas) tal como se muestra a continuación:

Fenómeno del “peak-oil”

El petróleo dentro de las rocas no se encuentra formando lagos o piscinas sino que se encuentra dentro de intersticios o poros de rocas permeables “protegidas” por rocas impermeables que ejercen presión. Al perforar las rocas impermeables, el petróleo fluye por los poros empujado por la alta presión.

Ahora bien a medida que se explotan los pozos de mejor acceso, es necesario acudir a perforaciones más grandes y profundas o realizar más perforaciones, por lo que la presión disminuye y por tanto el petróleo sale hacia el exterior más despacio. Esto no quiere decir que los yacimientos de petróleo vayan a agotarse en un futuro próximo, sino que el declive de producción de miles de yacimientos no podrá ser compensado con el descubrimiento de nuevos pozos.

Cada vez más, el petróleo estará más esparcido, a mayor profundidad y en entornos más hostiles, esto significa que no solo costará más dinero obtenerlo, también más refinamiento técnico y más energía, en definitiva más recursos.

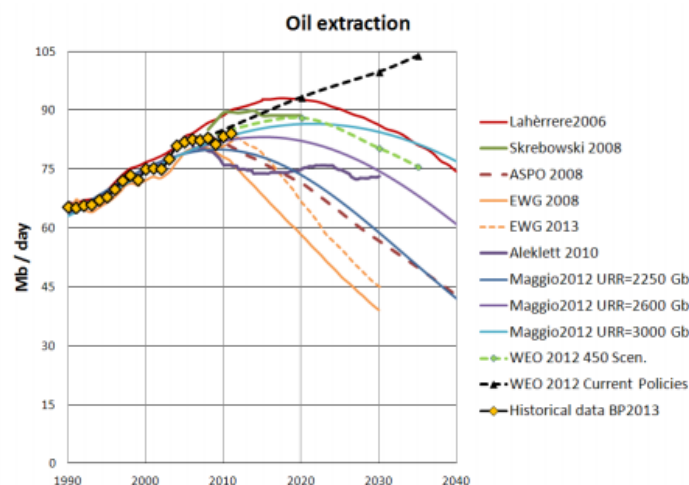


Figura 7 Literatura sobre el "peak-oil" [36], [37], [38], [39], [40], WEO World Energy Outlook 2012

Diferentes autores muestran como existe este cénit del petróleo o pico del petróleo que alcanza valores máximos en torno al periodo 2000-2010. Por otro lado se empieza a observar como la repercusión inmediata de este “peak-oil” es un aumento de los precios del petróleo por barril. Como se ve en la siguiente gráfica los precios del crudo siguen una progresión ascendente casualmente desde el año 2000 (exceptuando el periodo de regresión económica mundial de 2008). Todo hace indicar que la tendencia de precios seguirá siendo creciente en los próximos años.

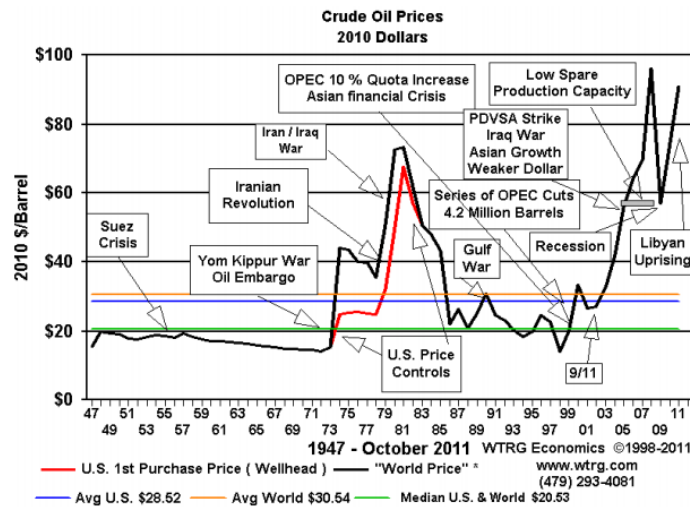


Figura 8 Precios del crudo del petróleo periodo 1947-2011 [35]

Escasez de gas natural:

Los factores geopolíticos que afectan a la extracción del gas, se encuentran inevitablemente unidos a los de la extracción del petróleo, por lo que la situación se repite. Llegará un momento en que las extracciones en declive de los yacimientos de gas natural antiguos, no pueda ser compensado con extracciones en nuevos yacimientos, dando lugar a lo que se conoce como el cenit del gas. En la siguiente gráfica se muestra este fenómeno para el periodo 1990-2050.

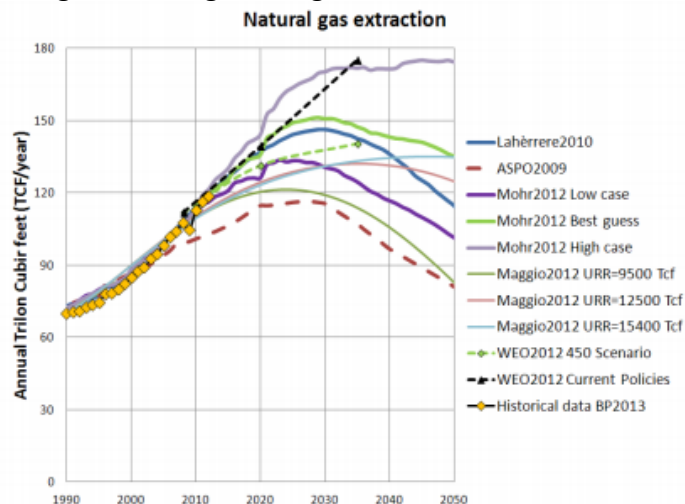


Figura 9 Curva del cenit del gas [41], ASPO Newsletter n100 2009, [42], WEO World energy Outlook 2012 OECD/IEA

La situación de este cenit del gas resulta más alarmante en Europa, por el hecho de que la producción neta de gas se encuentra muy por debajo de las necesidades de gas consumido, teniendo que acudir a las importaciones. Ahora bien para los principales suministradores de gas a Europa, básicamente Rusia y Noruega, se les pronostica que alcanzaran su cenit del gas particular en torno al año 2015 [6], por lo que el precio del gas importado en Europa crecerá exponencialmente a partir del mismo año 2015.

FIGURE 1 - EU GAS CONSUMPTION, IMPORTS AND PRODUCTION

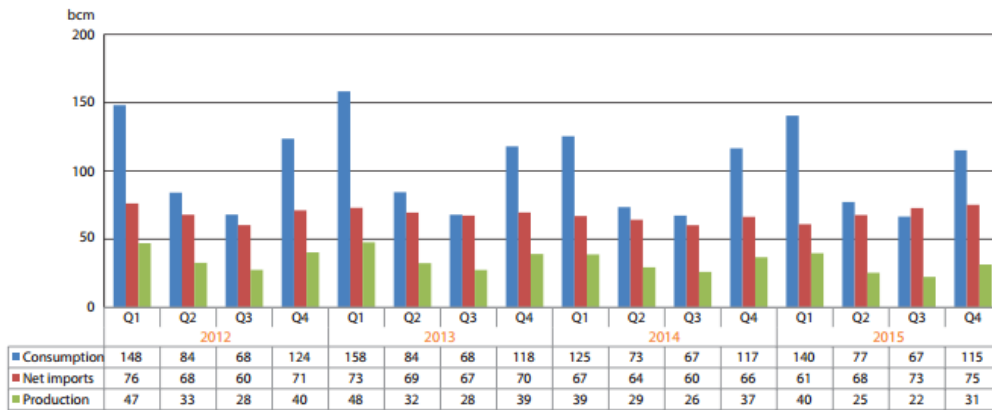


Figura 10 Source: Eurostat, data as of 12 May 2016 from data series nrg_103m. Net imports refer to imports minus exports. Note: Eurostat methodologica.

La gráfica (Figura 10) muestra una media de consumo de gas natural en Europa durante el periodo 2012-2015 de 130 billones de metros cúbicos, mientras que la media de la producción neta en el mismo periodo oscilaba en torno a los 35 billones de metros cúbicos de gas, la diferencia entre ambas cantidades son por tanto las importaciones, por tanto la gráfica refleja como Europa claramente es una región importadora de gas.

2.3- Cambio en el mix energético en Europa

La substitución paulatina de fuentes de generación de energía no renovables por fuentes de energía renovables en los últimos años en Europa es una realidad. Los gobiernos de los distintos países de la UE han realizado esfuerzos en mayor o menor medida por fomentar las renovables, especialmente la eólica y la solar fotovoltaica.

La crisis o desaceleración económica mundial originada en el 2008, afecto también a las carteras de economía de los gobiernos de los países Europeos, las ayudas destinadas a fomentar las renovables disminuyeron, por lo que los MW instalados al año de energías renovables se estancaron. La Europa Roadmap 2050 y los pasos marcados por los acuerdos del clima de París supusieron un nuevo impulso, para la implantación de renovables.

El porcentaje de cada fuente de energía utilizado en cada país de la UE para el año 2014 se muestra en la siguiente gráfica (Figura 11):

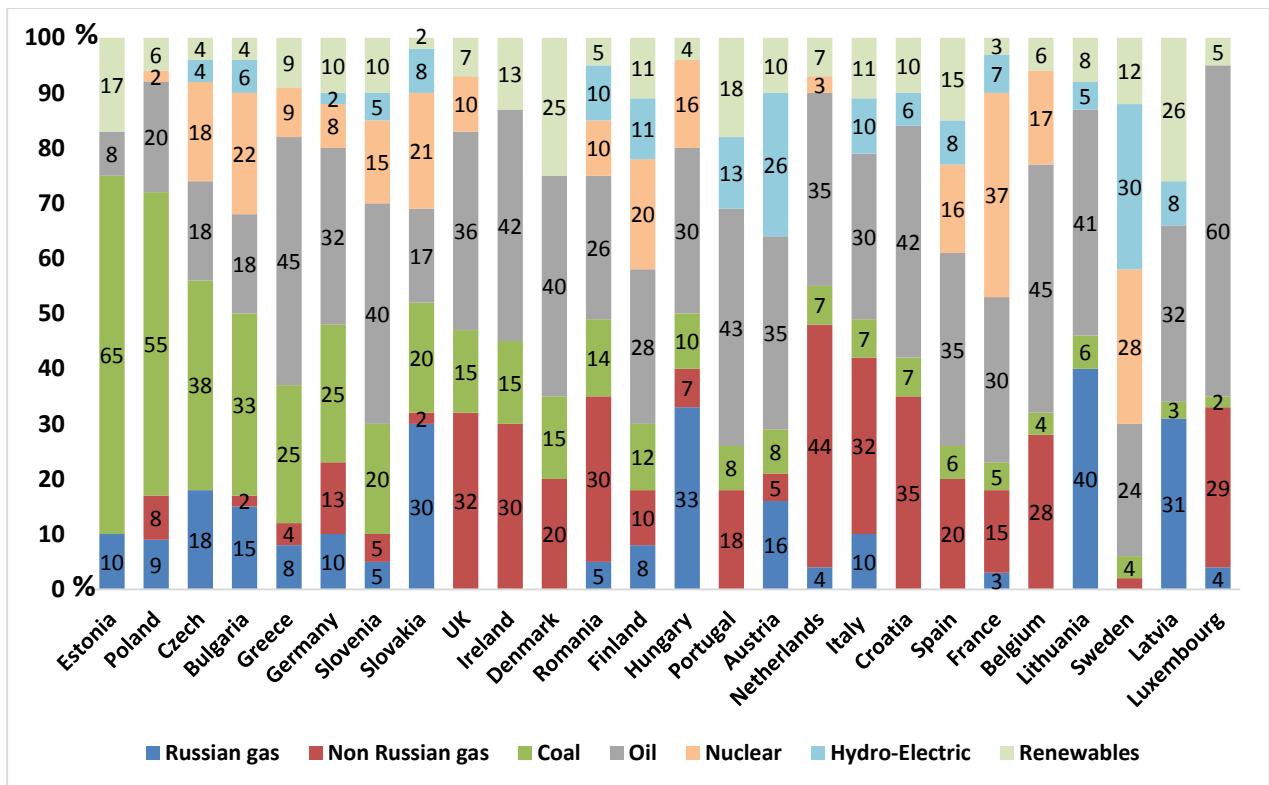


Figura 11 % de los recursos energéticos utilizados en la producción de energía por país de la UE en el año 2014 [19]

Como consecuencia es evidente un cambio de tendencia en el mix energético en Europa, las fuentes de generación de energía renovables tienen cada vez más importancia abarcando el 28% de la generación total de energía en Europa en el año 2014.

De este 28%, la hidroeléctrica contribuye en mayor medida al porcentaje de generación total 12%, seguido de la eólica 8%, la energía solar 3% y otras renovables 5% dónde se engloban la biomasa, la geotérmica, la mareomotriz..

Ahora bien, si hacemos zoom sobre la implantación de la energía eólica, también se pueden sacar algunas conclusiones. Los primeros MW de energía eólica fueron instalados por primera vez a principios de la década de los 90 en las principales potencias Europeas, salvo una excepción, Dinamarca ya tenía instalaciones eólicas en los 80, por tanto, tal como se puede comprobar en la siguiente gráfica, en el año 1990 el 71,8% de los MW instalados en Europa se encontraban en Dinamarca.

A lo largo del periodo 1990-2014, se puede comprobar que existe un país en la UE, dónde los MW de energía eólica son cuantitativamente muy superiores a los MW instalados en cualquier otro país europeo, este país es Alemania. Esta diferencia se puede explicar básicamente, en que es el país Europeo con mayor población y de los de mayor superficie (aproximadamente 82,67 millones de habitantes), su capacidad económica, y el desarrollo de su sector secundario.

El segundo país con más MW de energía eólica instalados en Europa es España, que llegó a alcanzar el 24,3% de los MW instalados en el año 2010, fue entonces cuando las ayudas a la implantación de energía eólica se acabaron como consecuencia de la crisis económica mundial, de tal manera que en el año 2014, se redujo ese mismo porcentaje al 17,8%.

Otros países con gran capacidad eólica instalada son UK 10,1%, Francia 7%, Italia 6,7% y Holanda 2,2%, en el otro lado los países con menos MW de energía eólica instalados de Europa son la Republica Checa y Eslovaquia, todos estos datos los podemos observar en la siguiente figura (figura12):

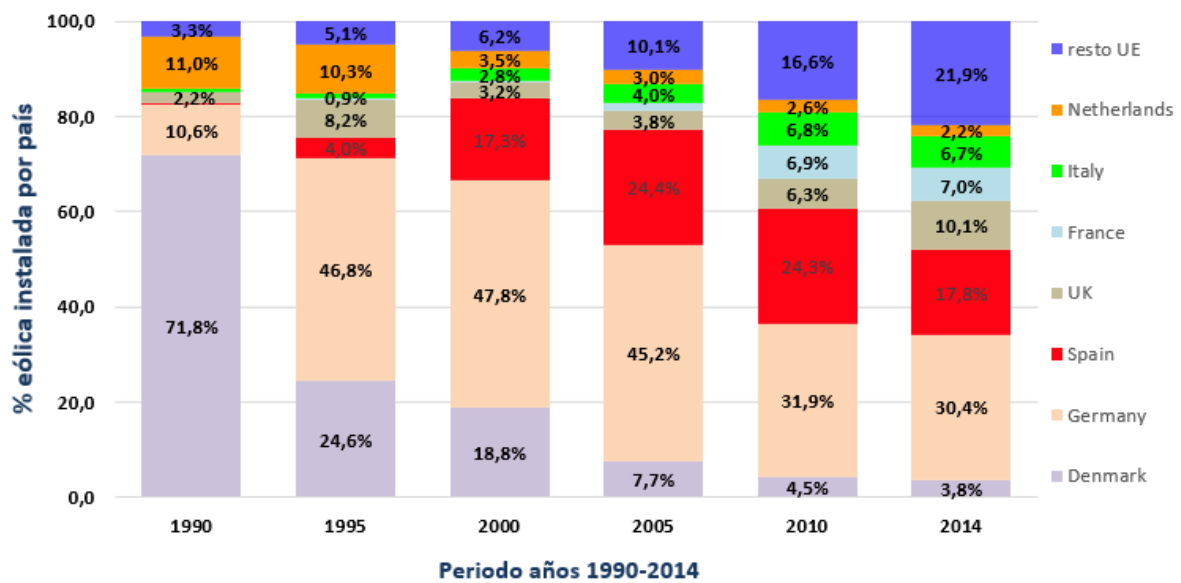


Figura 12 Datos Eurostat, porcentaje de MW de energía eólica instalados por país, periodo 1990-2014.

En (Figura 12) se puede observar como en el año 1990, Dinamarca ocupaba el 71,8% de la energía eólica instalada, es decir Dinamarca fue el país pionero de Europa en tecnología eólica, en gran parte debido a la eólica Off-shore. También es significativo el desarrollo temprano de Holanda (11% del total en el año 1990), teniendo en cuenta el tamaño y la población de este país centro-europeo.

A partir del año 1995 los dos países con más MW de eólica instalada son Alemania y España. El resto de países de la UE, países en general más pequeños han ido aumentando también su capacidad eólica hasta poseer el 21,9% del total de la potencia eólica instalada en el año 2014.



Capítulo 3

Dinámica de los sistemas

3. Dinámica de los sistemas [7] [8] [9]

Previamente a abordar el concepto de dinámica de sistemas, hay que entender el significado de sistema como un conjunto de **elementos independientes** con **interacciones** estables **entre sí**, por lo tanto para comprender el comportamiento de un sistema, no sólo es necesario **definir** los **elementos** que forman el mismo, sino también las diferentes **relaciones entre elementos**.

El punto de vista de la dinámica de sistemas es cualitativamente diferente al de otras técnicas de construcción de modelos socioeconómicos, como por ejemplo la econometría. La econometría utiliza los datos empíricos como base de los cálculos estadísticos que determinan el sentido y la correlación de los diferentes factores. La evolución del modelo es consecuencia de datos históricos y es la estadística quien relaciona los parámetros del sistema de ecuaciones.

En cambio, el objetivo primordial de la **dinámica de sistemas** es el de comprender todas las causas estructurales que determinan el comportamiento del sistema. Esto implica conocer en mayor profundidad cada elemento del sistema, y determinar la sensibilidad de cada acción en el devenir del sistema. Por tanto los datos históricos juegan un papel secundario en la construcción de modelos, siendo la lógica interna y las relaciones estructurales los actores fundamentales.

La otra característica importante de la dinámica de sistemas en su **enfoque a largo plazo**, sólo en una escala de tiempos suficientemente grande se puede percibir la tendencia de comportamiento fundamental.

3.1 – Identificación del problema y definición del sistema

Como se ha mencionado en el apartado anterior, un sistema es la unión de un conjunto de **elementos interrelacionados**, de tal forma que el cambio en uno de los elementos afecta a todos ellos. Un buen método para definir el sistema es comenzar por identificar el problema a determinar, añadir a su alrededor los aspectos relacionados directamente con el problema, y alrededor de estos otros aspectos relacionados con ellos, por tanto aspectos que afectan al problema principal indirectamente.

3.2- Representación del sistema. Diagrama causal

El diagrama causal recoge los elementos principales que forman el sistema, así como las distintas interrelaciones entre los elementos del mismo. Conocidas las variables globales y las relaciones entre ellas, se procede a la representación gráfica. A las variables se las representa como un origen o un destino, mientras que las relaciones se representan como flechas o arcos.

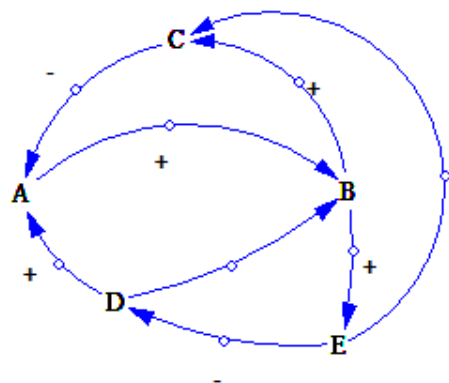
Las flechas van acompañadas por un signo positivo o negativo, el signo + implica que un cambio en la variable origen producirá un cambio en el mismo sentido en la variable destino, la situación contraria ocurriría con un signo negativo.



Cuando un aumento de A produce un aumento del valor de la variable B, o bien una disminución de A, provoca una disminución de B, la influencia entre variables es positiva, justo la situación inversa se da cuando la influencia es negativa.

Retroalimentación/bucles.

Una cadena cerrada de relaciones causales recibe el nombre de bucle o feedback.

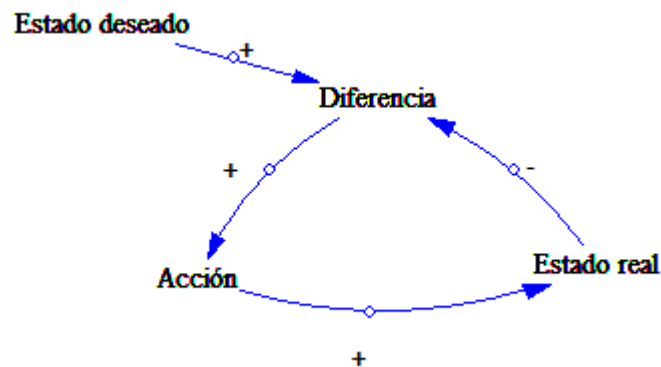


Los bucles se definen como **bucles positivos** cuando el número de relaciones negativas es par, y negativos si el número de relaciones negativas es impar. Los **bucles negativos** conducen al modelo a situaciones **estables**, mientras que los bucles positivos llevan al modelo a situaciones **inestables**, con independencia de la situación de partida.

3.3- Tipos de sistemas

La estructura interna determina el comportamiento de los sistemas, y así podemos establecer una tipología de la estructura de los sistemas atendiendo al comportamiento que nos muestran.

La estructura básica de los sistemas estables se encuentra formada por **estado deseado** que se compara permanentemente con el **estado real**, dando lugar a una **diferencia**, y en base a esta diferencia el sistema toma una **acción** para igualar el estado real al deseado



En estos sistemas estables la estructura es siempre la misma, el número de relaciones negativas es impar y el bucle es siempre negativo. Este es el estado habitual de los sistemas, si un sistema por el contrario es negativo, difícilmente se podrá estudiar, ya que su estado habrá cambiado antes de poder analizarlo.

Sistemas hiperestables:

Cuando un sistema se encuentra formado por múltiples bucles negativos, cualquier acción que intenta modificar un elemento no se ve contrarrestado sólo por el bucle en el que se halla dicho elemento, sino por todo el conjunto de bucles negativos que actúan en su apoyo, super-estabilizando el sistema.

Cuando existe discrepancia entre el estado real y los objetivos el sistema toma acciones para acercarse a dicho objetivo, la magnitud de las acciones es mayor cuando mayor es la diferencia.



Sistemas sigmoidales:

Son sistemas donde al principio su comportamiento es dirigido por un bucle positivo que lo hace crecer exponencialmente, para posteriormente ser dirigido por un bucle negativo, que anula los efectos del anterior bucle y estabiliza el sistema situándolo en un valor asintótico.

3.4- Diagrama de Flujos

El Diagrama de Flujos, también denominado Diagrama de Forrester, es el diagrama característico de la Dinámica de Sistemas. Es una traducción del Diagrama Causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad.

Los diferentes elementos que aparecen en un diagrama de flujo son los siguientes:

Niveles: son elementos que muestran en cada instante la situación del modelo, presentan una acumulación y varían sólo en función de otros elementos denominados flujos.

Flujos: son elementos que pueden definirse como funciones temporales, recogen las acciones resultantes de las acciones tomadas en el sistema, determinando la variación de los niveles.

Variables auxiliares y constantes: son parámetros que permiten una mejor visualización de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.

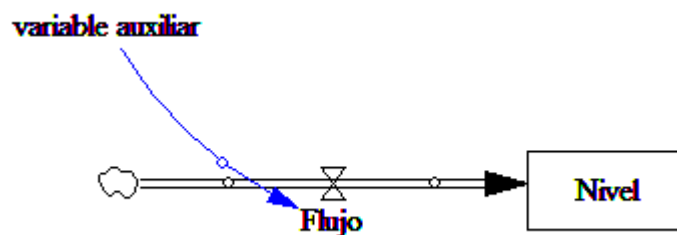


Figura 13 Diagrama de Flujo o diagrama de Forrester

3.5- Introducción al software de dinámica de sistemas utilizado. VENSIM

Vensim es una herramienta gráfica de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas. Vensim proporciona una forma simple y flexible de crear modelos de simulación, sean con diagramas causales o con diagramas de flujos.

Las relaciones entre los elementos del sistema representan las relaciones causales, que se muestran mediante la conexión de palabras con flechas. Esta información se usa después por el editor de ecuaciones para crear el modelo de simulación. Se puede analizar el modelo teniendo en cuenta las causas y el uso de las variables, y también estudiando los ciclos relacionados con una variable. Vensim permite documentar automáticamente el modelo según se va construyendo y crear árboles que permiten seguir las relaciones causa efecto a lo largo del modelo. Además este software está dotado de instrumentos para realizar análisis estadísticos.

3.6- Fases en la construcción de un modelo [10]

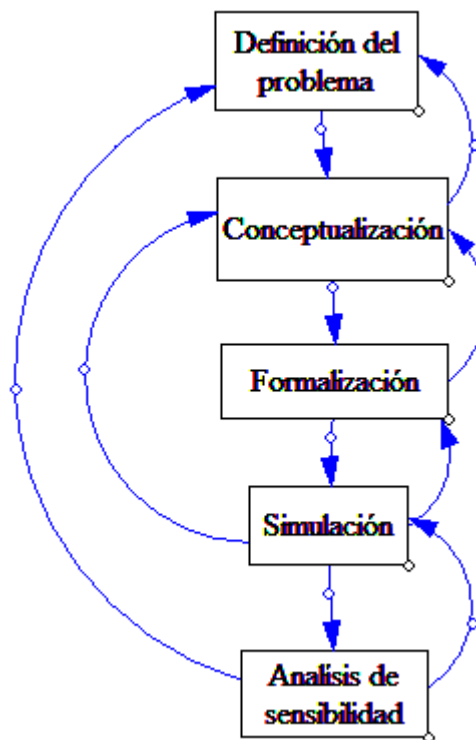


Figura 14 Fases en la construcción de un modelo [10]

Fases en la construcción de un modelo:

Definición del problema:

Esta primera fase se basa en definir claramente el problema y analizar si este es susceptible de ser dividido en elementos los cuales llevan asociados magnitudes cuya variación a lo largo del tiempo queremos estudiar.

Conceptualización:

Adoptar un lenguaje sistémico elemental que a través de las distintas variables, flujos, relaciones variables auxiliares que permita estudiar el problema. El resultado de esta fase es el diagrama de flujos o diagrama de Forrester.

Formalización:

Es la etapa dónde se introducen las ecuaciones sobre el diagrama de flujos. La información a introducir puede ser de dos tipos; Por una parte se tienen registros numéricos de las trayectorias seguidas en el pasado de las magnitudes correspondientes, por otra parte se dispone de información de naturaleza muy variada en relación a como se producen las interacciones entre variables en el seno del sistema, se introducen ecuaciones que intentan modelar el comportamiento futuro de las variables.

Simulación:

Es la etapa de comprobación lógica de las hipótesis adoptadas en etapas anteriores, permite extraer conclusiones del modelo y comportamiento futuro del mismo.

Análisis de sensibilidad:

En esta etapa se comprueba que variables de entrada influyen de manera más crítica sobre el resultado del problema. El análisis de sensibilidad podría significar que el problema no se encuentra bien definido y tener que volver así a la etapa de definición del problema

3.7- Aplicaciones de la dinámica de sistemas [10]

La metodología de la dinámica de sistemas se concibió para resolver problemas concretos que se presentan en determinadas empresas en las que los retrasos de información unida a la existencia de estructuras de realimentación dan lugar a modos de comportamiento indeseables normalmente de tipo oscilatorio, esto surge durante los años 50 y se denominó dinámica industrial.

En los años 60 Forrester propone la aplicación de los diagramas de flujos industriales para el estudio de estructuras urbanas, en las que las variables a considerar son los habitantes de un área urbana, las viviendas, las empresas. Con estos modelos se pretendía aportar un elemento auxiliar al estudio del desarrollo de una región, representando las principales magnitudes socio-económicas del área correspondiente.

A principios de los 70 se produce el estudio que posiblemente más haya contribuido a la difusión de la dinámica de sistemas. Se trata del primer informe del club de Roma sobre los límites al crecimiento, en el que se analizaba la previsible evolución de una serie de magnitudes agregadas a nivel mundial como son la población, los recursos y la contaminación. Este modelo ponía de manifiesto como en un sistema, debido las fuertes las fuertes interacciones entre variables, la aplicación sobre unos pocos elementos prescindiendo de otros no conduce a resultados satisfactorios para el sistema.

Un campo actual de aplicación es sobre los sistemas energéticos, donde se utiliza la dinámica de sistemas para definir estrategia de empleo de los recursos energéticos ante el hecho de estos recursos son limitados.



Capítulo 4

Desarrollo del modelo

4. Desarrollo del modelo

En el capítulo 3 se han explicado algunas de las variables necesarias para la construcción de modelos de diferentes tipos en el Software Vensim. En este trabajo el sistema a estudiar es el grado de desarrollo de la energía eólica para el global de la UE y para el individual de cada país de la UE-28. Para ello se descompone el sistema en diferentes factores que afectan de una manera u otra al sistema.

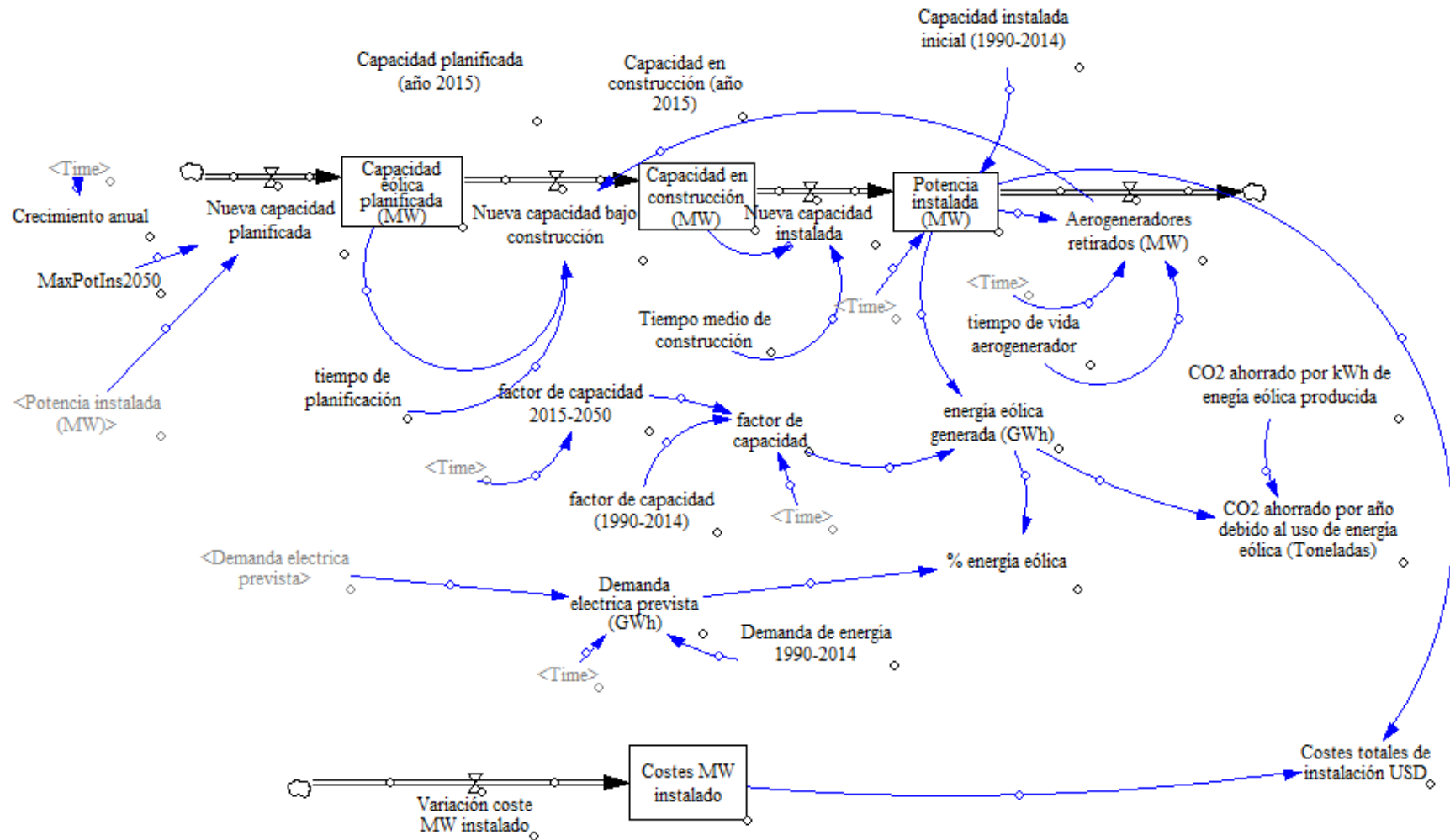
A continuación se explica cada variable de manera individual, estas variables son factores interrelacionados entre sí de tal forma que un cambio en alguna de las variables afecta al comportamiento global del sistema

El periodo a estudiar el sistema, es decir el periodo dónde se pretende conocer el comportamiento y desarrollo de la energía eólica en Europa es 1990-2015. Ahora bien, este periodo se puede dividir en dos partes bien diferenciadas:

- Por un lado el periodo 1990-2014, es un periodo de tiempo dónde se utilizan datos históricos tomados de distintas fuentes. Estos datos son básicamente la demanda de energía 1990-2014, la potencia eólica en MW instalada 1990-2014, la energía eólica generada en GWh 1990-2014, y la variación del coste por MW instalado 1990-2014
- Por otro lado el periodo 2015-2050 dónde se encuentran variables modeladas de las que habrá que encontrar patrones de conducta que rijan su comportamiento. En este grupo de variables se encuentran algunas que proporcionaran información valiosa sobre el sistema estudiado como la potencia instalada (MW), el % de energía eólica, la energía eólica generada (GWh), o las Toneladas de CO₂ ahorradas por el uso de eólica.

En el siguiente esquema aparecen la mayoría de las variables que intervienen en la construcción del modelo en Vensim, las relaciones entre variables se realiza con flechas formando el siguiente diagrama de flujo

Esquema general de las variables que intervienen en el modelo:



VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL MODELO:

4.1- Capacidad inicial instalada 1990-2014.

La capacidad inicial instalada es una variable auxiliar que recoge los datos de la potencia eólica histórica instalada en Europa (MW) desarrollado por país (UE-28) y año (1990-2014). Los datos son recopilados de la OECD library y de la fuente de datos del Eurostat. Estos datos quedan recopilados en ficheros .xlsx. La forma de leer ficheros .xlsx desde Vensim es la siguiente:

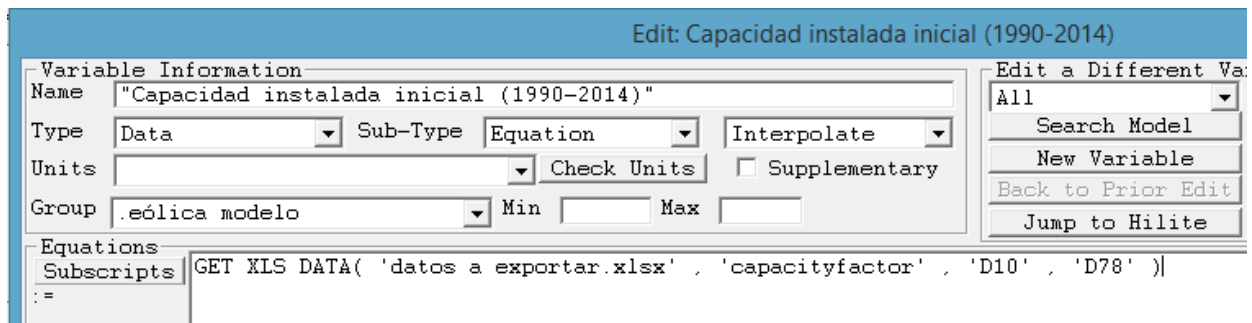


Figura 15 Editor de ecuaciones de VENSIM. Variable capacidad instalada inicial (1990-2014)

Mediante el editor de funciones de Vensim situándose sobre la variable auxiliar capacidad inicial instalada, se introduce la función GET XLS DATA que contiene el nombre del fichero Excel dónde se encuentran los datos ('datos a exportar.xlsx'), la hoja del fichero dónde se localizan exactamente dichos datos ('capacityfactor'), la celda dónde se encuentra el primer valor para la variable tiempo en este caso el año 1990 (celda 'D10') y la primera celda de la fila dónde se encuentran los datos de potencias instaladas para UE-28 (celda 'D78').

Los datos de potencia instalada tomados del Eurostat y de la OECD library y que son introducidos en Vensim son los que aparecen en la siguiente gráfica (figura 16). Como se puede observar la potencia eólica (MW) instalada en Europa ha crecido exponencialmente en el periodo 1990-2014 (figura 16). La potencia instalada ha crecido desde los 454MW instalados en el año 1990 a los 128842MW instalados en el año 2014.

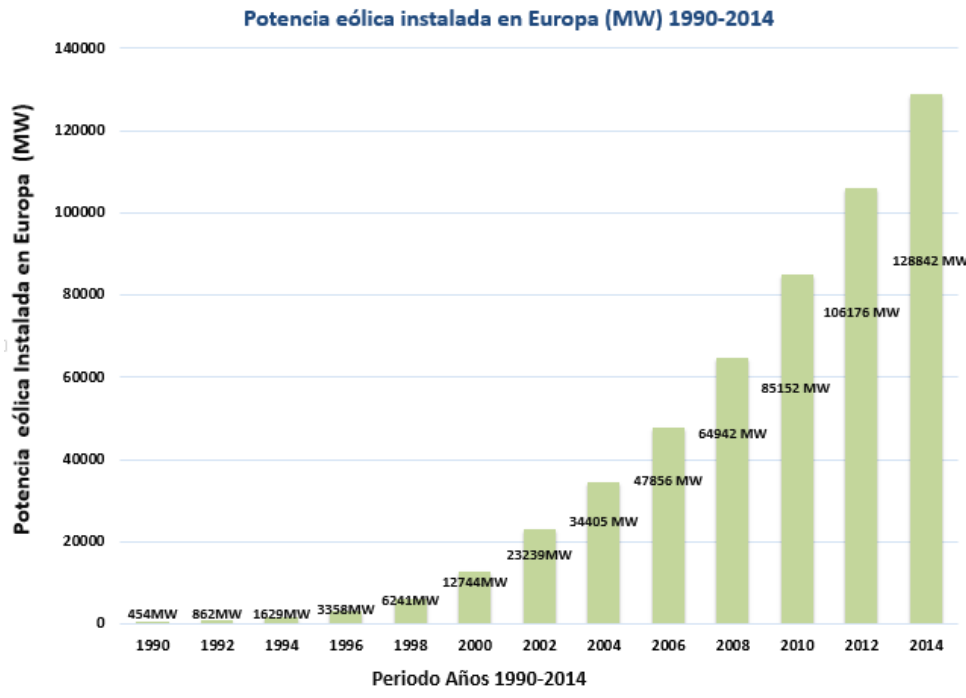


Figura 16 Potencia eólica instalada en Europa. Periodo 1990-2014.

4.2- Tasa de crecimiento. Crecimiento anual.

La tasa de crecimiento o crecimiento anual es una variable auxiliar al modelo que determina la tendencia a seguir de potencias instaladas en Europa desde el momento que dejamos de tener datos históricos vía la variable capacidad inicial instalada, hecho que ocurre en el año 2014.

La potencia instalada se ve limitada por una serie de factores que provocan que está no pueda crecer indefinidamente, estos factores son los descompuestos a continuación [11]:

$$P = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6$$

1 Factores que limitan el crecimiento de la energía eólica instalable en Europa

- f_1 la energía cinética presente en las capas más bajas de la atmósfera dónde se pueden instalar físicamente parques eólicos.
- f_2 áreas terrestres geográficamente aprovechables para instalar parques eólicos, en zonas muy montañosas por ejemplo es imposible construir instalaciones.
- f_3 porcentaje de viento que interacciona con las palas del dispositivo eólico.
- f_4 porcentaje de la velocidad del viento que es válida para ser transformada en energía eléctrica, la producción de energía eléctrica está determinada por la frecuencia de la red.

- f_5 áreas terrestres con potencial razonable de viento son limitadas.
- f_6 eficiencia de conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica.

La forma de modelar este comportamiento futuro para las potencias instaladas entre los años 2015-2050 es mediante una función logística. La función logística es una función matemática exponencial con una particularidad, mientras que la función puramente exponencial crece de manera continua, la función logística crece exponencialmente sólo hasta un cierto valor de saturación, por tanto dicha función resulta adecuada ya que las zonas dónde se pueden instalar parques eólicos son limitadas, o a medida que aumente la potencia instalada las zonas hábiles de construcción proporcionan menor cantidad de viento o un menor factor de capacidad.

La forma de la función logística a utilizar es la siguiente:

$$P(t) = \frac{l}{1 + k \cdot e^{-at}}$$

2 Ecuación standard, función logística

Dónde l = límite de potencia eólica instalada, en este caso el límite es el último valor para nuestro caso estudiado, es decir la potencia previsible instalada en el año 2050. Por otra parte a = tasa de crecimiento anual de potencia instalada en Europa en el periodo (2014-2050).

Para introducir un valor de ' l ' que represente un punto de partida fiable para la potencia instalada para el año 2050, se recurre a datos bibliográficos [11], Greenpeace 2008 [12], por lo que se toma un valor de 900.000MW instalados en Europa para el año 2050.

La cte ' k ' por su parte es una constante del sistema en el periodo 2014-2050 que se puede determinar a partir del valor de potencia inicial, es decir el valor de la potencia para el año 2014 que se obtiene de la variable auxiliar capacidad inicial instalada 1990-2014 en Europa y es de 128842MW.

$$P(0) = 128842(MW) = \frac{900000}{1 + k \cdot e^{-0.1t}} \Rightarrow k = 5,985$$

Por tanto ya se puede dar forma a la función logística que modela el comportamiento de la potencia instalable en Europa para el periodo 2014-2050:

$$P(t) = \frac{900000}{1 + 5,985 \cdot e^{-0,1t}}$$

3 Función logística, que modela el crecimiento de la potencia eólica instalable en Europa

Dando valores a t se obtiene la potencia instalada cada año, teniendo en cuenta que $t=0$ corresponde al año 2014, $t=1$ al año 2015 y así sucesivamente hasta el año $t=36$ correspondiente al año 2050. Los valores de la ecuación correspondientes a la potencia son los mostrados en la siguiente gráfica de la izquierda. Por su parte la gráfica de la derecha son los incrementos de potencia instalada respecto del año anterior, en esta gráfica se observa como en el año $t=18$ es decir el año 2032 se produce un cambio de tendencia. Hasta entonces cada año se instalaba más potencia que en el año anterior, a partir de este periodo la tendencia es decreciente (Figura 17).

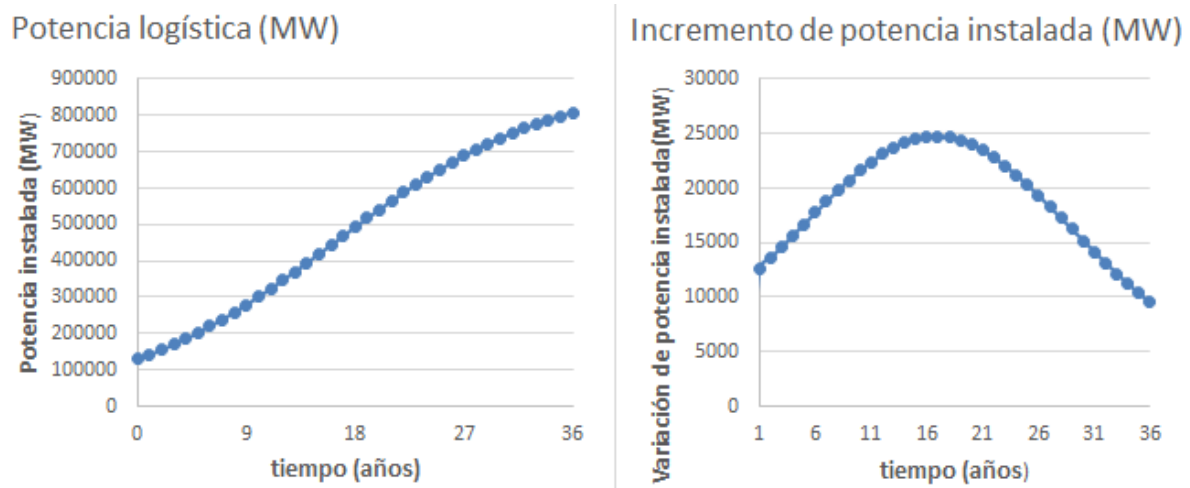


Figura 17 Izqda curva de la potencia logística periodo 2015-2050. Drcha Incremento de potencia periodo 2015-2050.

En la gráfica de la izquierda (Figura 17) se pueden observar las características de una función logística, la potencia instalada crece exponencialmente hasta un valor hasta que alcanza cierto grado de saturación, entonces el crecimiento pasa a ser más pequeño o prácticamente nulo.

La forma elegida de introducir esta información en el modelo desarrollado en Vensim es introduciendo los valores de incremento de potencia instalada (MW), para ello en el editor de funciones de la variable auxiliar tasa de crecimiento se define que es de tipo auxiliar y como subtipo se selecciona with LOOK-UP (Figura 18), herramienta que permite introducir los valores de incremento de potencias calculados e interpolar puntos si fuese necesario.

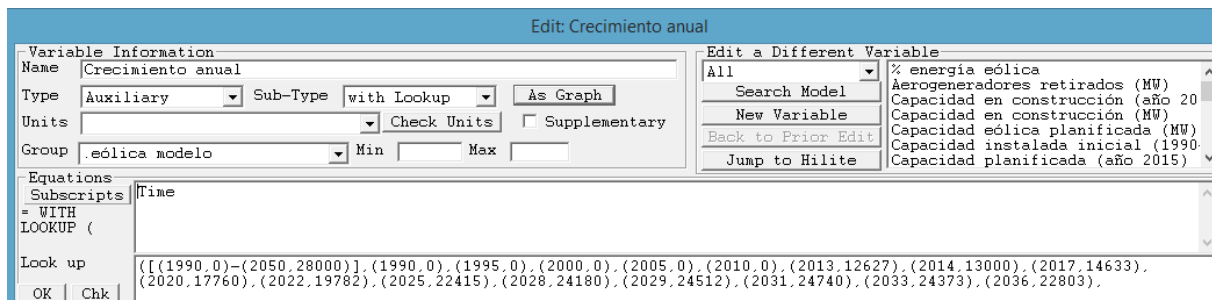


Figura 18 Editor de ecuaciones de VENSIM. Variable crecimiento anual

En esta herramienta de LOOKUP es necesario definir la variable en función de dónde varía los valores de incrementos de potencia introducidos, esta variable es la variable tiempo TIME. Por tanto sólo queda introducir para cada año los valores de incrementos de potencia (MW) previamente calculados mediante la función logística.

4.3- Tiempo de vida de un aerogenerador.

Es una variable auxiliar de tipo constante que introduce un valor que representa la vida útil de una turbina eólica en el periodo comprendido entre la instalación y la retirada por fatiga, daños o cualquier tipo de desperfecto que provocan que la turbina trabaje con baja o nula eficiencia de producción de energía.

Las causas de fallo para retirar una instalación eólica principalmente son debidas a que la turbina sufra algún tipo de desgaste, daño, suciedad que provoquen el funcionamiento a baja eficiencia energética. La vida útil de la estructura en las instalaciones On-shore suele estar por encima de la vida útil de la propia turbina así que no es un parámetro determinante a caracterizar. Ahora bien en energía eólica Off-shore la estructura se ve expuesta a mayor número de cargas por lo que su vida útil se ve reducida llegando a ser un parámetro limitante. [13]

Por un lado el estudio de la duración de una turbina eólica se encuentra limitado por el hecho de la carencia de datos empíricos suficientes que establezcan reglas universales de fallo y posterior retirada, si se dispone de datos de turbinas eólicas con 30 años de vida útil aún en funcionamiento. Los datos encontrados en este sentido se basan en predicciones algunas veces a través de la simulación vía CFD (Computational Fluid Dynamic) como [14] que pronostica una vida útil de 25 años, en [15] aparecen datos de vida útil similares 26-28 años.

Para el caso de la energía eólica Off-shore si es necesario tener en cuenta la vida útil de la estructura y las cargas que sobre ella actúan ya que es un parámetro limitante.

Las cargas que actúan sobre una estructura eólica off-shore son representadas en la siguiente (figura19), las cargas inducidas por el viento se producen con distinta frecuencia a las cargas inducidas por las olas o la acción de las mareas, perjudicando la resistencia dinámica de la estructura.

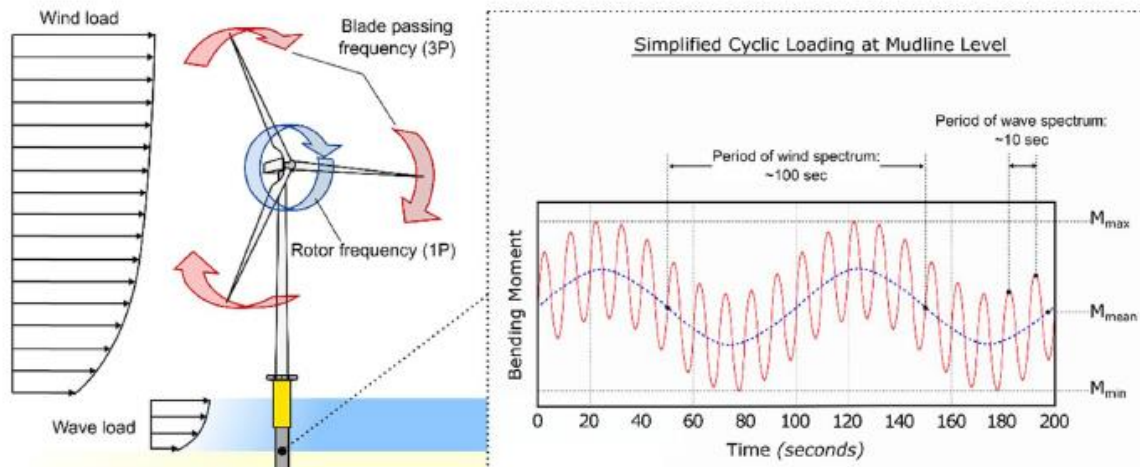


Figura 19 Cargas que actúan sobre una estructura eólica off-shore

Por tanto el fallo de la estructura es debido a dos fenómenos superpuestos [16]:

- Se supera el momento de vuelco, es decir el momento externo que se desarrolla en la base de la estructura como consecuencia de una o más cargas laterales aplicadas en algún punto por encima de la base. Esto es similar a un problema de fatiga con el agravante de que las cargas debidas al viento y a las olas pueden estar desalineadas convirtiéndolo en un problema bi-axial.
- Debido a la proximidad de frecuencias (0,01Hz para el viento, 0,1Hz para la acción del agua) puede inducir resonancia en la estructura.

Bibliográficamente se pueden encontrar escenarios parecidos para la vida útil de una estructura Off-shore, [13] muestra desde un escenario favorable 20'8 años de vida útil, 19'21 años en un escenario central, 18'21 años en un escenario desfavorable. En [16] encontramos un único escenario central de 20 años.

Junto a estos valores de vida útil se pueden buscar datos del tiempo que tarda en rentabilizarse una instalación eólica. Estos tiempos de rentabilización (Energy Payback Time), se representan en la siguiente tabla. Por tanto si el tiempo de rentabilización es menor que el tiempo de vida útil merecerá también desde el punto de vista económico la instalación de energía eólica.

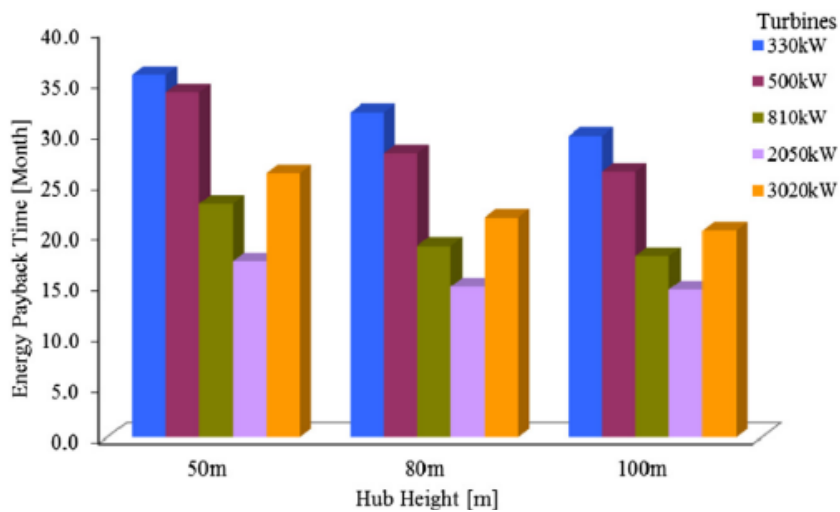


Figura 20 Tiempo de retorno de la inversión de una turbina eólica según su tamaño y potencia

La anterior gráfica (Figura 20) muestra el tiempo de rentabilización (“Payback Time”) de una instalación eólica, en función de la altura de la instalación y los MW. Lógicamente cuanto mayor sea la altura a la que se instala la turbina y a mayor potencia instalada el “Payback Time” es menor.

En cualquier caso este tiempo de rentabilización económica se sitúa entre 15-40 meses, es decir entre 1’25-3’33 años, valores muy por debajo de los tiempos de vida útil mencionados (20-25 años).

4.4- Aerogeneradores retirados (MW)

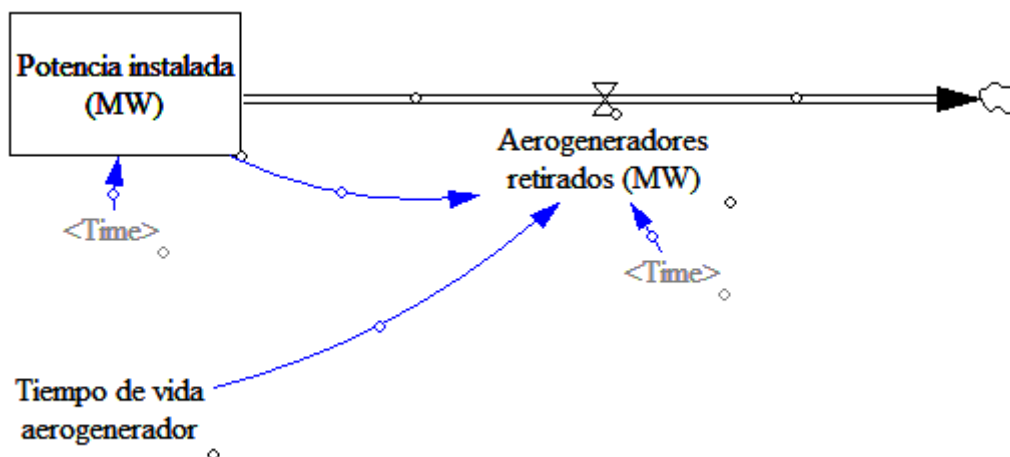


Figura 21 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim

La variable aerogeneradores retirados (MW) es la variable que recoge los MW de energía eólica que dejan de utilizarse transcurrido un periodo como consecuencia que las turbinas eólicas tienen un tiempo de vida limitado.

La ecuación que modela el comportamiento de esta variable es la que se introduce en el editor de ecuaciones de VEMSIM de la siguiente manera:

IF THEN ELSE(Time<2015 , 0 , "Potencia instalada (MW)"/tiempo de vida aerogenerador)

Lo que se introduce con esta función es que si se cumple la condición Time<2015, es decir para periodos de tiempo anteriores al año 2015, la potencia eólica retirada es cero. A partir de ahí si no se cumple la condición Time>2015, la potencia eólica retirada es el cociente entre la potencia instalada (MW) en un determinado año entre el tiempo de vida de un aerogenerador.

Todas las variables que intervienen en el proceso desde que se empieza a planificar una instalación eólica, hasta que dicha instalación es retirada se representa en el siguiente diagrama de variables implementado en VEMSIM.

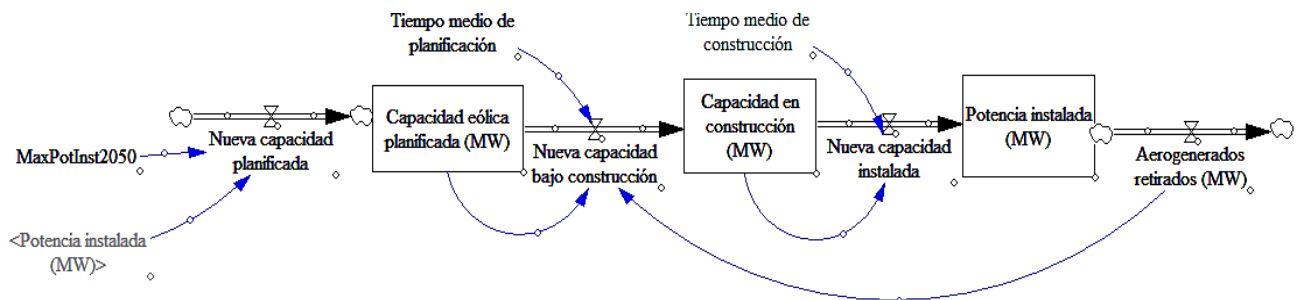


Figura 22 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

- Nueva capacidad planificada:

Antes de que una cierta cantidad de potencia eólica sea instalada, transcurre un periodo de tiempo incluso antes del periodo de construcción, donde las instituciones, promotoras y organismos correspondientes se ponen de acuerdo en la potencia a instalar, este stock de potencia futura es la nueva capacidad planificada.

Para el modelado de esta variable es necesario la variable anterior “**tasa de crecimiento**” que habíamos determinado mediante una función logística. De esta variable “**tasa de crecimiento**” obtenemos que el crecimiento anual de potencia instalada es aproximadamente de un 3% anual. La forma de implementar esta variable “**Nueva capacidad planificada**” en el editor de ecuaciones de Vensim es la siguiente:

$$[MaxPotIns2050 - Potencia instalada (MW)] * 0,03 = Nueva capacidad planificada$$

4 Ecuación, nueva capacidad eólica planificada

La ecuación anterior intenta modelar el comportamiento que la potencia planificada sigue un crecimiento proporcional en función de cómo es la diferencia entre el valor máximo que se puede alcanzar de potencia instalada para el año 2050 y la potencia instalada actual (MW). Como además se pretende que el crecimiento siga el 3% que marcaba la tasa de crecimiento, se multiplica la diferencia entre la potencia alcanzable máxima y la potencia actual por el 3%.

La “**MaxPotIns 2050**” simplemente es la variable que almacena la máxima potencia instalada en Europa para el año 2050 en función del terreno y la tecnología disponible, que [11], Greenpeace 2008 [17], situaba en torno a los 900000 (MW).

- **Nueva capacidad en construcción**

Después de que la nueva potencia eólica ya se encuentra planificada, transcurre un tiempo de construcción previo a la instalación final. Esta variable no crece únicamente por la capacidad nueva planificada, sino que también crece por el hecho de que aquellas instalaciones que se quedan obsoletas con el paso del tiempo, es decir los aerogeneradores retirados también contribuyen a que puedan ser remplazados por otros en la misma cantidad en las mismas zonas cuando acaban su vida útil. La forma de implementar mediante ecuación esta variable en Vensim es:

$$\frac{Capacidad eólica planificada (MW)}{tiempo de planificación} + \text{aerogeneradores retirados}(MW)$$

5 Ecuación, nueva capacidad en construcción

4.5- Demanda de energía 1990-2014

La demanda de energía es una variable auxiliar que recoge los datos de la energía demanda (GWh) en (UE-28) durante el periodo 1990-2014, los datos son recopilados de las fuentes OECD library y Eurostat y son almacenados en fichero Excel.

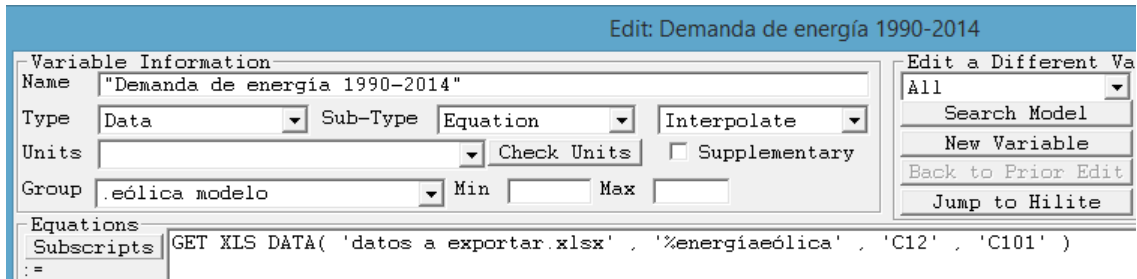


Figura 23 Editor de ecuaciones de VENSIM. Variable Demanda de energía, periodo 1990-2014.

La forma de leer desde el modelo en VENSIM los datos en Excel vuelve a ser la función GET XLX DATA, que incluye el nombre de la hoja dónde se encuentran los datos ('datos a exportar.xlsx'), el nombre de la hoja dónde se encuentran los datos ('%energía eólica'), la primera celda donde aparece la variable tiempo ('C12') y la primera celda de la fila dónde aparecen datos de energía demandada ('C101').

Los datos que aparecen en dicho fichero Excel, se muestran en la siguiente gráfica (figura 24). Como se puede observar aunque la demanda eléctrica en el periodo 1990-2014 es creciente en torno al año 2008 hay un suave cambio de tendencia, por tanto esta variable será difícil de modelar para el periodo 2015-2050, no vale con una función logística exponencial como se utilizaba para modelar la potencia instalada, el modelado en este caso será más complejo y se estudia en la variable **demanda eléctrica prevista**.

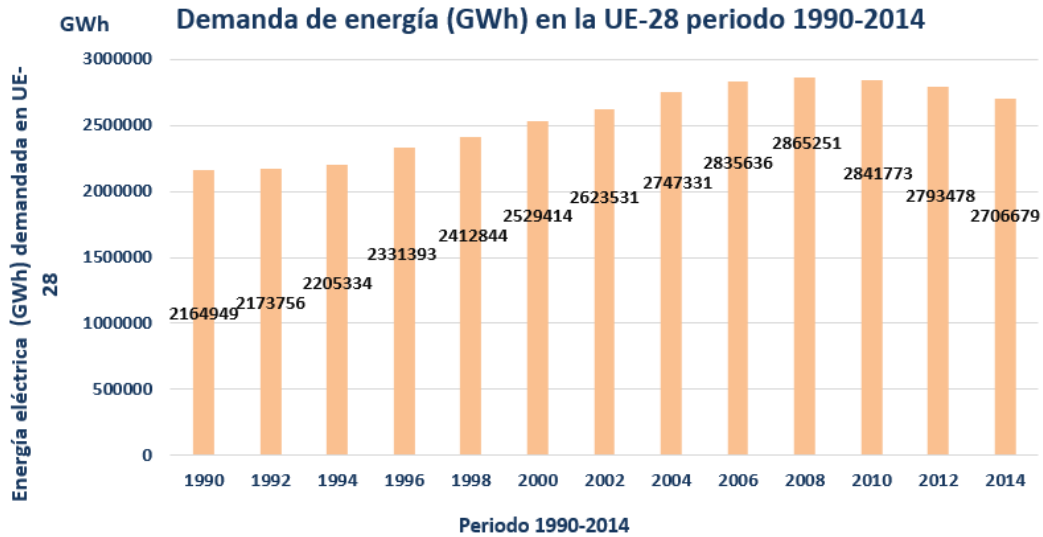


Figura 24 Demanda de energía eléctrica, periodo 1990-2014.

4.6- Demanda de energía eléctrica prevista

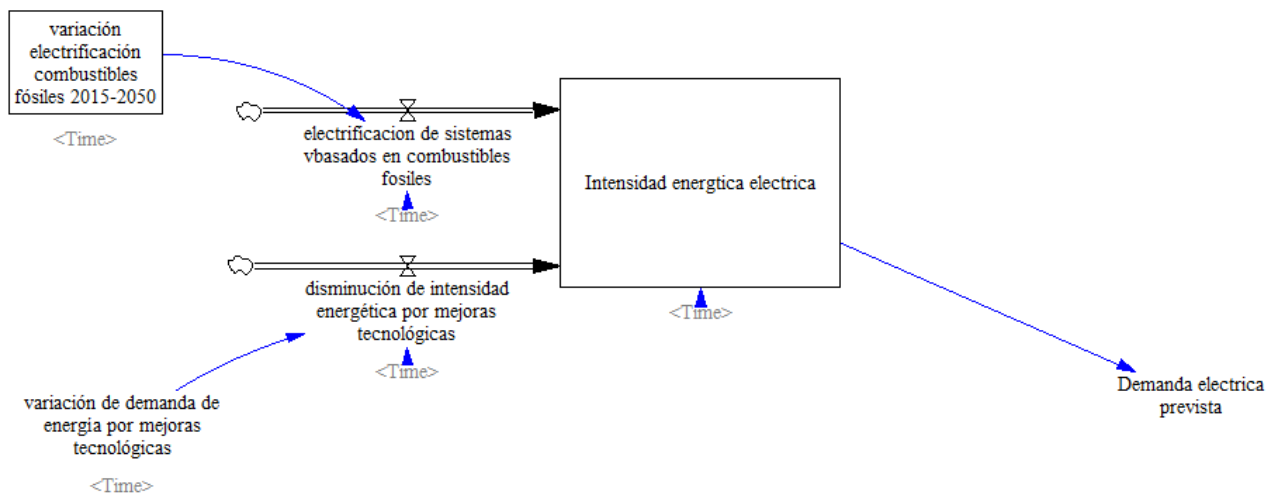


Figura 25 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

La demanda eléctrica prevista es una variable de tipo LEVEL que modela el comportamiento de la demanda de energía cuando se deja de disponer de datos históricos, es decir la demanda de energía en el periodo 2015-2050 para el global de Europa y para el individual de cada país de la UE-28.

En principio es una variable que depende de varios factores, por un lado su tendencia debería ser decreciente debido a que el avance tecnológico proporciona dispositivos eléctricos y electrónicos que precisan de menor consumo energético. Por el contrario por otro lado la demanda sería creciente debido a la electrificación de sistemas que en la actualidad su fuente de energía proviene de combustibles fósiles, dentro de esta circunstancia el hecho más característico sería la electrificación del transporte.

Variación electrificación combustibles fósiles 2015-2050:

Es la variable que recoge la previsible electrificación de dispositivos cuya fuente de energía hasta la actualidad eran combustibles fósiles, como se ha dicho anteriormente este apartado recoge básicamente la electrificación del transporte.

La influencia de esta variable sobre la demanda de energía en Europa en el periodo 2015-2050 será un aumento del consumo energético, puesto que dispositivos cuya fuente de energía eran combustibles fósiles ahora son accionados por energía eléctrica.

Figure 11: Evolution of final energy demand by fuel (Mtoe – left, shares – right)

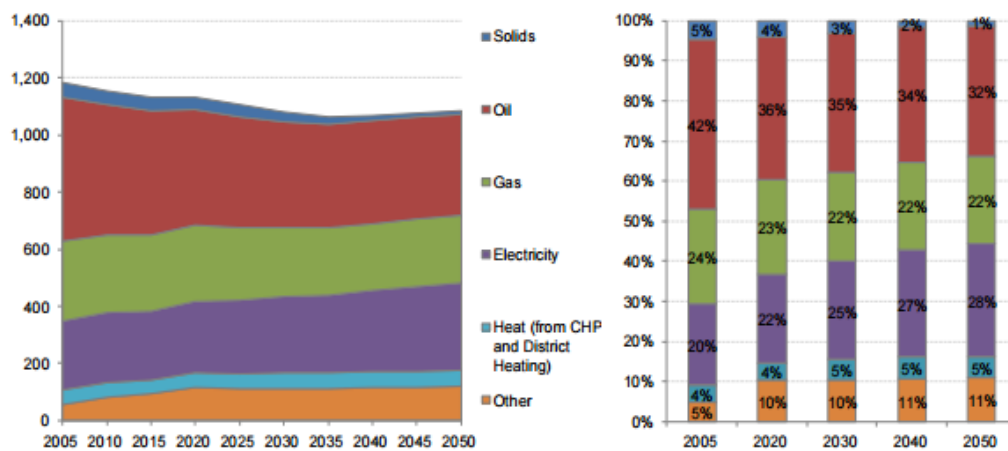


Figura 26 Evolución de la demanda en Europa 2005-2050 por fuente de energía [18].

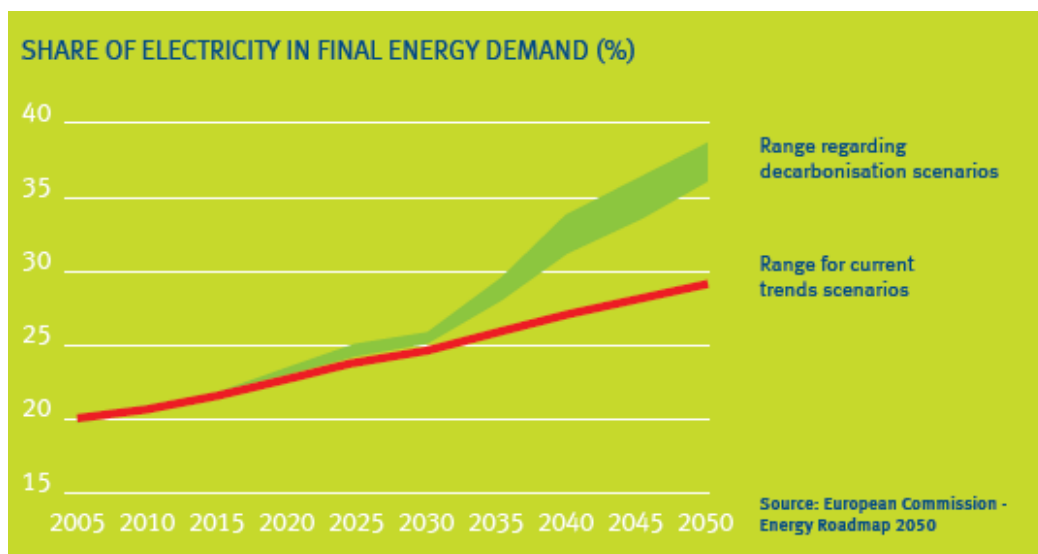


Figura 27 Evolución de la demanda en Europa 2005-2050 por fuente de energía [19].

Ambas gráficas (figuras 26,27) de distintas fuentes coinciden en un cambio desde un 20% de energía eléctrica del total de la energía demanda hasta un 30%, mientras que en el mismo periodo disminuye la dependencia de combustibles fósiles desde un 42% del total de la demanda en el 2005 a un 32% en el año 2050.

La electrificación de combustibles fósiles trae consigo una serie de ventajas:

- Menores emisiones de CO₂ especialmente en áreas urbanas y grandes ciudades.
- Los dispositivos cuya fuente de energía es eléctrica tienen mayor eficiencia que los que cuya fuente de energía son combustibles fósiles.
- Aumento del confort del aire especialmente en ciudades no sólo por las emisiones nulas de CO₂, sino también por las menores emisiones de ruido.
- Como la electricidad puede ser generada por varias fuentes, se reduce la dependencia de combustibles fósiles, medida de especial interés en Europa dónde se carece de este tipo de combustibles.

Variación de la demanda por mejoras tecnológicas:

Es una variable que modela la influencia de las mejoras tecnológicas como una previsible disminución de la demanda de energía en el periodo 2015-2050 como consecuencia de una mayor eficiencia energética de los dispositivos que consumen algún tipo de energía.

Figure 9: Decoupling of EU energy use and intensity from GDP (2005=100)

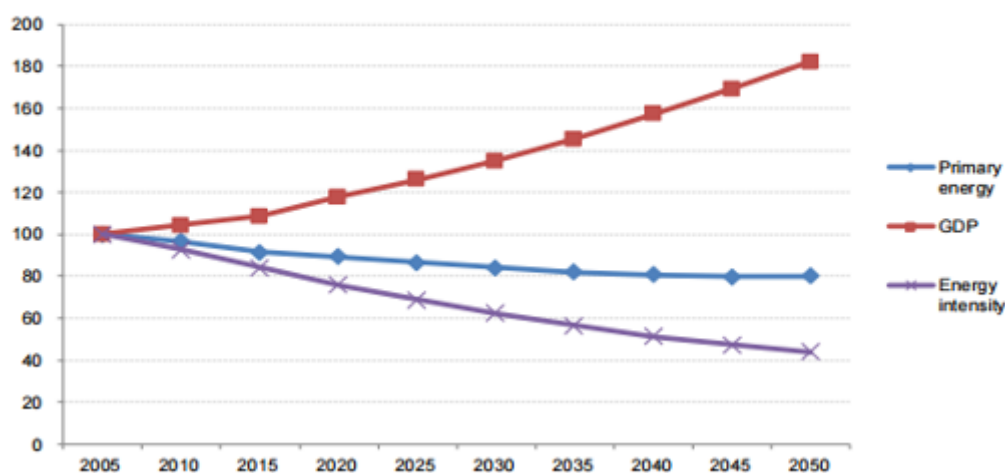


Figura 28 Variación de demanda por mejoras tecnológicas. [20]

Los datos de energía demanda en Europa en el periodo 2015-2050 obtenidos de [20] son el producto de la intensidad energética por el GDP, es decir por el producto de cuánto cuesta generar una unidad de energía por el GDP.

Demanda eléctrica prevista (GWh):

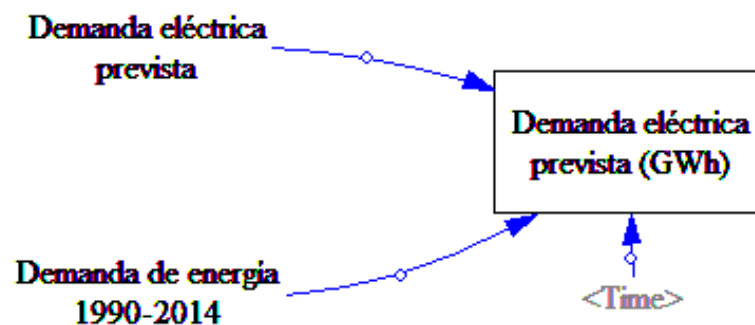


Figura 29 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

La variable demanda de energía eléctrica (GWh) es una variable de tipo LEVEL que recoge por un lado los datos históricos de demanda de energía eléctrica en Europa en el periodo 1990-2014, y por otro la demanda en el periodo modelado 2015-2050.

En el editor de ecuaciones de Vensim se introduce la siguiente información:

Valor inicial:

Corresponde con el valor de la energía demandada en Europa en el primer año de estudio, es decir el valor correspondiente al año 1990.

Evolución del modelo:

IF THEN ELSE (Time < 2015, Demanda de energía 1990-2014, Demanda eléctrica prevista)

6 Ecuación en Vensim para la demanda eléctrica prevista

La anterior ecuación refleja que si se cumple la condición $Time < 2015$ es decir para periodos de tiempo anteriores al 2015, el modelo tome los valores de demanda de energía históricos almacenados en la variable “Demanda de energía 1990-2014”. Por el contrario si la condición no se cumple, el modelo toma los valores almacenados en “Demanda de energía prevista), que recoge los valores simulados de variación de demanda para el periodo 2015-2050.

4.7- Factor de capacidad. Periodo 1990-2014

El factor de capacidad es una variable auxiliar que recoge los datos empíricos del factor de capacidad para cada país de la UE-28 en el periodo de tiempo 1990-2014. Estos datos quedan recopilados en ficheros .xlsx. La forma de leer ficheros .xlsx desde Vensim es la siguiente:

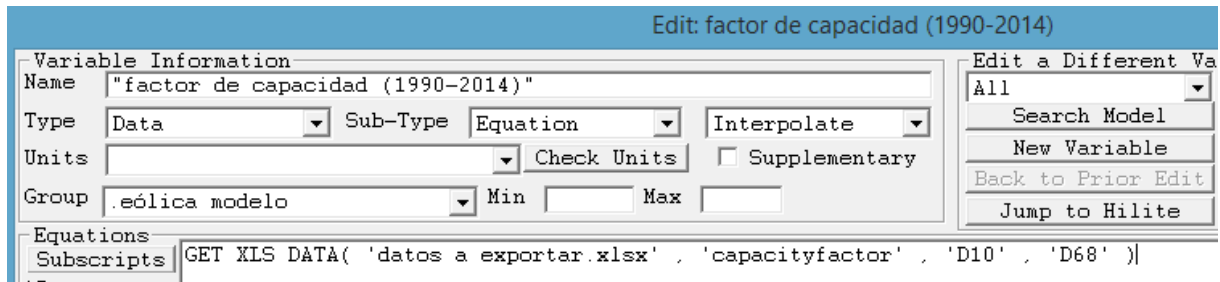


Figura 30 Editor de ecuaciones de Vensim. Variable factor de capacidad (1990-2014)

La forma de leer desde el modelo en VENSIM los datos en Excel vuelve a ser la función GET XLX DATA, que incluye el nombre de la hoja dónde se encuentran los datos ('datos a exportar.xlsx'), el nombre de la hoja dónde se encuentran los datos ('%capacityfactor'), la primera celda donde aparece la variable tiempo ('D10') y la primera celda de la fila dónde aparecen datos de energía demandada ('D68').

Los datos del factor de capacidad no aparecen como dato directo en ninguna de las fuentes consultadas (OECD library, Eurostat), pero se puede obtener fácilmente como el cociente entre la energía eólica producida (GWh) y la potencia eólica instalada (GW) considerando un año natural de 8760h de viento.

$$\frac{\text{energía eólica producida (GWh)}}{\text{Potencia eólica instalada (GW)} \cdot 8760h} = \text{factor de capacidad}$$

7 Ecuación en Vensim para el factor de capacidad

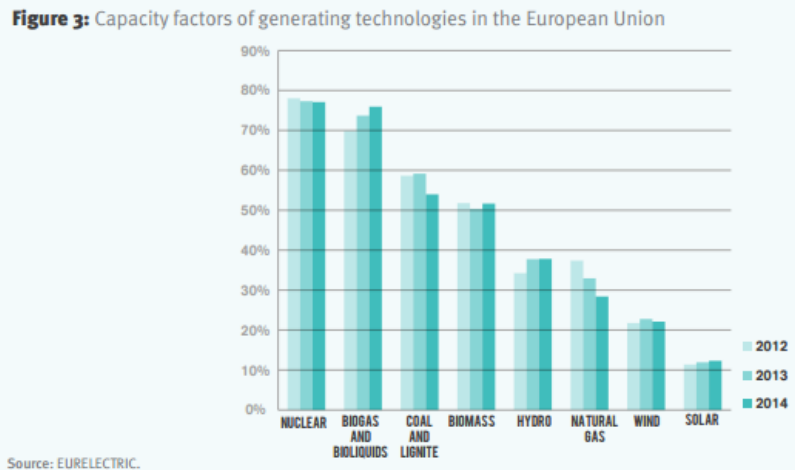


Figura 31 Factores de capacidad de diferentes tecnologías presentes en Europa

Como se puede comprobar de los resultados de la anterior (figura 31) la energía eólica tiene junto a la energía fotovoltaica los menores porcentajes de factor de capacidad, es decir el ratio entre la energía eólica generada (GWh) y la potencia instalada (MW) es menor frente a otras fuentes de energía. Este hecho es debido a los factores explicados en la siguiente variable, estos factores van a ser básicamente la variabilidad del viento y el factor humano.

4.8- Factor de capacidad. Periodo 2015-2050

El factor de capacidad es quizás el factor más difícil para establecer modelos que representen fielmente el desarrollo de la energía eólica en Europa. Para los datos empíricos del periodo 1990-2014 se ha comprobado que toma valores oscilantes que parecen no seguir patrones tanto para el global de la UE-28 como para el individual de cada país.

Por otra parte el factor de capacidad es el factor más importante a la hora de estimar la rentabilidad económica de un parque eólico de nueva construcción, la situación ideal es a partir de factores de capacidad del 21% [21].

La literatura acerca de estimaciones del factor de capacidad para los próximos años en Europa es más bien escasa, aun así se han encontrado algunos estudios donde se llegan a valores del factor de capacidad para algunos países de Europa en el año 2030, el caso de [17] que estima un factor de capacidad entre el 27 y 30% para el año 2030 para el caso Griego, o [22] que estima factores de capacidad entre el 20-29% para el caso británico.

Para el caso general de la UE-28 la EWEA [23] propone un escenario para el año 2030 de 320 GW instalados, produciendo 778TWh de energía eólica al año. Considerando un año natural de 8760h de viento el factor de capacidad resultante del 27,75%.

$$\frac{778000GWh}{320GW \cdot 8760h} = 0,2775$$

Esta repercusión del factor de capacidad, es lo nos lleva a conocer las causas que provocan la arbitrariedad de resultados encontrados para las instalaciones existentes en Europa en el periodo 1990-2014:

Variabilidad del viento [21]:

La velocidad del viento es un fenómeno meteorológico que no sigue patrones de conducta, dejando claro que bajas velocidades de viento provocan bajos factores de capacidad. Para el periodo del que se disponen datos 1990-2014, se encuentra una variabilidad de resultados del factor de capacidad CF entre años del 25,5% para Dinamarca (país con variación más significativa), 18,9% para Alemania o del 18,1% para España.

Factor humano [21]:

El factor humano se puede descomponer como el producto de dos grandes acciones, por un lado las mejoras tecnológicas que intuitivamente provocan un aumento del factor de capacidad CF, y por otro el hecho de que al ir agotando las instalaciones que proporcionan un mayor CF se utilizan otras ubicaciones menos adecuadas para la producción eólica.

Modelado del factor de capacidad. Escenario 2015-2050:

A la vista de los datos recopilados para el periodo 1990-2014 y de los factores explicados que pronostican el comportamiento aleatorio del factor de capacidad, resulta difícil encontrar una función matemática para modelar este parámetro.

La forma utilizada es obtener una media de los primeros valores de factor de capacidad, media de los años 1990, 1991, 1992, 1993 y la media de la última parte del periodo estudiado años 2011, 2012, 2013, 2014. Entre ambos periodos aunque haya resultados fluctuantes a lo largo de los años, si se reconoce una tendencia de CF creciente. Esa tendencia obtenida se extrapola al periodo 2015-2050 sirviendo como la manera de modelado del CF para nuestro sistema.

4.9- Factor de capacidad (1990-2050)

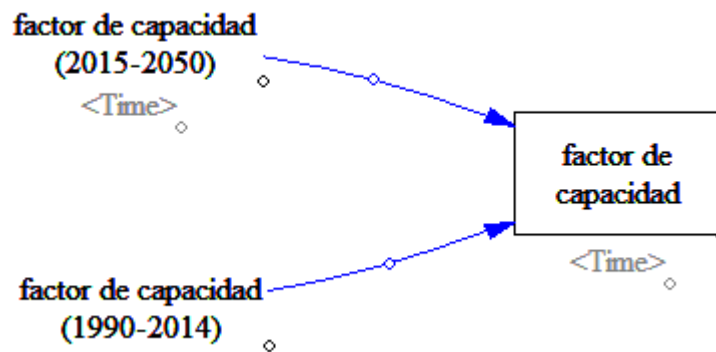


Figura 32 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

Es la variable que recoge los datos históricos del periodo 1990-2014 y los resultados procedentes del modelado del periodo 2015-2050. La manera de juntar estas dos variables en una única variable es mediante la función IF THEN ELSE.

IF THEN ELSE(Time < 2015, "factor de capacidad (1990 – 2014)", "factor de capacidad 2015 – 2050")

Lo que muestra la ecuación es que para intervalos de tiempos anteriores al año 2015, VENSIM tome los valores almacenados en la variable “factor de capacidad (1990-2014)”, mientras que para valores posteriores a ese año tome los valores almacenados en la variable “factor de capacidad (2015-2050)”

4.10- Energía eólica generada (GWh)

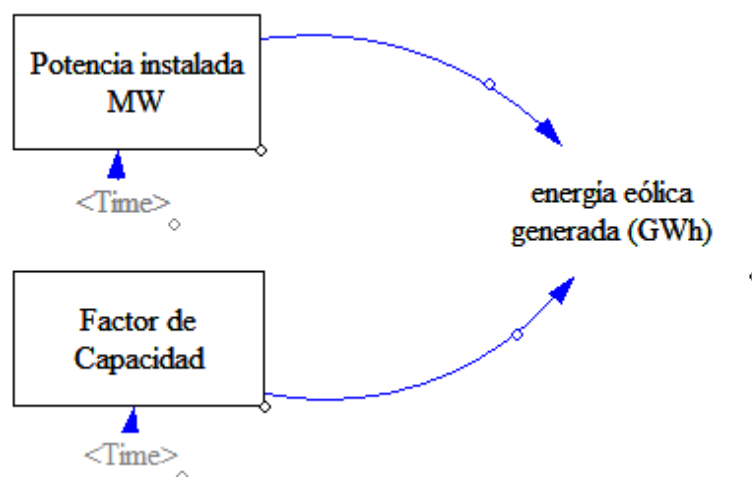


Figura 33 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

La energía eólica generada (GWh) es la variable que mide anualmente la energía producida debida a la potencia instalada y al factor capacidad de esa potencia instalada. En el editor de ecuaciones de VEMSIM considerando un año natural como 8760 horas de viento se introduce la siguiente ecuación.

$$\frac{\text{factor de capacidad} \cdot \text{Potencia instalada (MW)} \cdot 8760h}{\frac{1000 \text{ MW}}{1 \text{ GW}}} = \text{energía producida GWh}$$

La variable de la energía eólica generada será una curva exponencial creciente ya que es el producto de dos funciones crecientes. Recordamos en este punto que la potencia instalada seguía la forma de una función logística que alcanzada saturación al llegar a cierta potencia instalada, por lo tanto esta saturación también se apreciara en la curva de energía eólica generada (GWh).

4.11- CO₂ ahorrado por kWh de energía eólica generada

Este apartado del modelo es especialmente importante desde el momento cuando en el tratado sobre el clima que tuvo lugar en París en diciembre de 2015, la UE se comprometió a reducir al 40% las emisiones de efectos causantes de efecto invernadero (Green House Gases GHG) respecto a las emitidas en el año 1990, tal como se ha introducido en el capítulo de introducción y objetivos.

Primeramente hay que entender que la energía eólica no es una tecnología de generación de energía con emisiones nulas de carbón, ya que se producen emisiones de CO₂ durante las fases de instalación, mantenimiento y retirada de parques eólicos. Tampoco es cierto que cada kWh de energía eólica generada sustituya a la generación de energía térmica o de combustión de gases en la misma cantidad, ya que la energía eólica no reemplaza sólo a una forma de generación de energía sino a varias incluyendo incluso a otras renovables. Por tanto el verdadero ahorro de emisiones de CO₂ es debido a:

- Es necesario una menor utilización de otras formas de generación de energía que típicamente producen mayores emisiones de carbón como la energía térmica.

- La energía eólica es una tecnología más eficiente respecto a otras formas de generación de energía, es decir los recursos utilizados por la eólica para producir la misma cantidad de energía son menores.
- Las emisiones de CO₂ durante las fases de “start-up” y “shut-down” son menores, es decir durante las fases de instalación y posterior retirada de energía eólica las emisiones de carbón son menores. Esto es intuitivo con la idea de que una planta térmica de generación de energía tiene una mayor complejidad de construcción y desmantelamiento aunque sólo sea por el mayor tamaño.

Ahora bien la EWEA [23] estipula unos ahorros de emisión de 0,6kg por kWh de energía eólica generada, valores también estipulados en [24], ambos informes tienen en cuenta las emisiones generadas durante la construcción y también del transporte de soportes y turbinas hasta el lugar de instalación.

Por tanto en el editor de ecuaciones de VENSIM se define esta variable auxiliar de tipo Constant y se le da un valor constante de 0,6.

4.12- CO₂ ahorrado al año (Toneladas) por uso de energía eólica [23], [25]

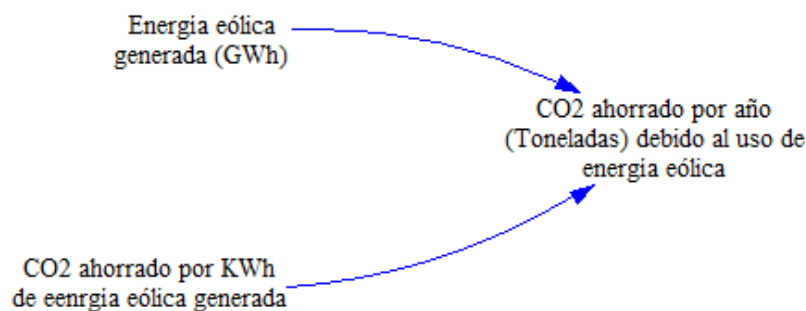


Figura 34 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

Si se supone un ahorro de CO₂ constante por kWh de energía eólica generada y se multiplica por la energía eólica generada, se va obteniendo la cantidad de CO₂ en Toneladas que no se ha generado y por tanto no se ha emitido a la atmosfera, reduciendo así las emisiones de GHG.

En el editor de ecuaciones de VEMSIM por tanto sólo hay que introducir la siguiente ecuación.

$$CO_2 \text{ kg ahorrado} / kWh \text{ de eólica generada} \cdot GWh \text{ de eólica generada} \cdot 1000 = T CO_2$$

El hecho de multiplicar la ecuación por 1000 es un problema de ajustar las unidades, para ello es necesario recordar que la energía eólica generada es una variable almacenada en Gwh, y que 1Gwh=10⁶kWh. Por otra parte la cantidad de CO₂ ahorrada no se expresa en kg sino en Toneladas, por tanto:

$$\frac{kg CO_2}{kWh} \cdot GWh \cdot \frac{10^6 kWh}{1GWh} \cdot \frac{1Toneladas CO_2}{1000kg CO_2} = Toneladas CO_2 \text{ ahorrado}$$

Ahora bien el dato cuantitativo de las toneladas de CO₂ no emitidas a la atmósfera por la producción de energía eólica, es una cantidad difícil de interpretar por sí misma. Por esta razón se crean nuevas variables que aporten referencias al valor de esta magnitud, estas nuevas variables son el equivalente de CO₂ ahorrado en número de vehículos y el tanto por ciento de descarbonización fijando como referencia los niveles de emisiones del año 1990.

Al mismo tiempo hay que visualizar que porcentaje de las emisiones de CO₂ corresponden a las emisiones procedentes de la combustión de combustibles fósiles en la producción de energía primaria. Como se puede visualizar en el siguiente gráfico con datos procedentes de la oficina Europea de estadística Eurostat, la producción de energía ha supuesto históricamente el mayor peso en cuanto a emisiones de CO₂ se refiere.

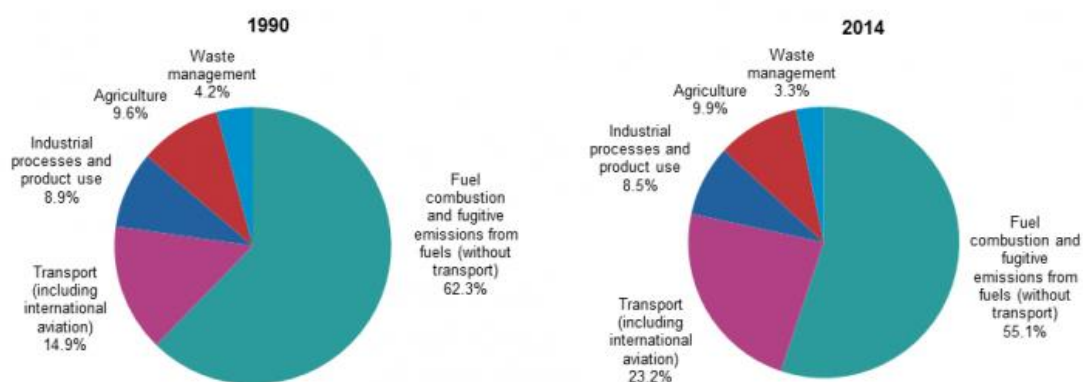


Figura 35 Aportación de cada sector a las emisiones totales de CO₂. Años 1990, 2014 [26]

Al mismo tiempo en el gráfico (Figura 35) se puede observar, como aunque en el año 2014 la combustión de fueles representaba la mayor parte de las emisiones, este valor se había reducido a un 55,1% del total de las emisiones frente al 62,3% que representaba en el año 1990. Esta reducción es debida a la penetración de las energías renovables.

Variables que dan referencias a las Toneladas de CO₂ ahorradas:

Como se ha introducido en el apartado anterior, las toneladas totales de CO₂ cuya emisión a la atmósfera han sido evitadas mediante energía eólica no ofrecen una buena interpretación por si mismas, es por ello dónde en este punto se dan dos nuevas variables para dar una mejor representación. En el diagrama de variables de Vensim para representar esto es el siguiente:

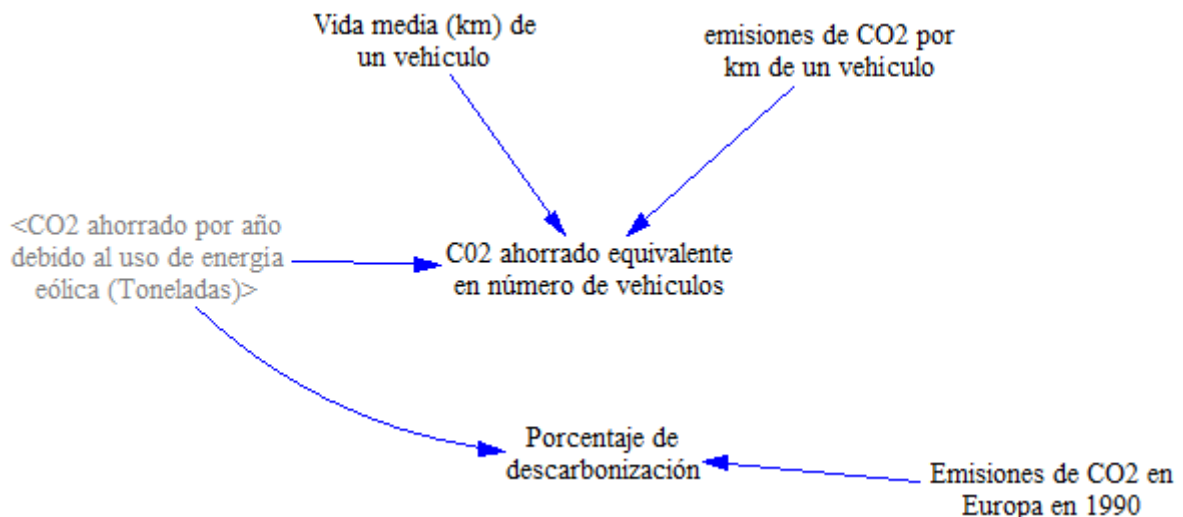


Figura 36 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

CO₂ ahorrado equivalente en número de vehículos:

Como su propio nombre indica es una variable que cuantifica las toneladas de CO₂ ahorradas como el CO₂ emitido por un determinado número de vehículos en Europa en un año.

Para llegar a esta variable antes es necesario la referencia de la variable de **emisiones de CO₂/Km de un vehículo**, este dato es estipulado por [27] en 130 g/km. Por lo tanto:

$$\frac{\text{Toneladas } CO_2 \text{ ahorradas} * 10^6 g}{g \text{ } CO_2 \text{ emitidos por vehículo} / km * km \text{ recorridos}} = \text{número de vehículos}$$

Porcentaje de descarbonización:

Esta variable indica el porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ respecto a los valores de emisión en Europa en el año 1990, valor que tanto Eurostat como la OECD library cuantifican en 7100 millones de toneladas. Por tanto la ecuación a implementar en Vensim es:

$$\frac{(emisiones\ CO_2\ año\ 1990 - emisiones\ CO_2\ año\ n)}{emisiones\ CO_2\ año\ 1990} = \% \text{ descarbonización por año}$$

8 Ecuación en Vensim, para el % de descarbonización, referencia año 1990

Dónde n toma valores de años para el periodo 1990-2050 que son los años estudiados en el modelo.

Esta variable es importante porque asocia en que medida se alcanzan los objetivos explicados en el primer capítulo de este trabajo. Por un lado los acuerdos procedentes del tratado de París de 2015 que perseguían un objetivo de reducción de emisiones de gases GHG del 40% respecto a los valores de 1990 y por otro La Europa Roadmap To 2050 que fijaba unos objetivos más ambiciosos de reducción del 80% de gases GHG.

4.13- Cantidad de agua m^3 ahorrados por el uso de energía eólica [28]

Según el informe de la OECD “Water Security for better lives” en el año 2050 estima que el 40% de la población mundial tendrá problemas de acceso al agua tanto en uso industrial, agricultura y también a nivel de hogares. Al mismo tiempo el objetivo de las políticas Europeas es garantizar el acceso de agua con calidad de consumo al total de ciudadanos europeos.

Entre todos los usos directos e indirectos del agua en Europa, la mayor parte un 44% es utilizada en la producción de energía primaria tanto en centrales térmicas como en centrales nucleares, esto unido junto a un periodo climático de mayor sequía puede originar problemas de accesibilidad al agua en las zonas del sureste de Europa.

Estadísticas de agua ahorrado con energía eólica

- La producción de energía consume la mayor cantidad de agua utilizada en Europa. La cantidad de agua (cooling water) usada para la generación de energía eléctrica en centrales térmicas y nucleares supone el 44% del uso total, el equivalente al uso doméstico diario de 82 millones de ciudadanos europeos (población de Alemania).
- La energía eólica evito el uso de 387 millones de m^3 de agua en el año 2012, el equivalente al consumo doméstico de 7 millones de ciudadanos.
- Los 387 millones de m^3 de agua ahorrados significaron un ahorro de 743 millones de euros en energía de bombeo.

En la siguiente gráfica observamos que en el año 2012, la mayor parte de agua utilizada en Europa se destinó a la producción de energía primaria (44%) [28].

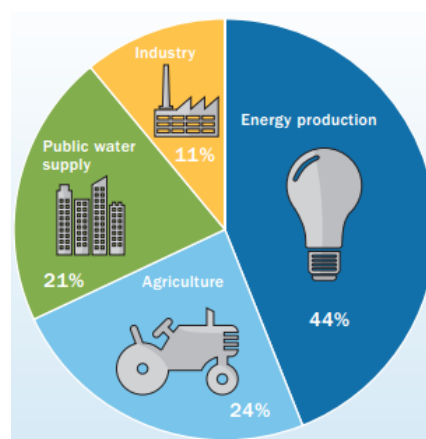


Figura 37 Porcentaje de agua consumido en Europa por sector [28]

El esquema para plasmar en VEMSIM la cantidad de agua total ahorrada por el uso de energía eólica es el siguiente (Figura 38):

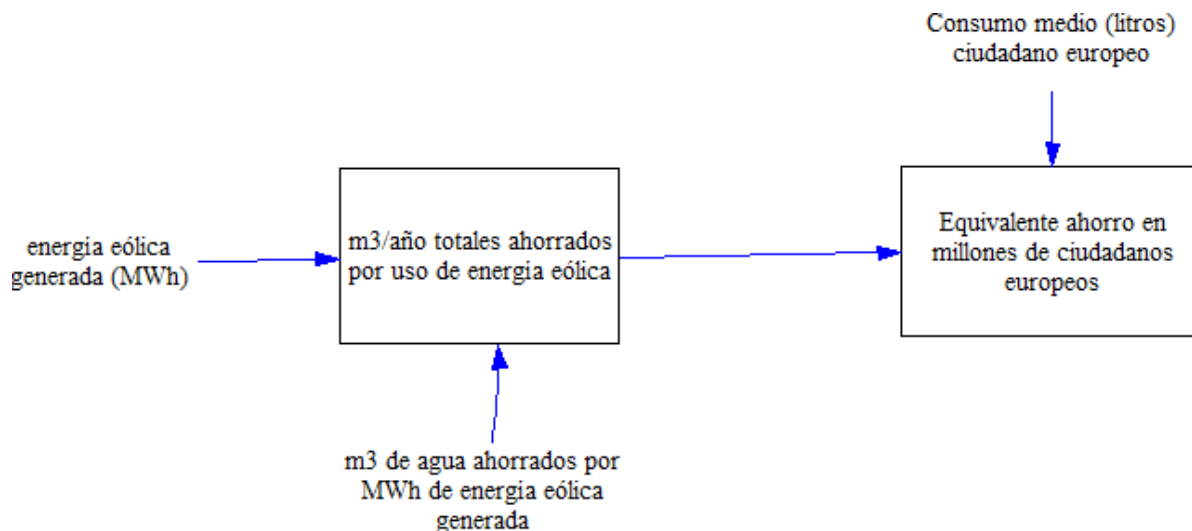


Figura 38 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

La variable **m³/año totales ahorrados por uso de energía eólica** es una variable que recoge el producto de la variable **m³ de agua ahorrados por MWh de energía eólica generada** por la variable **energía eólica generada**.

$$E^a \text{ eólica generada (MWh)} * \frac{m^3 \text{ de agua ahorrado}}{MWh \text{ de } E^a \text{ eólica generada}} = m^3 \text{ de agua ahorrado}$$

9 Ecuación en Vensim para los m³ de agua ahorrados

La variable **m³ de agua ahorrados por MWh de energía eólica generada** se toma como una constante considerando que la cantidad de agua utilizada en la generación de energía nuclear son 2,7m³/MWh [29], en térmica 1,9m³/MWh [29] y en gas 0,7m³/MWh [29] y teniendo en cuenta que la cantidad de agua utilizada en la energía eólica por MWh generado es prácticamente 0 (aunque se utiliza agua en tareas de fabricación y limpieza) se puede tomar una media constante de 2m³/MWh de ahorro de agua.

La **variable consumo medio (litros) ciudadano europeo** como su propio nombre indica es una constante, que indica el valor medio que cada ciudadano europeo consume de agua diariamente tanto por uso directo (consumo en los hogares) tanto por uso indirecto (agricultura, industria y producción de energía). Este valor medio es estipulado en 4,815 litros según [30], [31].

Por último la **variable equivalente ahorro en millones de ciudadanos europeos** resulta de la división de los m^3 totales ahorrados en un año por el uso de energía eólica en lugar de otras fuentes de energía, entre los litros anuales consumidos por ciudadano europeo.

$$m^3 \text{ ahorrado año} \cdot \frac{1000 \text{ l}}{1 m^3} / \text{l consumidos diarios} \cdot \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = n^{\circ} \text{ ciudadanos}$$

4.14- Variación de coste de MW instalado [20]

Es una variable que modela la variación de costes a través de una función exponencial decreciente. Se toma un dato de partida que es el coste por MW instalado de potencia eólica en Europa en el año 2011 dato obtenido de la International Renewable Energy Agency (IRENA) [4] o de la European Wind Energy Association (EWEA) [32] quienes aproximan unos costes de 1925USD/kW de eólica instalado.

A partir de aquí se utilizan informes [33] de la International Energy Agency (IEA) que pronostica una caída en los costes de instalación USD/kW del 18% para el año 2030 respecto al 2011 y del 23% para el año 2050 también respecto al 2011. Estas estimaciones coinciden bastantes con los proporcionados por GWEC and Greenpeace [34] que refleja caídas de costes USD/kW entre el 16-18% para el año 2030 y entre el 21-23% para el año 2050, ambos valores comparados con los precios del 2011.

Por lo tanto la forma de modelar es adecuar una función exponencial negativa que respecto al valor de precios del 2011 pase por una disminución del 18% en el año 2030 y del 23% en el año 2050.

Costes de MW instalado:

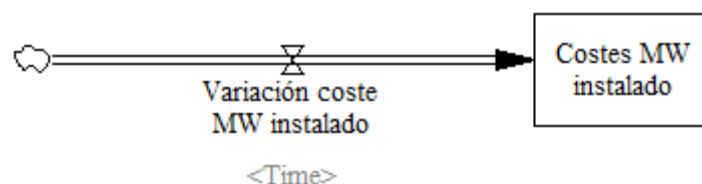


Figura 39 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

La anterior función costes de MW instalado era una variable auxiliar que como su propio nombre indica recoge la variación de precios USD/kW de un año en particular respecto del año anterior. Sin embargo esta variable de costes instalados es el sumatorio de esas

disminuciones de precios a lo largo del tiempo, proporcionando la curva de costes potencia eólica instalada hasta el año 2050.

La forma de con la que se trabaja en el editor de funciones es la siguiente:

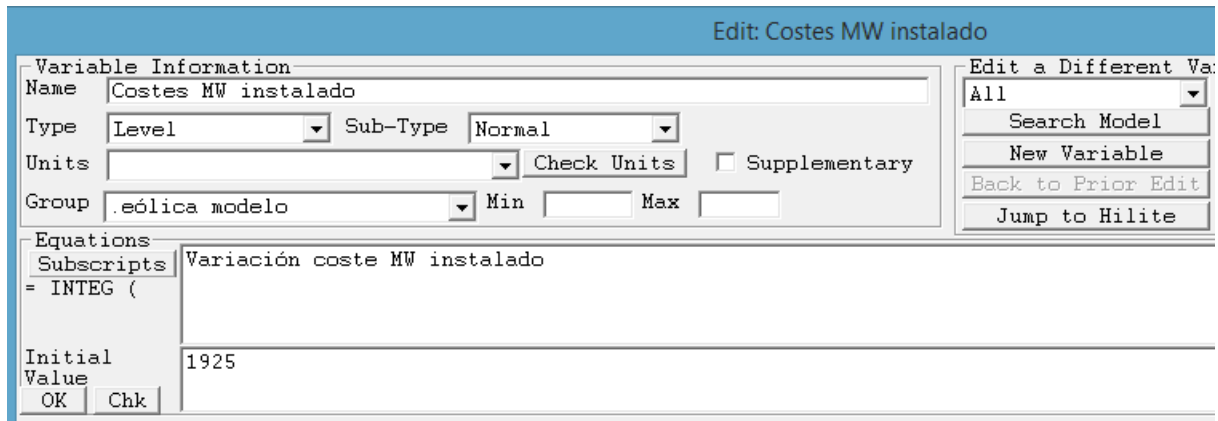


Figura 40 Editor de ecuaciones. Variables costes por MW instalado.

La variable costes MW instalado se la define como tipo LEVEL y se la da un valor inicial de 1925 (precio del año 2011 tomado de [4]), y se indica que se integren los valores, es decir el sumatorio de las variaciones de disminución de precios de cada año, obteniendo una curva exponencial decreciente.

La disminución de precios del coste de MW instalado puede ser explicada por los siguientes factores:

a) Disminución del precio de las turbinas [4]:

La disminución del precio de las turbinas en las últimas dos décadas es explicada por la fabricación en gran escala y por las mejoras tecnológicas unidas al efecto aprendizaje, es decir cada vez se conoce mejor el proceso de fabricación de turbinas y se disponen de mejores medios.

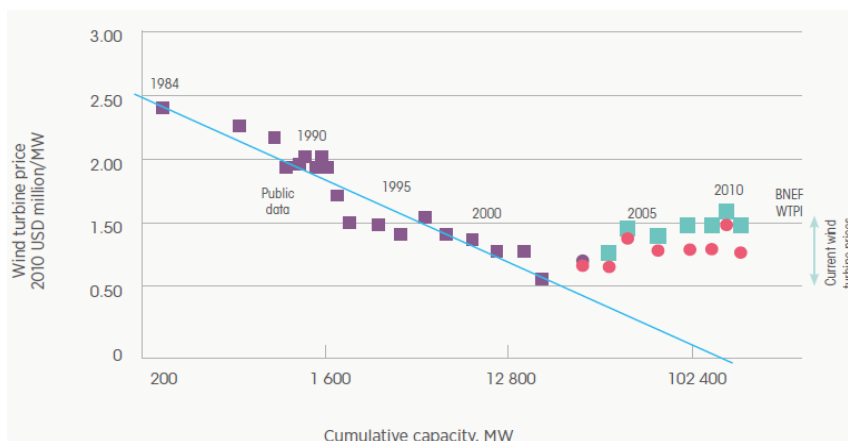


Figura 41 Gráfica de precios de fabricación de turbinas decrecientes por año y por potencia de turbina.

La gráfica (Figura 41) muestra como a medida que se ha aumentado los MW de eólica instalada a lo largo de los años, los costes USD/MW han ido disminuyendo progresivamente.

b) Disminución del precio de la red de conexión [4]:

Esta disminución de costes es significativamente más importante en la energía Off-shore a medida que se aumenta la capacidad instalada. Los costes por pérdidas en redes de larga distancia son reducidos usando HVDC (High-Voltage Direct Current).

c) Reducción de costes debido al aumento de la eficiencia [4]:

El factor de capacidad depende en gran medida de la velocidad media del aire a la que queda expuesto un parque eólico. La velocidad media del aire aumenta al aumentar la altura, por lo que el factor de capacidad ha ido aumentando a lo largo de los años a medida que se han ido construyendo molinos eólicos de mayor altura.

Además se deben mejoras al hecho de que se puede intuir el funcionamiento de una turbina eólica en condiciones turbulentas a través de la simulación mediante CFD (Computational Fluids Dynamics), generando mejoras en el diseño que mejore la capacidad de respuesta en el régimen turbulento.

Costes Totales de instalación USD:

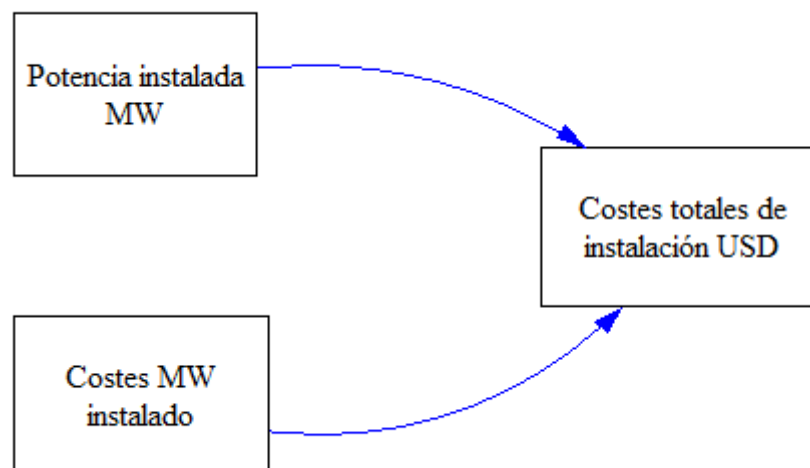


Figura 42 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.

Los costes totales de instalación es la variable de tipo nivel (LEVEL) que recoge la curva de costes de instalación de energía eólica para el periodo 1990-2050. En el editor de ecuaciones de VENSIM habrá que especificar que realice el producto de las funciones “Potencia instalada MW” por “Costes MW instalado”.

La curva de costes totales de instalación será una curva creciente por el hecho de que la potencia instalada en Europa aumenta con el transcurso de los años. Por otra parte recordamos que la potencia instalada seguía la forma de una función logística, es decir que al llegar a una cierta zona de saturación la parte exponencial se estabilizaba de manera asintótica respecto a un valor, esta saturación también se aprecia en la curva de costes totales.

Además los costes por MW instalado siguen una función decreciente, por lo que la función exponencial que sigue la potencia instalada se traduce en una función exponencial de pendiente más suavizada al realizar el producto y obtener la curva de costes totales de instalación en USD.



Capítulo 5

Resultados e interpretación de resultados

5. Resultados e interpretación de resultados

En esta sección se van a analizar principalmente el resultado de las variables modeladas en el periodo 2015-2050, las variables de mayor interés serán la potencia instalada (MW), la energía eólica generada (GWh), el % de energía eólica que abastece el total de la demanda eléctrica, y las toneladas de CO₂ no emitidas a la atmósfera por la utilización de energía eólica en lugar de otras fuentes de energía.

Potencia instalada (MW):

La potencia eólica instalada o la capacidad eólica instalada representan el valor de los MW existentes en cada año del periodo 1990-2050. El resultado es una curva creciente que empieza en los apenas 454 MW que había instalados en el año 1990 a los 372.200 MW que el modelo pronostica para el año 2050. La forma de la curva se puede dividir en dos tramos acoplados, un primer tramo año 1990-2014 son datos históricos, y el tramo 2015-2050 que es el tramo dónde se han tomado distintas hipótesis para modelar el comportamiento.

En el segundo tramo, que corresponde al periodo 2015-2050, se observa la forma de una curva exponencial creciente pero que alcanza cierto grado de saturación (Figura 43). Esto concuerda con la hipótesis introducida de una función logística creciente que alcanza saturación principalmente por el hecho de que las superficies para construir parques eólicos no son ilimitadas.

Por otra parte se pueden comparar los resultados de potencia obtenidos con datos de potencias bibliográficos en base a estudios de distintas instituciones, por ejemplo la EWEA [23], pronostica unos valores de potencia eólica instalados en Europa de 320.000 MW mientras el modelo caracteriza 315.600 MW en el mismo año, la IEA [33] pronostica 400.000 MW para el año 2050, mientras que el modelo pronostica 372.200 MW, por tanto los resultados parecen ir en concordancia a los estudios realizados por otras instituciones.

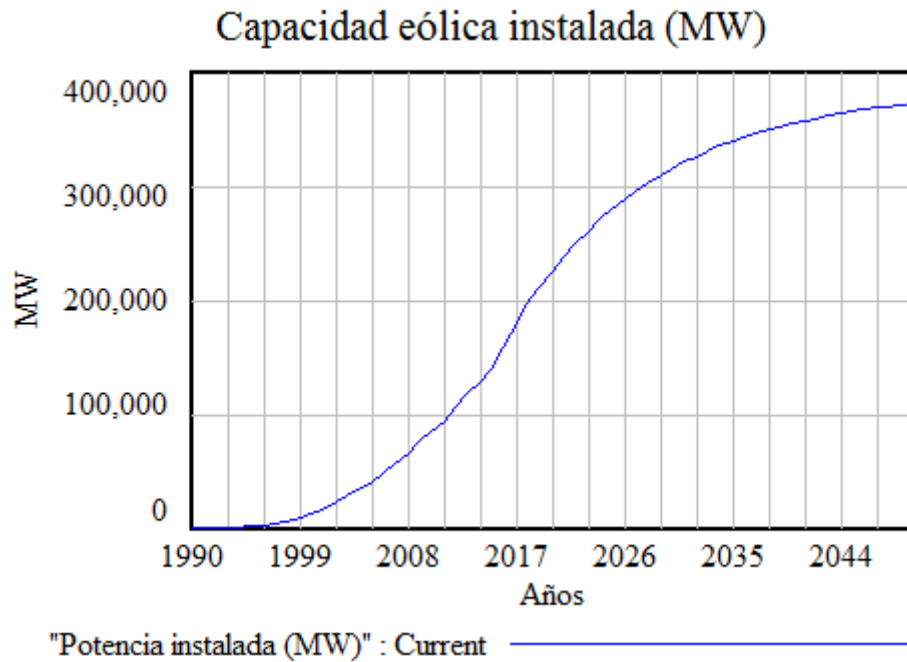


Figura 43 Capacidad eólica instalada en Europa, periodo 1990-2050. Modelo en VENSIM

Demanda de energía eléctrica (GWh):

La demanda de energía eléctrica en Europa sigue un crecimiento exponencial. Primeramente sobre la gráfica, se puede observar que en el tramo correspondiente a los datos históricos concretamente en el año 2008 se produce la única disminución de la demanda de energía eléctrica en todo el periodo estudiado, esta disminución se puede explicar como consecuencia de la crisis económica de 2008, provocando el cierre de algunas industrias y a los menores recursos en los hogares para hacer frente a la tarifa eléctrica.

A partir de ahí la demanda de energía eléctrica no deja de aumentar en el periodo 2015-2050, recordando que aquí la curva es producto de dos factores, por un lado la electrificación de combustibles fósiles, mayoritariamente la electrificación del transporte, que aumenta la demanda de energía eléctrica, y por otro lado las mejoras tecnológicas que permiten que los dispositivos puedan funcionar con menores necesidades de energía eléctrica (disminuyendo la demanda eléctrica).

Con todos estos factores el modelo señala hacia los 3,5 millones de GWh de demanda de energía eléctrica para el año 2050 (Figura 44).

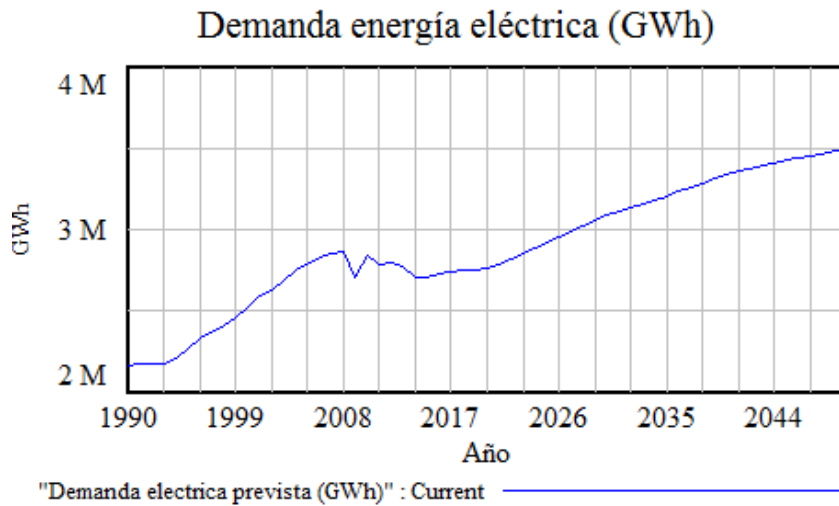


Figura 44 Demanda de energía elctrica en Europa en el periodo 1990-2014. Modelo en VENSIM

Energía eólica generada GWh:

El resultado de esta variable vuelve a ser una curva exponencial creciente que avanza desde los 778GWh que eran generados en el año 1990, a los 815.200GWh que el modelo caracteriza para el año 2050 (Figura 45).

La forma de la curva vuelve a ser unas exponencial creciente que alcanza saturación a partir más o menos del año 2036, esto es razonable ya que la energía eólica generada es el producto de dos factores, el factor de capacidad que es aritméticamente creciente, y de la potencia instalada que sigue la forma de una función logística que alcanza saturación, por tanto la energía eólica generada imita esta forma alcanzando también la saturación.

Por otra parte se pueden comparar los resultados obtenidos con los estudios de la EWEA que pronostica 778.000GWh generados en el año 2030, mientras el modelo es algo más conservador con 651.600GWh.

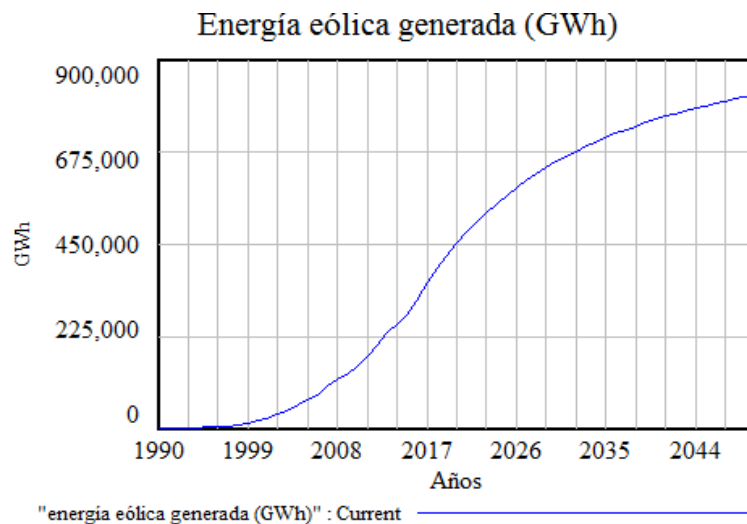


Figura 45 Energía eólica generada (GWh) en Europa periodo 1990-2050. Modelo en VENSIM

Ahora bien en la construcción de un modelo dónde intervienen tantas variables como en este, no se puede afirmar un único resultado para cada año, ya en que la entrada de cada variable se introducen hipótesis que pueden tomar ciertos valores de incertidumbre.

Tal vez la variable de entrada con mayor incertidumbre de todas las que afectan al modelo sea el factor de capacidad, por consiguiente se realiza un análisis de sensibilidad a través de una simulación de Monte Carlo.

Para realizar esta sensibilidad se introduce una incertidumbre a la variable factor de capacidad a través de una distribución RANDOM UNIFORM con valores mínimos de factor de capacidad del 90% y máximos del 110%.

El análisis de sensibilidad obtenido para esta variable es el que se puede visualizar en la siguiente figura (Figura 46);

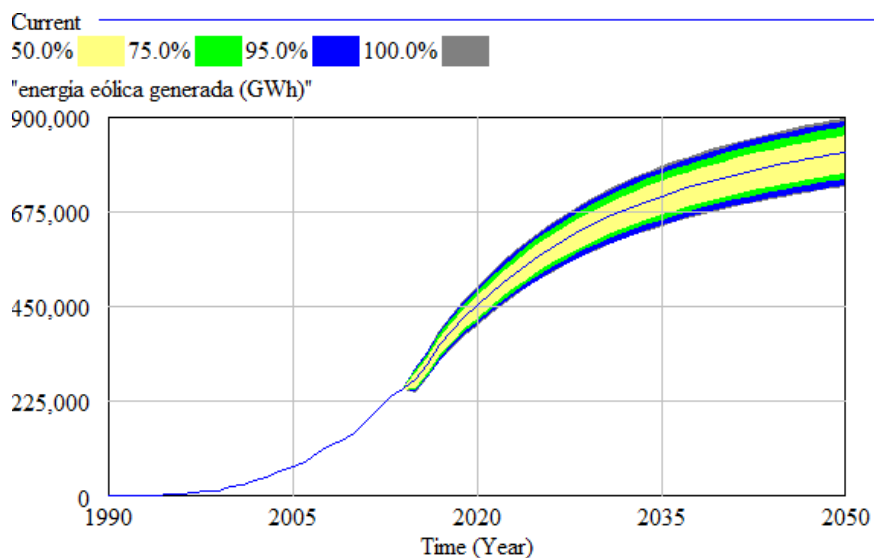


Figura 46 Análisis de sensibilidad, energía eólica generada (GWh) en Europa, periodo 1990-2050

La interpretación de este análisis de sensibilidad es el siguiente. Con un 100% de posibilidades la energía eólica generada en GWh va tomar valores comprendidos en la franja gris de la figura. Por ejemplo la energía eólica generada en el año 2050 va tomar valores con un 100% de posibilidades entre los 710.000GWh y los 900.000GWh bajo las hipótesis del modelo.

Lo mismo ocurre con la franja verde, que se interpreta como 75% de posibilidades que la energía eólica generada adquiera valores dentro de esa franja, o la franja amarilla que es un 50% de probabilidad.

Por tanto la variación máxima de energía eólica generada (franja gris) toma un valor de 190.000GWh (diferencia entre el valor máximo y el mínimo) sobre un máximo de generación de 900.000GWh, al introducir una incertidumbre del 10% sobre la variable factor de capacidad, la sensibilidad sobre la variable energía eólica generada es del 21%

% de energía eólica:

Como se ha explicado anteriormente, esta variable hace referencia al que la energía eólica contribuye sobre el total de la energía eléctrica demandada. El resultado de esta variable es de gran importancia, ya que nos permite comparar en qué grado se cumplen las expectativas europeas que nacen del acuerdo del clima de París de Diciembre de 2015.

Como consecuencia del latente cambio climático y de la escasez de combustibles fósiles, la UE había marcado cómo prioridad al menos un 27% de energías renovables para el año 2030. El modelo apunta hacia un 21,12% de energía eólica para el año 2030, que como se puede comprobar queda cerca del objetivo del 27% que se puede completar con otras fuentes de energía renovables como la fotovoltaica, la hidroeléctrica, la biomasa, la mareomotriz., por tanto se puede comprobar que la energía eólica juega un papel transcendental para que se cumplan este objetivo prioritario.

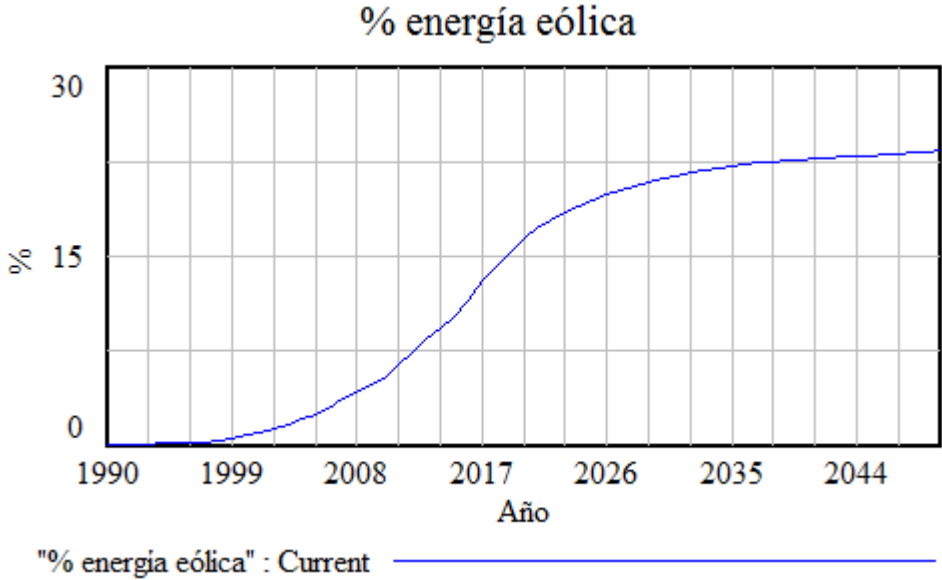


Figura 47 Porcentaje de energía eólica que cubre la demanda eléctrica. Modelo VENSIM

Ahora bien al igual que ocurre para la variable “energía eólica generada (GWh)”, la variable “% de energía eólica” se ve afectada por las hipótesis tomadas sobre la variable de entrada “factor de capacidad”, del mismo modo se procede a introducir una simulación de Monte Carlo para obtener un análisis de sensibilidad, para ello se introduce una incertidumbre a la variable factor de capacidad a través de la distribución RANDOM UNIFORM con valor mínimo del 90% y máximo del 110%.

El análisis de sensibilidad obtenido se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 48):

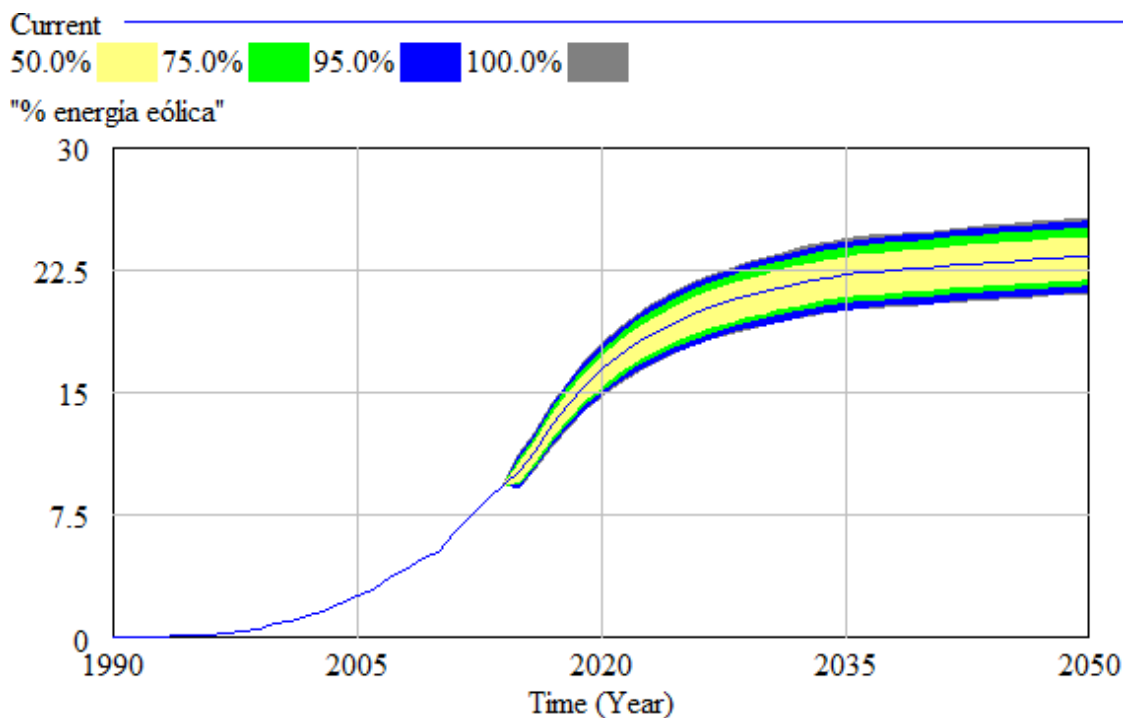


Figura 48 Análisis de sensibilidad para el porcentaje de la demanda eléctrica abastecido por energía eólica en Europa, periodo 1990-2050. Modelo en VENSIM

La interpretación de este análisis de sensibilidad es el siguiente, se puede afirmar que con un 100% de posibilidades bajo las hipótesis del modelo, el porcentaje de demanda abastecido por energía eólica se encuentra en la franja gris de la figura, es decir, por ejemplo para el año 2050 hay un 100% de posibilidades que este porcentaje se encuentre entre el 20,2% y el 24,7%.

Del mismo modo la franja verde de la figura indica que hay un 75% de posibilidades de que los porcentajes de eólica tomen valores de ese rango, y la franja amarilla indica un 50% de posibilidades.

Por tanto la diferencia entre el valor máximo y el mínimo (franja gris), corresponde a un 4,5 puntos sobre un máximo de 24,7, es decir, al introducir una incertidumbre sobre la variable factor de capacidad, la sensibilidad sobre la variable % de energía eólica es del 18,2%.

CO₂ ahorrado al año por el uso de energía eólica (Toneladas):

Esta variable hace referencia a las toneladas de CO₂ cuya emisión ha sido evitada al utilizar energía eólica en lugar de otras fuentes de energía no renovables, como se puede observar su forma es una curva creciente, como consecuencia de que cuanto más potencia eólica es instalada, más energía eólica es generada y por tanto menor es la energía eléctrica procedente de fuentes de energía con altas de emisiones de carbón durante las combustión.

La curva creciente evoluciona desde las 166.800 toneladas en el año 1990 a las 489.100.000 Toneladas en el año 2050 (Figura 49), como estos valores son difícil de interpretar estas toneladas ahorradas se expresan al equivalente en número de vehículos y porcentaje de disminución de CO₂.

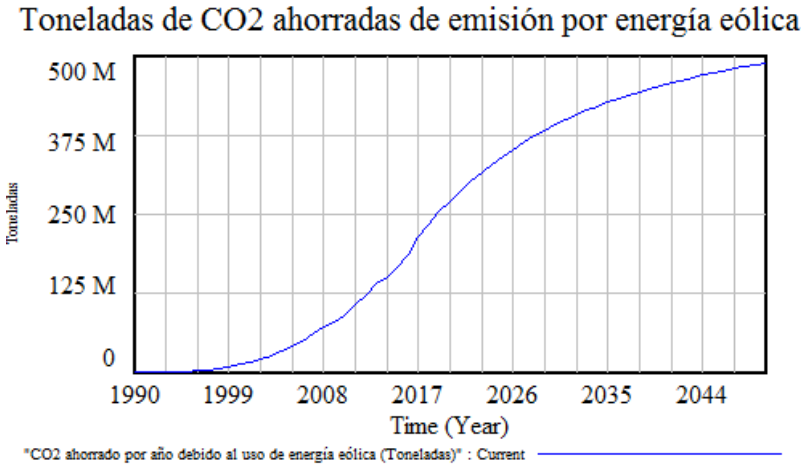


Figura 49 Toneladas de CO₂ ahorradas por el uso de energía eólica

Porcentaje de descarbonización:

Esta variable es una interpretación de las Toneladas de CO₂ ahorradas por la utilización de energía eólica, además sirve para comparar en qué grado se cumplen los objetivos de disminución de emisión de CO₂ fijados en los acuerdos del clima de París y de la Europa Roadmap 2050.

El objetivo de los acuerdos del tratado sobre el clima de París de 2015 eran de una reducción del 40% de gases GHG para el año 2030 respecto a los valores de emisión de 1990, mientras que la Europa Roadmap fijaba unos objetivos de reducción de los mismos gases de un 80% también respecto a los valores de emisión del año 1990.

Como vemos en la siguiente gráfica (Figura 50), la realidad se queda algo lejos de los objetivos, al menos siguiendo la tendencia actual. Las 489.100.000 Toneladas de CO₂ representan un 6'85% de descarbonización para el año 2050 respecto a los valores de emisión de 1990.

Del mismo modo que la energía eólica cubre prácticamente los objetivos de al menos un 27% de energías renovables para el año 2030, sólo con eólica no se cumplen los objetivos de reducción de emisión de CO₂, por tanto para reducir estas emisiones es necesario realizar esfuerzos paralelamente en otros ámbitos como en la electrificación del transporte, otras fuentes de energía renovables, el sistema de "cap and trade" en las industrias, la repoblación de masa forestal, la adsorción de CO₂...

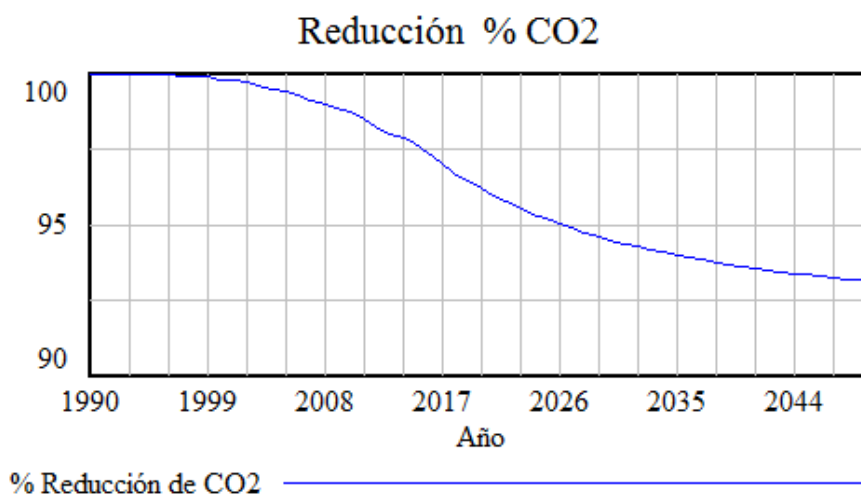


Figura 50 Porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ respecto a los niveles de 1990.

CO₂ ahorrado equivalente en número de vehículos (Figura 51):

Las toneladas de CO₂ ahorradas también se pueden expresar como al equivalente del CO₂ desprendido por un número determinado de vehículos durante la combustión interna necesaria para su movimiento.

Como se puede ver en la siguiente gráfica, a lo largo del periodo 1990-2050 a medida que la potencia eólica instalada es mayor, mayor es la cantidad de vehículos cuya emisión de CO₂ sería evitada, los datos muestran un ahorro de 35.380.000 vehículos por año en el año 2030 y de 44.260.000 vehículos por año en el año 2050.

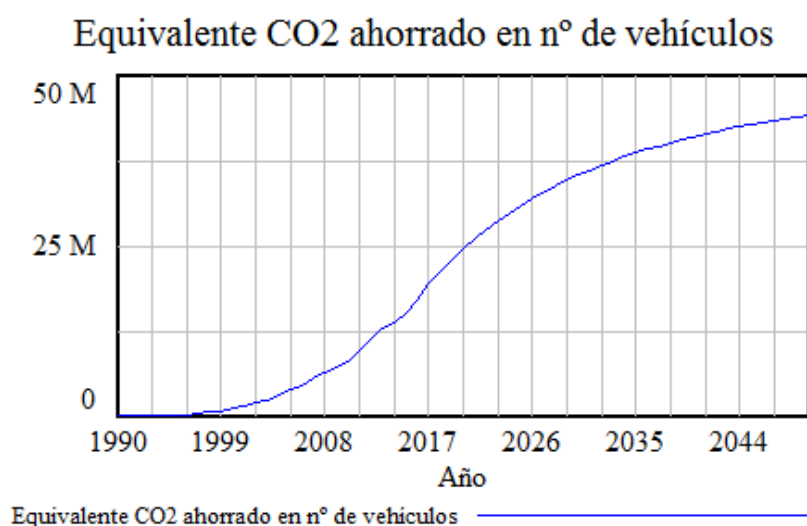


Figura 51 Equivalente del CO₂ ahorrado por la energía eólica en nº de vehículos

Ahorro de agua equivalente en número de ciudadanos:

Esta variable es el resultado equivalente en consumo de agua de un determinado número de ciudadanos por el uso de energía eólica en vez de otras fuentes de energía que utilizan agua como la nuclear, o las térmicas.

La gráfica que aparece a continuación (Figura 52), muestra como a lo largo del periodo 1990-2050 progresivamente la cantidad de ciudadanos involucrados en este ahorro es mayor ya que la potencia eólica instalada es mayor.

Los resultados muestran como la cantidad de agua ahorrada en equivalente al consumo en número de ciudadanos serían de 741.600 ciudadanos europeos para el año 2030 y de 927.700 ciudadanos europeos para el año 2050, lo que por población equivale al consumo anual de agua de ciudades del tamaño de Atenas (Grecia), Colonia (Alemania), Nápoles (Italia), Marsella (Francia).

Consumo equivalente en número de ciudadanos

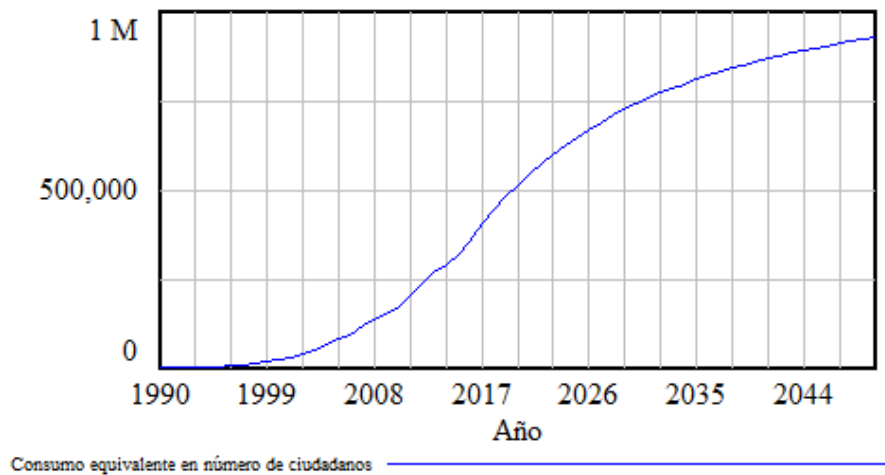


Figura 52 consumo de agua equivalente en número de ciudadanos, periodo 1990-2050 (elaboración propia)

Costes Totales de instalación (USD):

Como se ha explicado anteriormente los costes de instalación es el producto del coste (USD) por MW instalado, por MW instalados anualmente. Como se puede ver en la siguiente gráfica (Figura 53) los costes de instalación cada vez son mayores, pero esto no quiere decir que la tecnología eólica cada vez sea más cara, sino que la potencia instalada (MW) cada año es menor.

Costes Totales de instalación (USD)

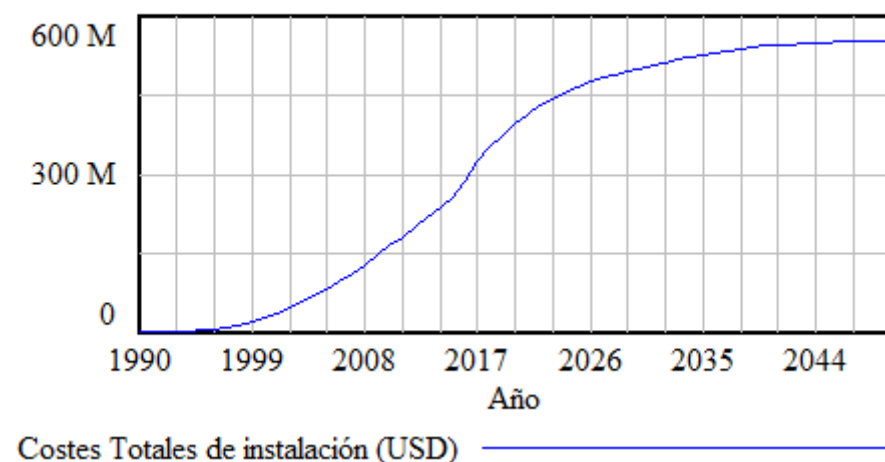


Figura 53 Costes totales de instalación energía eólica periodo 1990-2050 (elaboración propia)

Beneficios energía eólica (€) (Figura 54):

Como se ha comprobado con la variable anterior, los costes de instalación no representan fielmente la rentabilidad económica de la energía eólica, por lo que se introduce la variable beneficios de energía eólica.

Esta variable es la diferencia entre los ingresos procedentes de la venta de energía eólica, menos los costes (de instalación y de investigación). Como se puede comprobar los beneficios de la eólica son cada vez mayores exceptuando los primeros años (1990-2006) que se producían pérdidas ya que los ingresos eran menores que los costes, y por otra parte el periodo 2040-2050, las instalaciones eólicas siguen dando beneficios pero parecen alcanzar cierto grado de saturación, la rentabilidad marginal por cada MW instalado a mayores es prácticamente nula.

Por tanto superada la etapa de amortización de los costes en investigación, se puede afirmar que la instalación global de energía eólica genera beneficios, beneficios crecientes a lo largo del periodo 1990-2050. Por contraste, decir que estos beneficios son globales para todas las instalaciones de Europa, los beneficios de una instalación depende de numerosos factores, tamaño, situación geográfica, factor de capacidad.. y por tanto los beneficios de estas instalaciones particulares se deben detallar de otro modo.

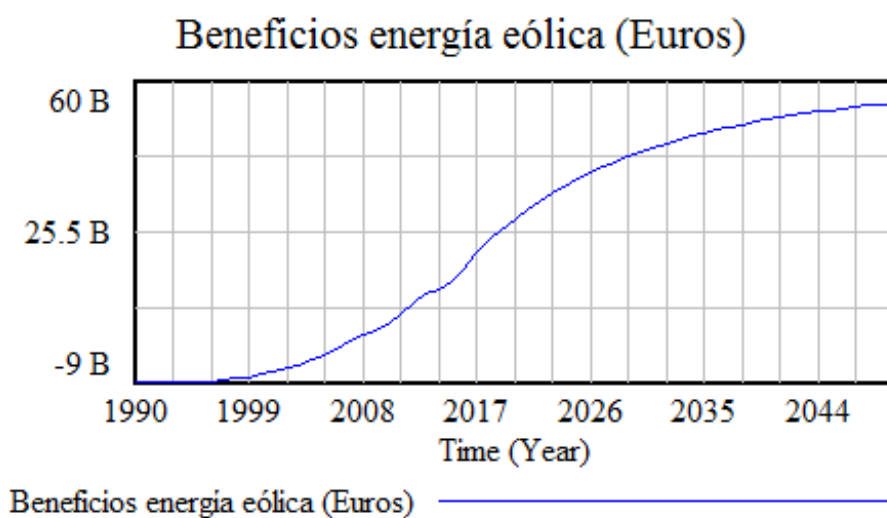


Figura 54 Beneficios aportados por la energía eólica periodo 1990-2050 (elaboración propia)



Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6. Conclusiones del trabajo

Esta parte del trabajo se centra en responder en qué medida se cumplen los objetivos planteados, es decir en qué grado se ha desarrollado mediante dinámica de sistemas un modelo que caracterice fielmente la evolución de la implantación de la energía eólica en Europa en el periodo 1990-2050.

La solución obtenida es un modelo en Vensim, dónde aparecen variables de interés sobre el desarrollo de la energía eólica en Europa como son los MW de potencia eólica instalados, los GWh de energía eólica producida, el % de energía eólica que satisface la energía eléctrica demandada, las toneladas de CO₂ cuya emisión ha sido evitada por la utilización de energía eólica, el porcentaje de descarbonización.

Para llegar a la solución del modelo se han introducido hipótesis sobre las variables de entrada, estas hipótesis están basadas en tendencias y en estudios de ámbito científico de validez, por tanto la ventaja de crear el modelo a través de un software para la simulación de dinámica de sistemas se encuentra en que las variables de entrada son editables, es decir se pueden introducir cambios sobre las variables de entrada a medida que aumentan los conocimientos sobre esta materia y así poder obtener un modelo aún más contrastado.

El objetivo de la información obtenida no es el de simplemente mostrar una visión futurista de la utilización de los recursos energéticos sino la de comparar los resultados obtenidos en diferentes variables, con los objetivos de las políticas energéticas comunitarias tal como se hace en el apartado de resultados obtenidos.

Por último es necesario recordar que el objetivo de estas políticas comunitarias se centraba en la reducción de las emisiones de gases GHG y de un mínimo porcentaje de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables, estas medidas nacen por la escasez de combustibles fósiles (petróleo y gas) en Europa y el latente cambio climático, dichas medidas se recogen en el tratado del clima de París y en la Europa Roadmap 2050.

Conclusiones de los resultados. Interpretación de los resultados.

- 1) Los acuerdos del clima de París buscaban unos objetivos del 27% de energías renovables satisfaciendo la demanda de energía eléctrica europea en el año 2030, reduciendo así la dependencia energética exterior. Ahora bien, con el modelo construido en Vensim, el % de energía eólica para el año 2030 hacia el que apunta este modelo es del 21,12%, es decir del objetivo del 27% de la demanda eléctrica Europea cubierta con renovables, el 78,1% se cubre con energía eólica. Para lograr ese objetivo, marcado en los acuerdos del clima de París, la energía eólica se puede complementar paralelamente con otras fuentes de energías renovables, como la solar fotovoltaica, la energía hidráulica, la mareomotriz, energía geotérmica. El porcentaje de eólica que muestra el modelo para el año 2050 es del 23,12%.
- 2) La Europa roadmap 2050 apuntaba hacia una descarbonización del 80% respecto a los niveles de emisión de 1990, los acuerdos del clima de París a una reducción del 40% también respecto a los niveles de 1990, por su parte el modelo refleja la realidad de que con energía eólica se pueden reducir las emisiones de CO₂ en un 6,85%. Por tanto con sólo energía eólica no se logra los objetivos de reducción de emisiones perseguidos, por lo que se deben tomar acciones y esfuerzos paralelos en otros ámbitos, como otras energías libres de emisiones de carbono, electrificación del transporte, adsorción de CO₂, límites de emisión a diferentes industrias, sistema "cap and trade" mejoras tecnológicas...

Por tanto de los puntos de conclusiones 1 y 2, conclusiones obtenidas a partir del modelo desarrollado en Vensim, se concluye, que mientras con energía eólica **si** se pueden lograr los objetivos de **% de energías renovables** fijados por los acuerdos del clima de París para el año 2030, al mismo tiempo, sólo con energía eólica **no** se puede lograr los objetivos de **reducción de emisiones de CO₂**, objetivos fijados en la Europa Roadmap 2050 y en los acuerdos del clima de París.

- 3) Otra de las variables de interés del modelo es la potencia eólica instalada en Europa anualmente en el periodo 1990-2050. En el año 2014 cuando se dejan de tener datos históricos, la potencia eólica instalada en Europa era de 140.200MW, con el modelo desarrollado, este apunta hacia una potencia eólica instalada de 315.600MW para el año 2030 y de 372.200MW para el año 2050. Esto quiere decir que en el periodo 2014-2030 se produce un gran incremento de la potencia eólica instalada, pero a partir aproximadamente del año 2035 (Figura 43), parece que se alcanza cierto grado de saturación, es decir el incremento de potencia instalada es menor en el periodo 2035-2050 respecto al periodo 2014-2035, esto se explica a lo largo del trabajo, por la existencia de una serie de factores que limitan el crecimiento infinito de la potencia eólica instalable en Europa, factores recogidos en (Ecuación 1).

- 4) Los datos de potencia eólica aportados por el modelo construido en Vensim, son comparados con estudios existentes de potencia predeciblemente instalada, y así poder valorar la concordancia del modelo, con los resultados de estudios realizados por instituciones de fiabilidad. Por ejemplo, la EWEA [23], pronostica unos valores de potencia eólica instalados en europa de 320.000 MW mientras el modelo caracteriza 315.600 MW en el mismo año, la IEA [33] pronostica 400.000 MW para el año 2050, mientras que el modelo pronostica 372.200 MW, por tanto los resultados del modelo construido parecen ir en concordancia a los estudios realizados por otras instituciones.

- 5) Con el modelo también se puede determinar la sensibilidad que el cambio de una variable, ejerce sobre variable. Por ejemplo se ha mostrado (capítulo 5, resultados) que al introducir una incertidumbre del 10% sobre la variable factor de capacidad, recordando de paso que era una variable que dependía de varios factores (humano, variabilidad de viento), la sensibilidad de la variable energía eólica generada era del 21% y la de la variable % energía eólica era del 18,2%

Además, tal como se muestra en los anexos, el trabajo se amplía realizando el mismo estudio que se ha realizado para el global de la UE, para cada país de una lista de 20 países europeos. De este estudio también se pueden sacar algunas conclusiones:

Los países con mayor generación de energía eólica a lo largo del periodo 1990-2050 son Alemania, España, Reino Unido, cabe destacar también los altos porcentajes de energía eólica satisfaciendo la demanda de energía eléctrica de países como Portugal o Dinamarca.

Un dato de interés que ofrece el modelo realizado, es el porcentaje de energía eólica que satisface la demanda de energía eléctrica para el año 2050, este dato se puede comparar con el reciente estudio (Agosto de 2017), realizado por el departamento de Ciencias de la Tierra, Energía y Medio ambiente dirigido por el profesor Jacobsen de la Universidad de Stanford, trabajo bajo el nombre “100% Clean and Renewable Wind, Water and Sunlight All-sector Roadmap for 139 Countries” [43].

Entre ambos trabajos se pueden comparar los porcentajes de eólica para el año 2050, por ejemplo el trabajo de Jacobsen recoge para el caso español un 33,49% mientras que el actual trabajo muestra un 31,4%. Ambos trabajos coinciden en buenas perspectivas para países como Dinamarca 31% trabajo de Jacobsen 39,1% modelo desarrollado, o porcentajes no demasiado altos para países grandes del centro de Europa como Francia o Italia (inferiores al 25%)

Trabajos futuros:

- a) A medida que aumenta la potencia instalada, se necesita más terrenos dónde poder instalar parques eólicos, ahora bien este terreno físico se encuentra limitado. Por tanto el trabajo se puede complementar con un estudio sobre la disponibilidad de territorio europeo aprovechable para instalar parques eólicos. En este trabajo intervendría numerosos stakeholders, por ejemplo, si se instalasen tantos MW de energía eólica como para alcanzar los objetivos del % de energías renovables, ¿Qué parte del suelo quedaría disponible para la agricultura o la ganadería? O ¿Las nuevas instalaciones proporcionarían factores de capacidad más bajos?
- Para este trabajo también se podría crear un modelo mediante dinámica de sistemas, modelo que se podrían complementar con el trabajo existente de la energía eólica en Europa.
- b) Por otra parte, del mismo modo a medida que se aumenta la potencia eólica instalada, no se puede garantizar con total certeza, si los materiales utilizados en la fabricación de turbinas son inagotables, todo hace indicar que ciertos materiales son limitados, o su precio aumentara los costes de fabricación en un futuro próximo, por tanto se puede crear un modelo paralelo, de la durabilidad de los materiales utilizados a medida que se aumenta la potencia eólica instalada.
- c) Por último este modelo de la energía eólica en Europa en el periodo 1990-2050, se puede complementar con modelos idénticos para otras energías renovables, el más inmediato sea quizás la energía fotovoltaica. Con ambos modelos se podría comparar en qué grado se cumplen los objetivos de % de energías renovables en la producción, o el grado de reducción de emisiones de CO₂.



Capítulo 7

Anexos

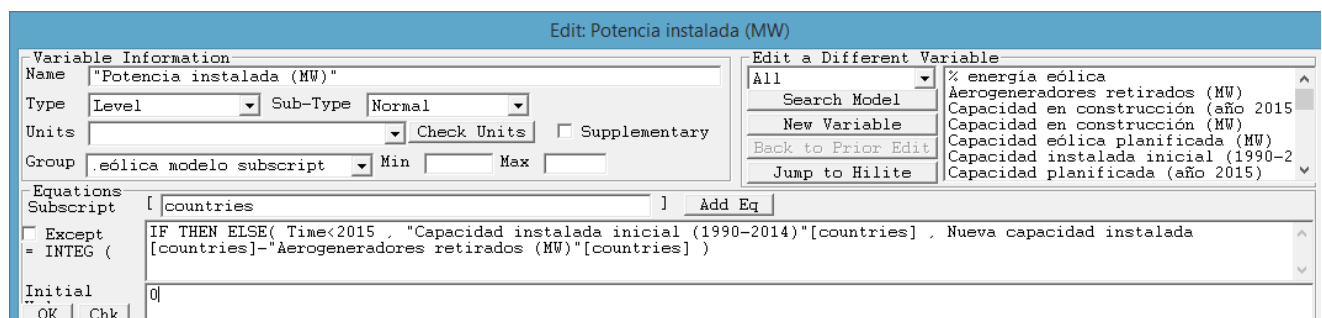
7. ANEXOS

El mismo modelo utilizado para caracterizar el comportamiento de la energía eólica para el global de Europa en el periodo 1990-2050, puede ser extrapolable mediante una serie de modificaciones en un modelo para cada país de la UE de manera que se pueda obtener información más específica del grado de desarrollo de eólica en cada territorio.

La manera de implantar esta idea, es mediante el comando subscript de VENSIM. Este comando consiste en la creación de un vector dónde se introducen en este caso 20 países de la UE que son, Austria, Bélgica, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Holanda, Polonia, Portugal, Eslovaquia, Eslovenia, España, Suecia y Reino Unido.

Las variables que describen el modelo global de la UE son idénticamente las mismas que las utilizadas en este modelo vectorial para estos 20 países de la UE, lo que ocurre que en estas variables hay que especificar que la ecuación introducida es introducida para un vector que afecta a 20 países.

Una vez introducido el vector (subscript) vector que contiene los 20 países citados, hay que ir modificando una a una todas las variables que intervienen en el modelo, por ejemplo se muestra la potencia instalada (MW)



The screenshot shows the Vensim software interface for editing a variable named "Potencia instalada (MW)". The "Variable Information" section includes fields for Name, Type (Level), Sub-Type (Normal), Units, and Group (.eólica modelo subscript). The "Equations" section shows the equation:
$$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < 2015, \text{"Capacidad instalada inicial (1990-2014)"}[\text{countries}] \cdot \text{Nueva capacidad instalada} [\text{countries}] - \text{"Aerogeneradores retirados (MW)"}[\text{countries}])$$
The "Initial" value is set to 0. The "Edit a Different Variable" section shows a list of variables including "% energía eólica", "Aerogeneradores retirados (MW)", "Capacidad en construcción (año 2015)", "Capacidad en construcción (MW)", "Capacidad eólica planificada (MW)", "Capacidad instalada inicial (1990-2)", and "Capacidad planificada (año 2015)".

Mientras la potencia instalada para el modelo global de Europa era:

IF THEN ELSE (Time < 2015, "Capacidad inicial instalada 1990 – 2014", Nueva capacidad instalada – aerogeneradores retirados(MW))

10 Ecuación potencia instalada para el global de la UE

Para poder aplicarlo a los 20 países citados, hay que especificar que la variable es aplicable a un vector, vector llamado “countries”.

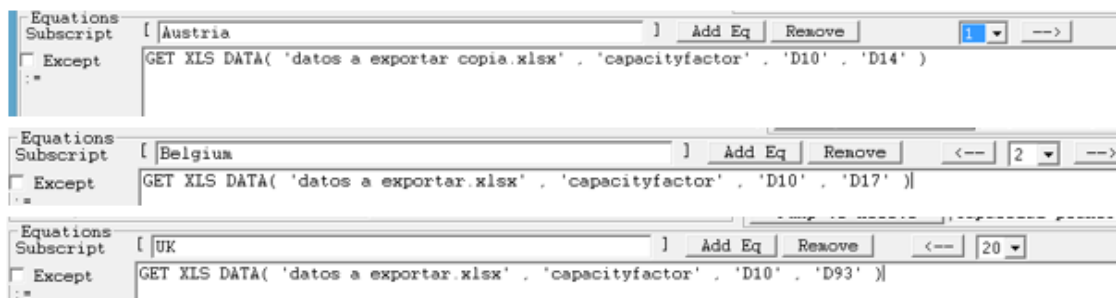
IF THEN ELSE (Time

< 2015, capacidad inicial instalada 1990-2014[countries], nueva capacidad instalada[countries] – aerogeneradores retirados (MW)[countries]

11 Ecuación potencia instalada por país de la UE. Ecuación vectorial

La ecuación anterior incluye el subscript [countries] de tal forma que la ecuación es aplicada a los 20 países que forman el vector.

La variable “capacidad inicial instalada 1990-2014 [countries]” que recordamos que tomaba valores de una hoja Excel dónde se encontraban los datos históricos de las potencias eólicas instaladas por país y año en Europa en el periodo 1990-2014, ahora hay que introducirla para los 20 países que comprende el modelo.



En la anterior figura se observa como en la variable “capacidad instalada 1990-2014” hay que introducir dentro de la misma variable con el comando “equations subscript” las 20 ecuaciones correspondientes a las 20 países del modelo. Recordamos que esta variable tomaba los datos almacenados en excel, de las potencias eólicas instaladas cada año y por país, por tanto estos valores están almacenados en filas distintas para cada país y en la ecuación hay que especificar en que rango de celdas se encuentran los datos de cada país para construir el modelo adecuadamente.

A continuación se pasa a describir los resultados de la energía eólica (GWh) generada anualmente para cada país y año durante el periodo 1990-2050, también se representa el % que esa energía representa sobre la demanda total de energía eléctrica. Todos los resultados con todas las variables obtenidos para el modelo de la UE, también se podrían obtener para cada país, pero por simplificación de los resultados obtenidos únicamente se muestran estas dos variables.

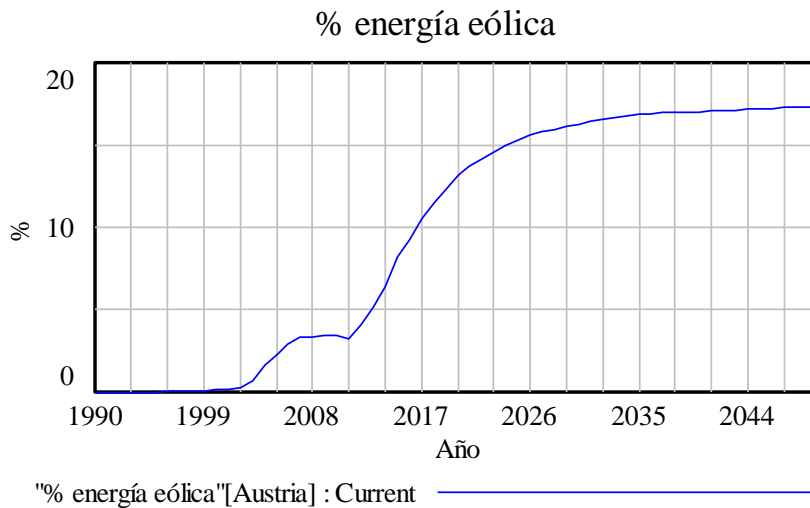
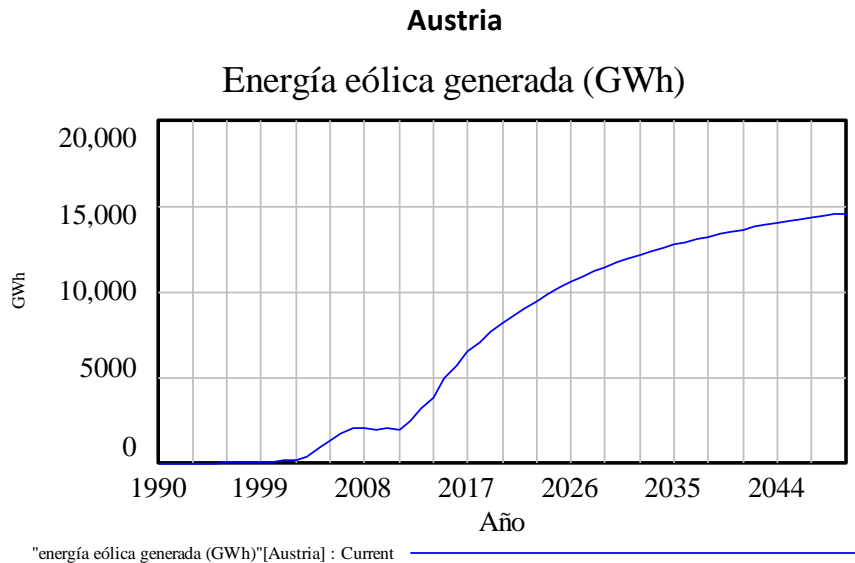
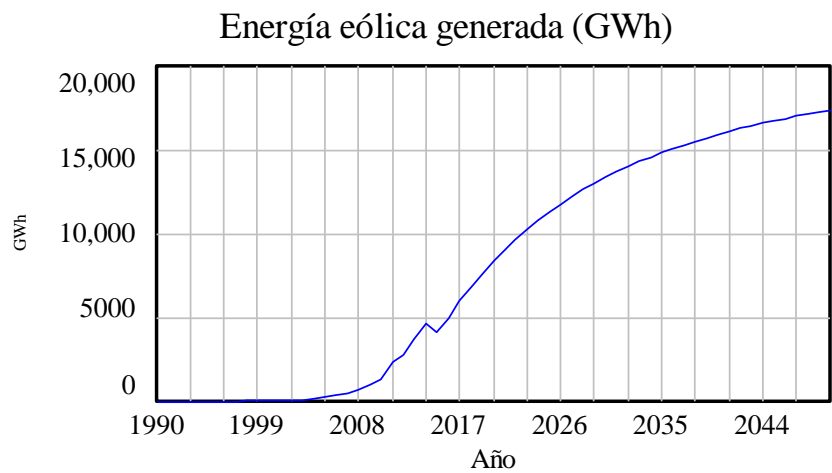


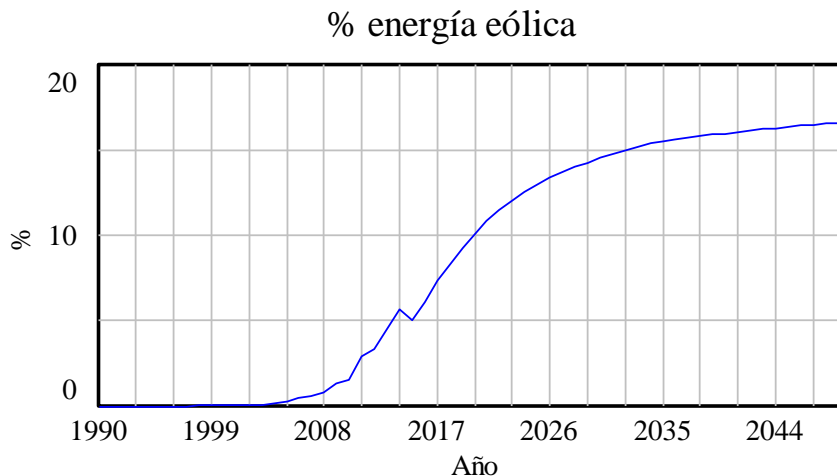
Figura 55 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Austria.

La energía eólica generada en Austria en el año 2014 (último año con datos históricos (Eurostat)) era de 3846 GWh, para una potencia instalada de 2086 MW, esto suponía un factor de capacidad del 21%. Por su parte el modelo de VENSIM caracteriza para el año 2050 casi los 15000 GWh de energía eólica generados anualmente y un porcentaje de energía eólica cubriendo la demanda de alrededor del 17,5%.

El porcentaje de eólica que satisface la demanda 17,5% es menor respecto a la media Europea para el mismo año 2050 que es de un 22,9%, esto posiblemente sea debido a que Austria pese a ser un país tecnológicamente desarrollado, carece de salidas al mar, por lo que carece de energía eólica off-shore. Habitualmente la energía eólica off-shore ofrece mayores factores de capacidad, menores intermitencias y por tanto mayor porcentaje de eólica sobre la demanda total.

Bélgica:

"energía eólica generada (GWh)"[Belgium] : Current



"% energía eólica"[Belgium] : Current

Figura 56 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Bélgica.

La energía eólica generada en Bélgica en el año 2014 era de 4614 GWh para una potencia instalada de 1930 MW lo que suponía un factor de capacidad del 27,3%. Para el año 2050 VENSIM caracteriza una energía eólica generada alrededor de los 18000 GWh y un porcentaje de eólica satisfaciendo la demanda eléctrica del 17,9%.

El porcentaje de eólica 17,9% sigue siendo inferior a la media europea 22,9%, pero en comparación con Austria, Bélgica genera más energía eólica pese a tener mucha menos superficie, menos potencia instalada y más demanda energética (como consecuencia de la mayor población), la causa principal de que Bélgica genere más energía eólica que otros territorios similares es que dispone de una gran cantidad instalada de energía eólica off-shore.

Dinamarca:

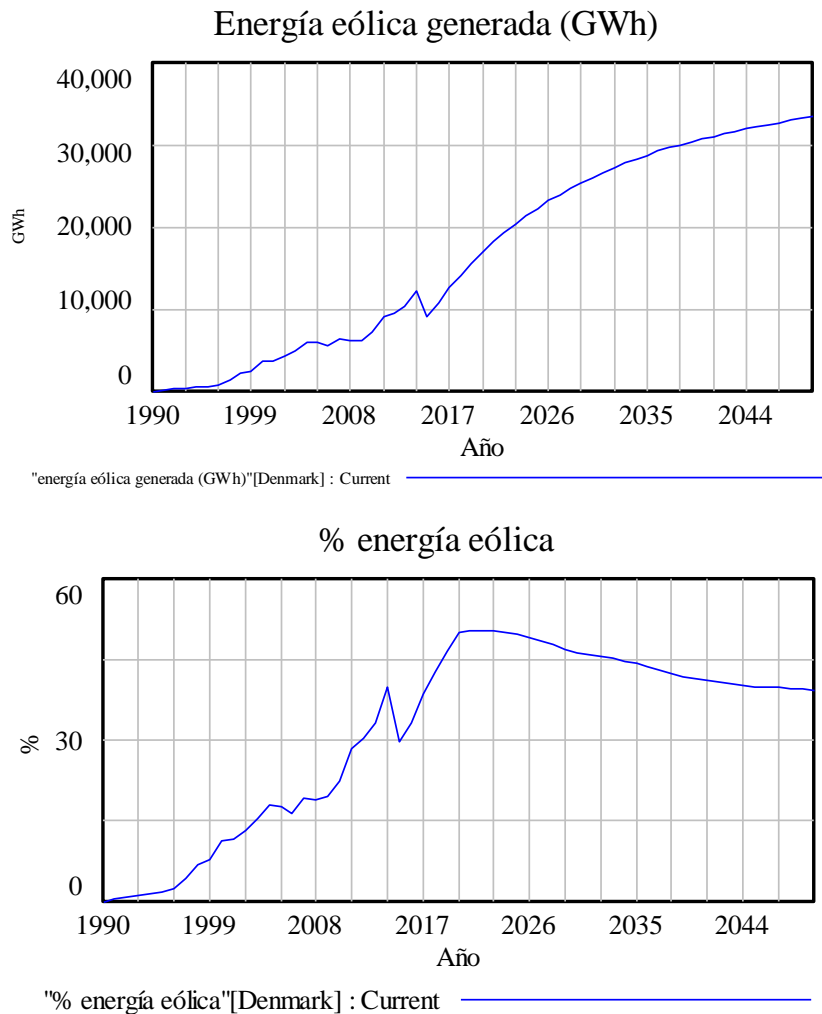
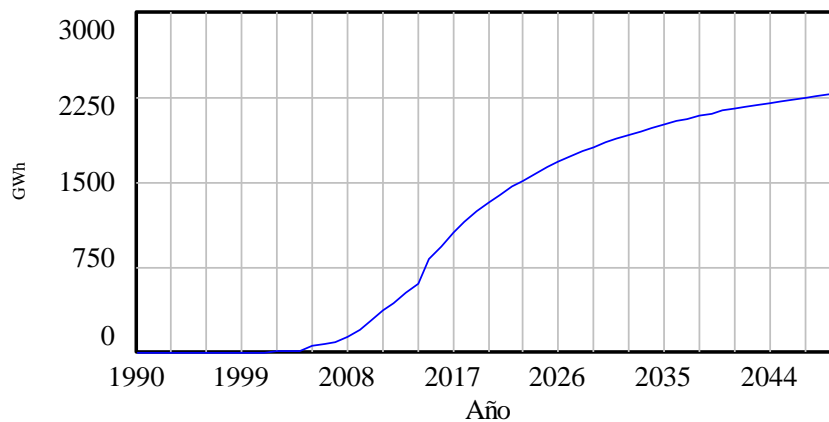


Figura 57 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Dinamarca.

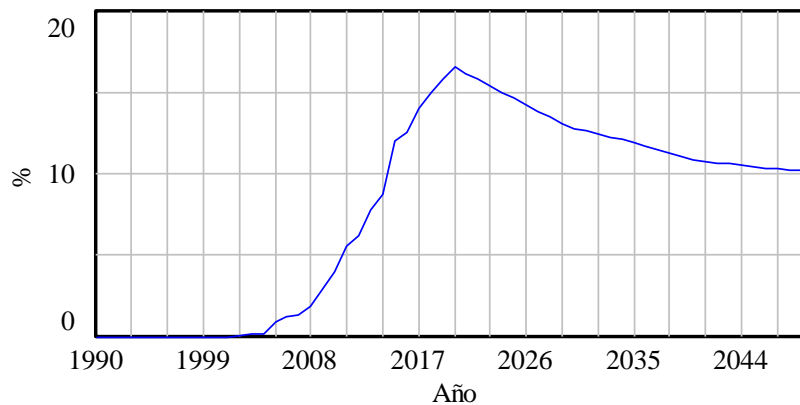
Dinamarca fue el primer país en desarrollar su tecnología eólica, pese a ser un territorio extensamente pequeño tiene gran superficie de costa y que además las profundidades de estas costas no varían hasta adentrarse varios metros sobre la superficie del mar, todas estas condiciones favorecen la instalación de energía eólica off-shore y permiten que Dinamarca sea el país con mayores porcentajes de energía eólica satisfaciendo la demanda eléctrica.

En torno al año 2020 VENSIM caracteriza un máximo de porcentaje de eólica que satisface la demanda eléctrica en torno a un 53%, a partir de ese año aunque la energía eólica generada es aún mayor, la demanda de energía eléctrica aumenta aún más rápidamente, aun así se mantienen buenos porcentajes en torno al 39,2% para el año 2050.

El factor de capacidad de Dinamarca históricamente (1990-2014) ha sido alto ($\approx 30\%$) como consecuencia de desarrollar la tecnología eólica pronto y de tener la mayor parte de la energía eólica instalada como eólica off-shore.

Estonia:**Energía eólica generada (GWh)**

"energía eólica generada (GWh)"[Estonia] : Current

% energía eólica

"% energía eólica"[Estonia] : Current

Figura 58 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Estonia.

Estonia es un país de apenas 1,5 millones de habitantes por lo que no se puede comparar su tecnología eólica con el de otros países europeos, hasta el año 1991 fue país de la URSS lo que se refleja aún en el alto consumo de gas ruso que es el recurso energético más utilizado en la actualidad. En el año 2014 la energía eólica generada era tan sólo de 604GWh (Eurostat, OECD library).

Aunque VENSIM caracteriza un incremento de la energía eólica generada, el porcentaje de eólica alcanza su valor máximo en el periodo 2015-2025, a partir de ahí la demanda de energía aumenta más rápidamente que lo que aumenta la energía eólica generada lo que supone que el porcentaje de eólica sólo alcanza el 10,5% para el año 2050.

Finlandia:

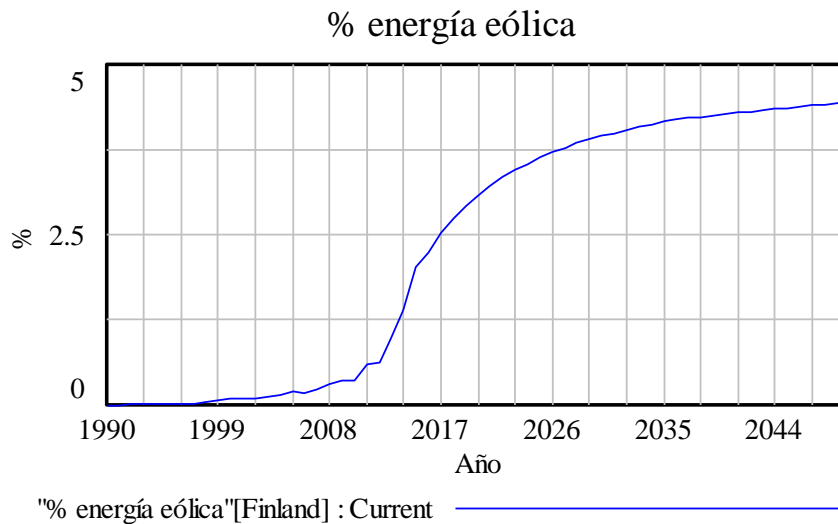
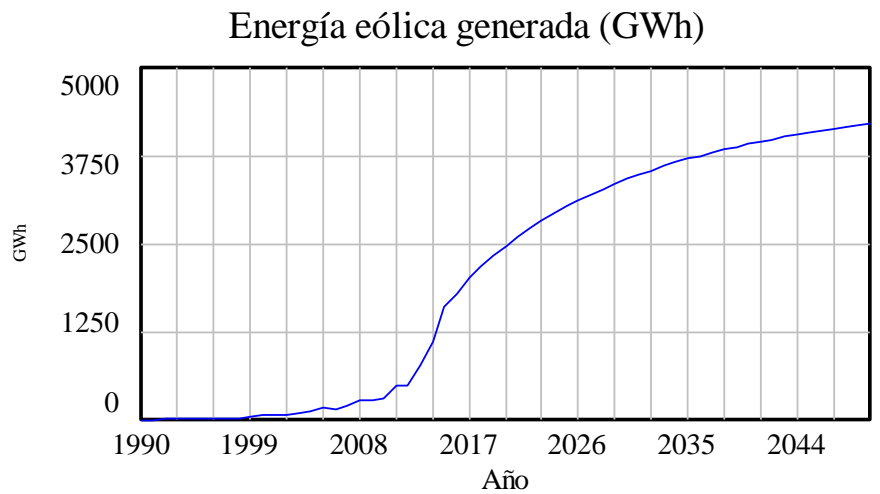


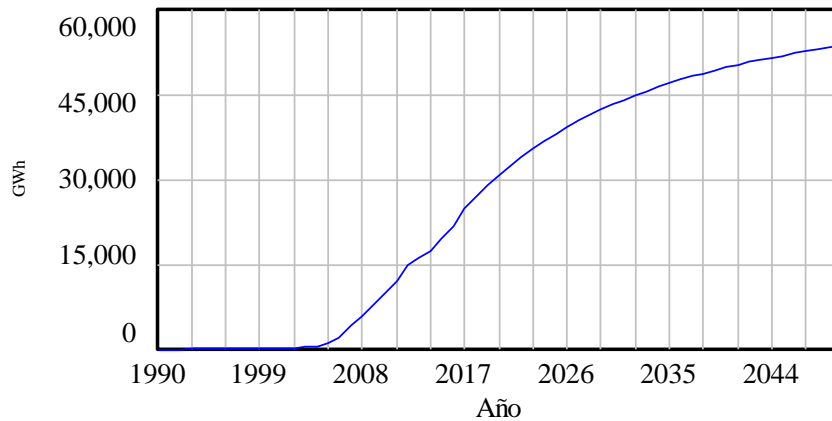
Figura 59 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Finlandia.

Finlandia pese a ser de los países con mayor superficie de Europa, carece de zonas dónde se puedan instalar parques eólicos, ya que el terreno es irregular y parte del mismo permanece helado una gran parte del año. Con estas condiciones Finlandia alcanzó los 1175 GWh de energía eólica generada en el año 2015.

Al mismo tiempo Finlandia es un país con gran demanda energética, fundamentalmente debida a las necesidades de calefacción, como la demanda de energía eléctrica es alta, la energía eólica no abastece más del 4% de la demanda eléctrica total en el año 2050.

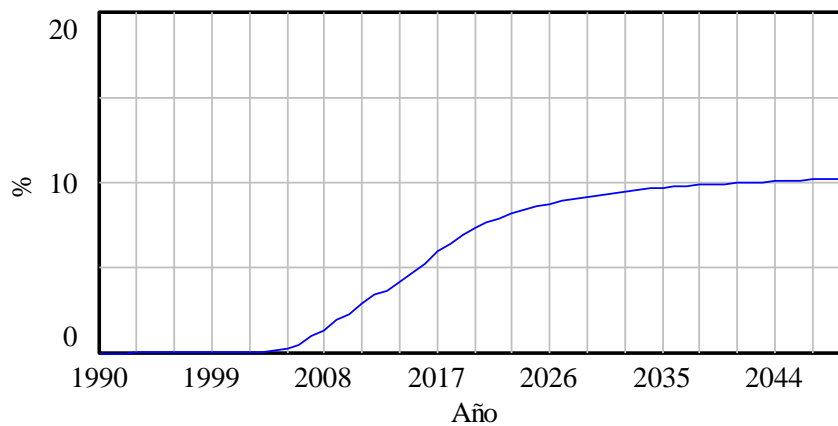
Francia:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[France] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[France] : Current

Figura 60 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Francia.

Francia presenta un desarrollo tardío de su tecnología eólica pese a ser el país europeo con mayor superficie disponible, esto es debido a que es un país con gran número de centrales nucleares y que ha hecho grandes esfuerzos para posicionarse también en cabeza de Europa en un futuro próximo en fisión nuclear.

En el año 2014 la cantidad de energía eólica generada era de 17249GWh, que junto con la gran demanda de energía eléctrica de este país, el porcentaje de eólica que cubre la demanda no excede del 11% en el periodo 2015-2050. Para el año 2050 se prevee una cantidad de eólica generada de 54500GWh.

Alemania:

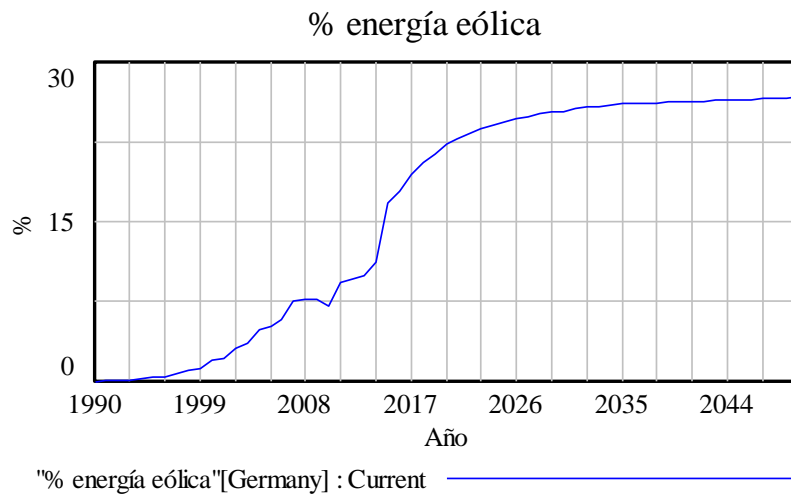
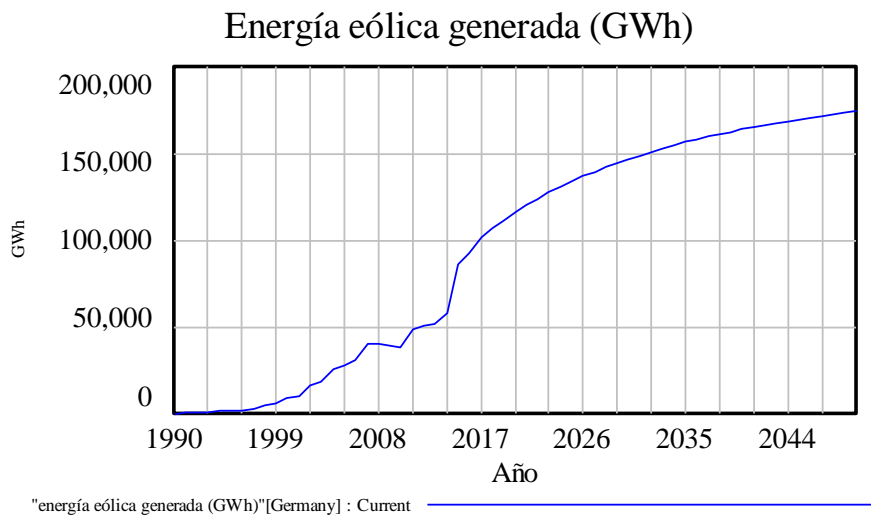


Figura 61 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Alemania.

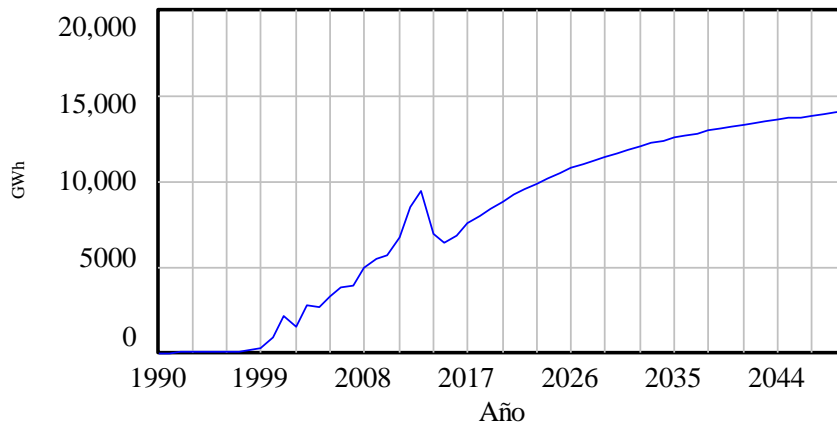
Alemania es el país que representa más fielmente lo que ocurre en el modelo global para la UE, esto es debido principalmente a que el 30,4% de la energía eólica instalada en Europa se encuentra en Alemania en el año 2014 y el 24,5% de la energía eólica instalada en Europa en el año 2050.

Alemania es el país que más energía eólica genera en el periodo 1990-2050, salvo el periodo 1990-1994 dónde Dinamarca tenía la tecnología eólica más desarrollada.

Por otra parte, en las gráficas se puede observar como Alemania alcanza su cenit particular en lo que se refiere al porcentaje de eólica en torno al 22,5%, circunstancia probablemente debida a que las nuevas instalaciones de eólica ya no tienen factores de capacidad tan altos como las antiguas, por eso aunque se genera más energía eólica no aumenta el porcentaje de eólica sobre el total de la demanda.

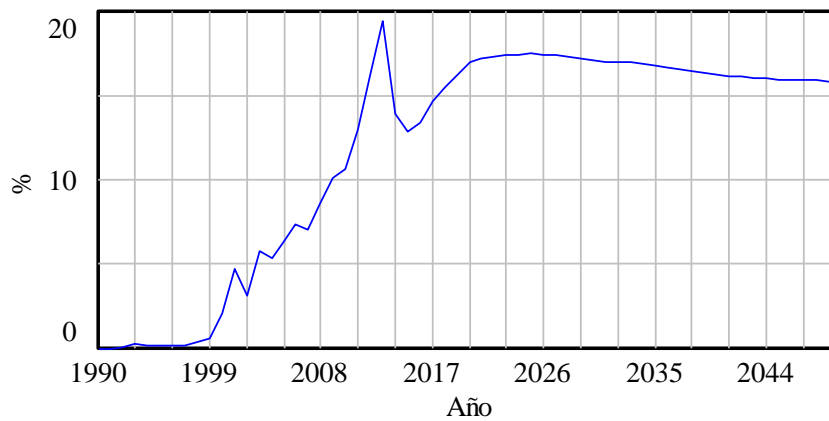
Grecia:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Greece] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Greece] : Current

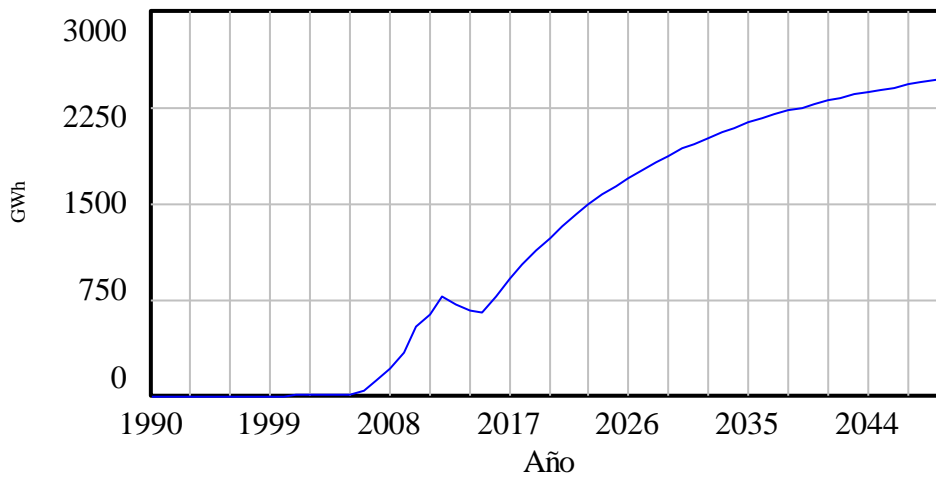
Figura 62 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Grecia.

Las gráficas recogen una subida de la energía eólica generada en Grecia hasta al año 2010, año en que debido a la deuda soberana griega, 14 países Europeos tuvieron que acudir por primera vez al rescate de sus bancos en abril de 2010. A cambio del dinero prestado los sucesivos gobiernos helenos han tenido que realizar recortes (entre otras cosas) en materia de innovación energética para hacer frente al pago de la deuda.

El modelo planteado recoge esta información y añade como la tendencia en el periodo 2015-2050 tampoco es buena, la energía eólica generada se queda por debajo de los 15000GWh, valores por debajo de otros países con mucha menor superficie para instalar potencia eólica como Austria, Bélgica, Holanda o Dinamarca.

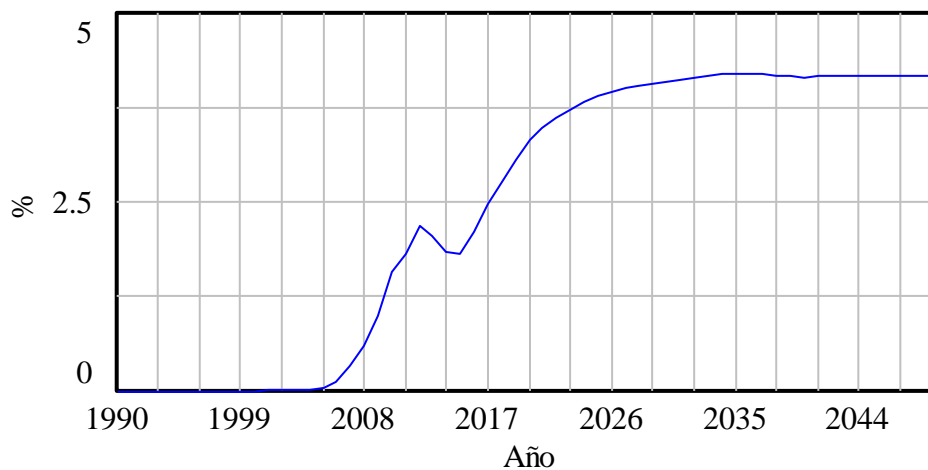
Hungría:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Hungary] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Hungary] : Current

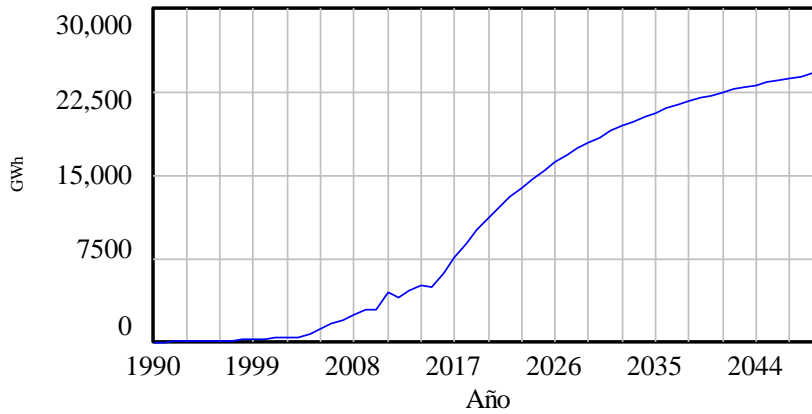
Figura 63 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Hungría.

Hungría al igual que otros países de la Europa del este es un país en general con poca implantación de energías renovables, su principal recurso energético tradicionalmente ha sido el gas ruso. Esta idea unida a que su geografía es irregular, y que es un país de interior sin salidas al mar, han complicado la instalación de parques eólicos On-shore y Off-shore respectivamente.

La energía eólica generada en Hungría en el año 2014 fue de tan sólo 657 GWh, las previsiones del modelo tampoco parecen apartarse de esta tendencia, para el 2050 se espera que no se generen más de 2125GWh y los porcentajes de eólica se mantienen por debajo del 5%.

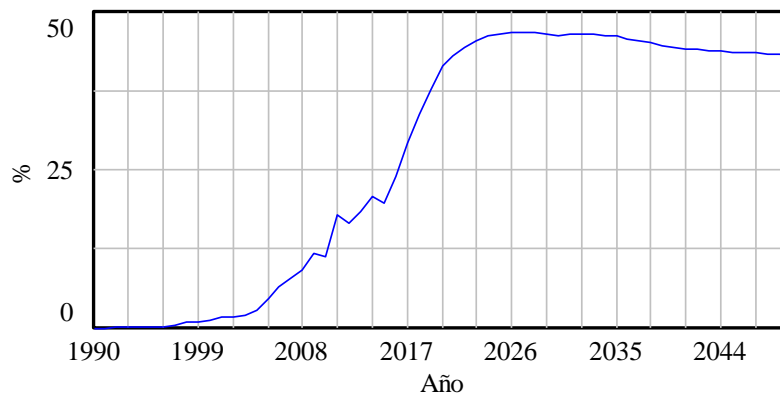
Irlanda:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Ireland] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Ireland] : Current

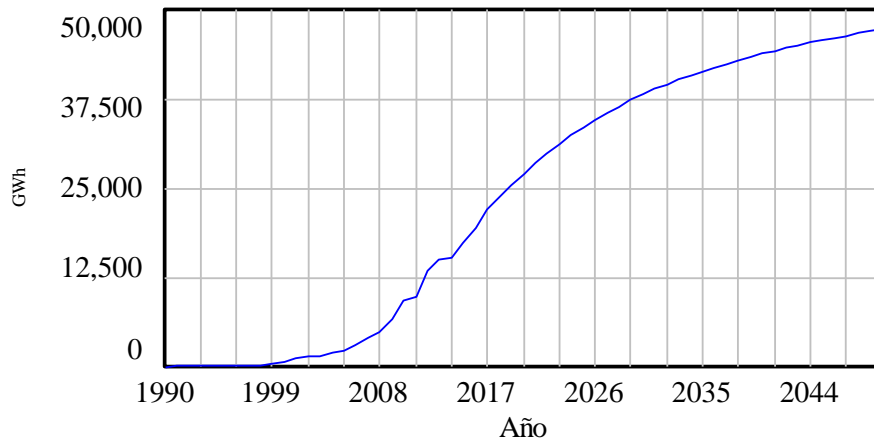
Figura 64 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Irlanda.

Irlanda es tras Dinamarca la segunda potencia en energía eólica off-shore, de hecho casi el 80% de la energía eólica producida en este país en el año 2014 (5140GWh) era off-Shore.

Por otra parte debido a que la demanda de energía eléctrica no es muy alta en este país debido a la población (4,1millones) y a la escasez de industria, se alcanzan altos porcentajes de energía eólica satisfaciendo la demanda energética alrededor del 42% para el año 2050.

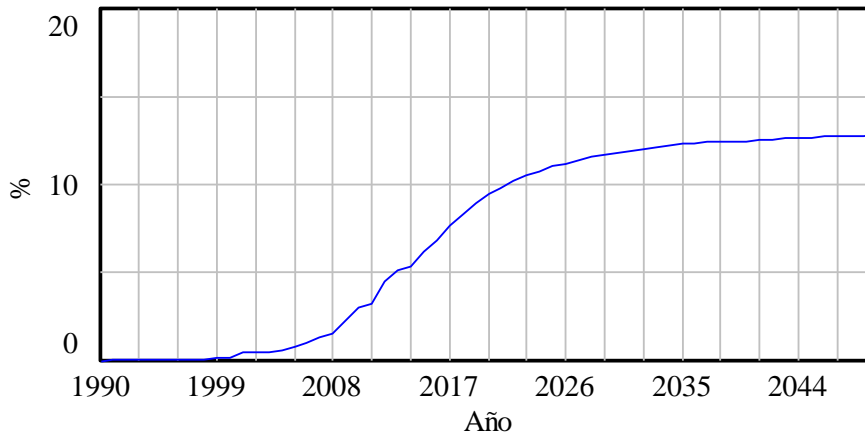
Italia:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Italy] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Italy] : Current

Figura 65 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Italia.

Durante el periodo 1990-2005 Italia era considerada por la IEA (International Energy Agency) como el país del mundo con mayor dependencia energética del exterior, de ahí que los gobiernos del país de estos hayan optado por facilitar la inversión de los productores de energías renovables principalmente energía fotovoltaica y eólica.

A pesar de ello la gran apuesta por las energías renovables en Italia ha sido la energía fotovoltaica, lo que ha limitado el crecimiento de la eólica. La cantidad de energía eólica generada en Italia en el año 2014 era de 15178GWh, los porcentajes que cubren la demanda se mantienen bajos entre el 11,5 y el 12,5% en el periodo 2026-2050, la cantidad de energía eólica generada alcanza los 49255GWh en el año 2050.

Luxemburgo:

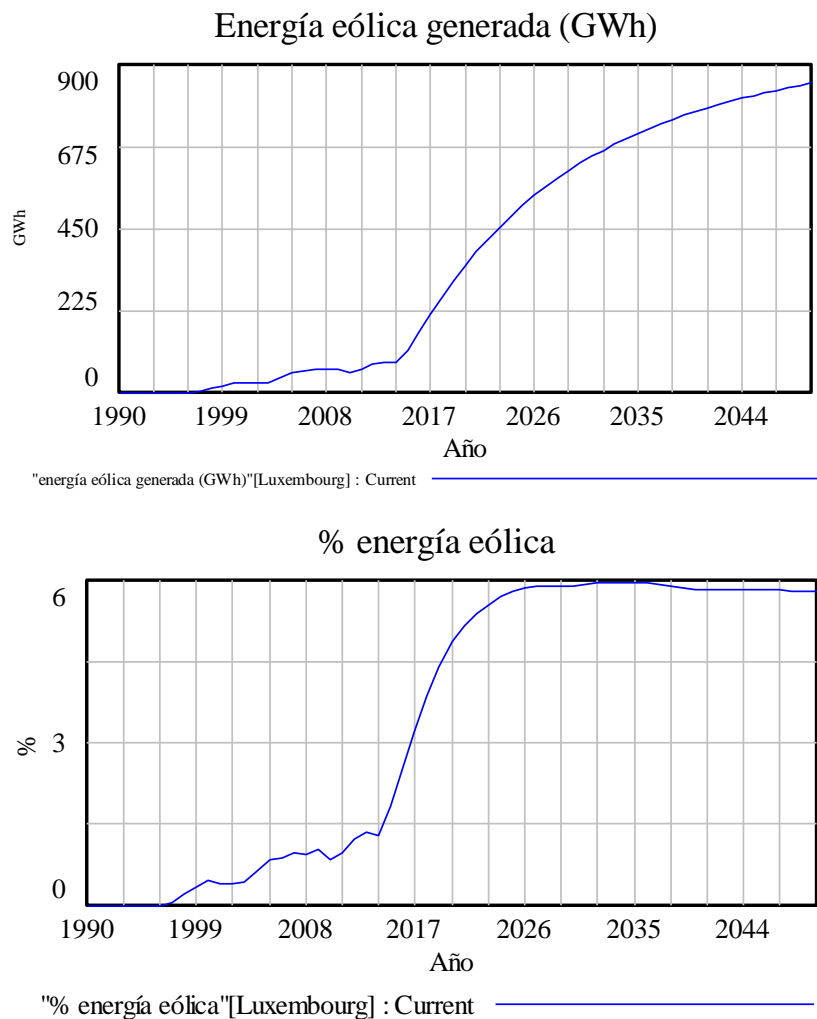


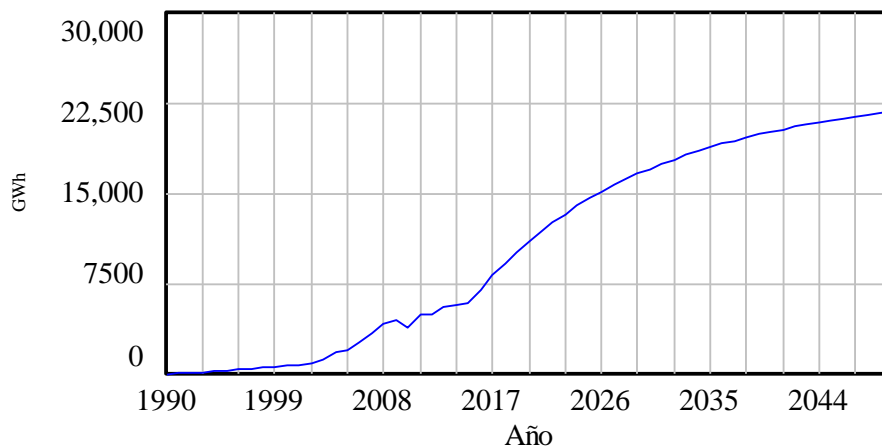
Figura 66 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Luxemburgo.

Luxemburgo con apenas 600000 ciudadanos residentes, es el país más pequeño de los 20 países que comprende el modelo en VEMSIM, la energía eólica generada en el año 2014 tan solo era de 80GWh anuales, el modelo VENSIM caracteriza para el año 2050 porcentajes de energía eólica por debajo del 6% y de menos de 600GWh de energía generada procedente del viento.

Esta escasez de energía eólica generada es probablemente debida que Luxemburgo es el país de la unión con mayor renta per cápita, es decir sus ciudadanos pueden permitirse comprar la energía más cara o procedente de fuentes de energía más caras pero menos intermitentes, como el gas o el petróleo. Por otra parte su economía está basada en la banca y en las finanzas, por lo que no hay un tejido industrial que requiera de grandes cantidades de energía.

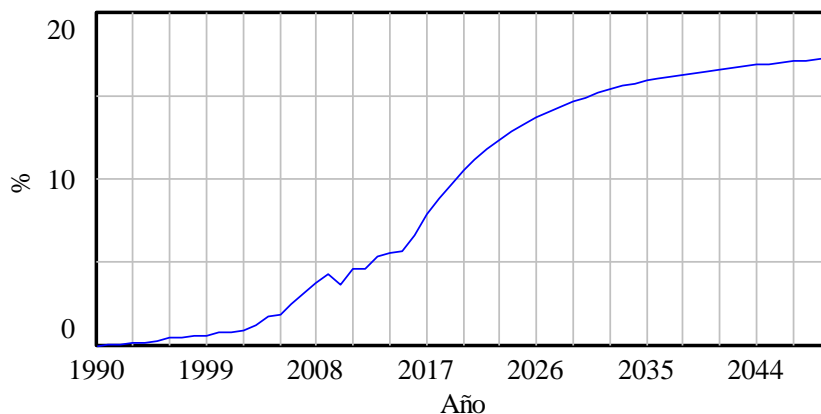
Holanda:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Netherlands] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Netherlands] : Current

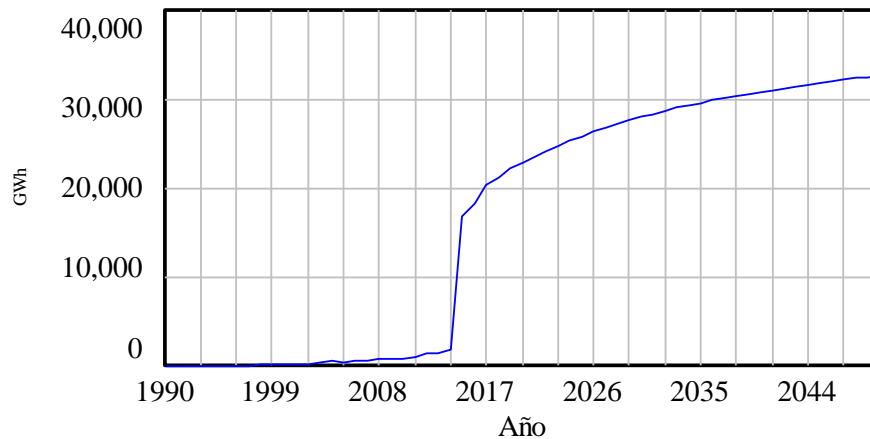
Figura 67 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Holanda.

Holanda fue junto con Dinamarca fue de los primeros países en desarrollar la tecnología eólica, principalmente la off-shore, la energía eólica generada en el año 2014 fue de 5797GWh.

El segundo tramo de crecimiento pronosticado para el periodo 2015-2050, el modelo lo caracteriza como un crecimiento más lento, debido a que Holanda es un país con poca superficie, y los terrenos disponibles para la instalación de energía eólica empiezan a escasear, las instalaciones nuevas tienen menores rendimientos que las existentes ya que las zonas con mejores condiciones atmosféricas ya están explotadas.

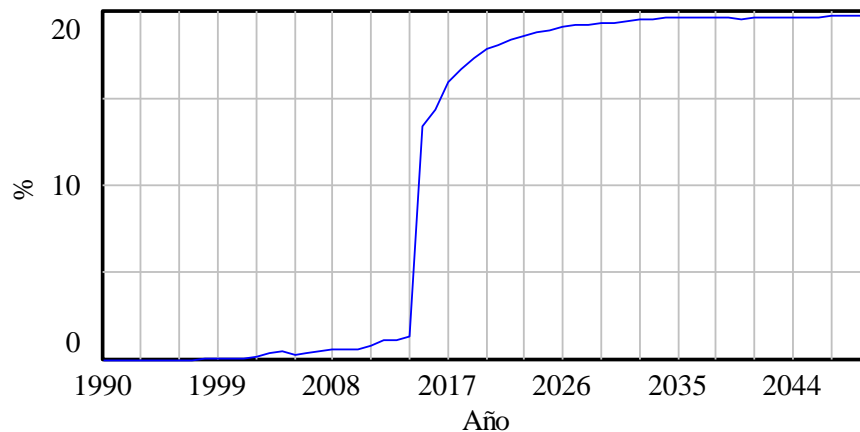
Polonia:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Poland] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Poland] : Current

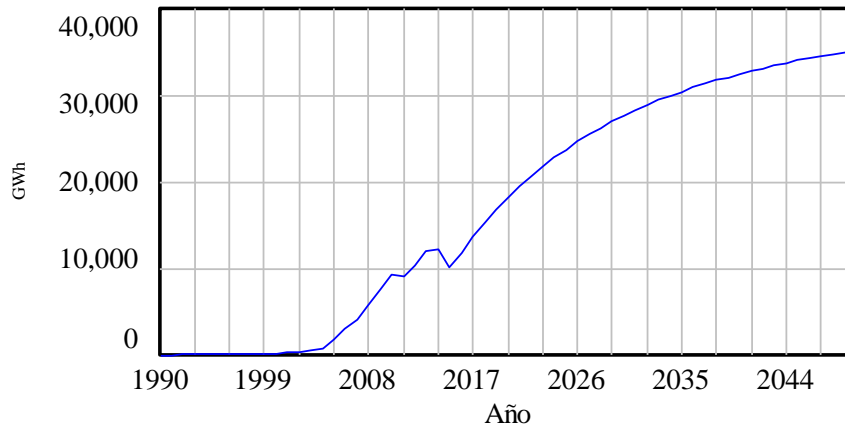
Figura 68 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Polonia.

Polonia paradójicamente es el país que más ha aumentado la potencia eólica instalada en el periodo 2008-2014, doblando su capacidad, años en los que otros países de la unión no aumentaban su capacidad eólica como consecuencia de la desaceleración económica mundial. Polonia en este tiempo cuadruplicó prácticamente sus instalaciones pasando de generar 709GWh en 2008 a 3836GWh en el 2014.

La tendencia en el modelo sigue siendo buena en el periodo 2015-2050 alcanzándose los 35500GWh en el año 2050 y un porcentaje de eólica cercano al 20%.

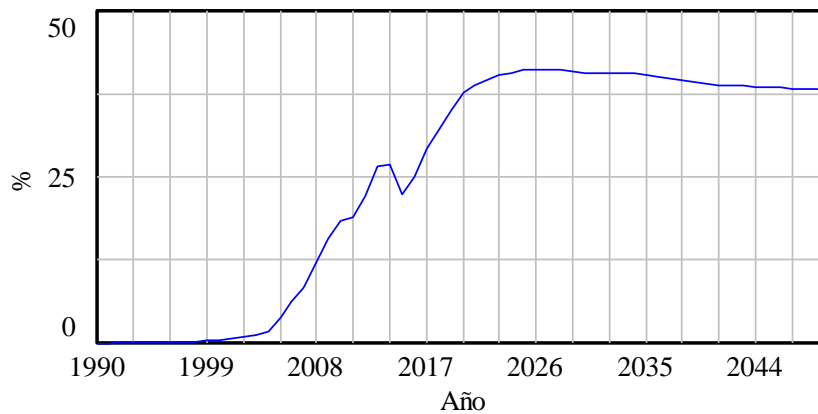
Portugal:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Portugal] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Portugal] : Current

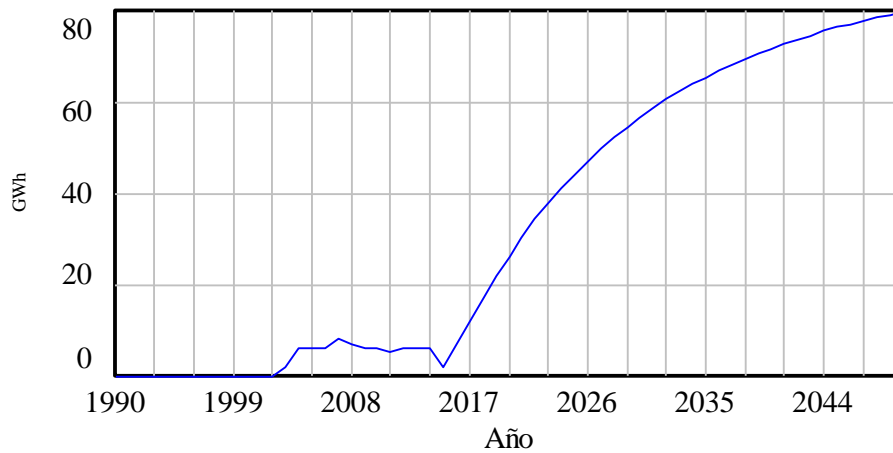
Figura 69 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Portugal.

Portugal es quizás el país dónde mayor apogeo de renovables se está llevando a cabo en los últimos años. De hecho entre el 7 de Mayo y el 11 de Mayo de 2016 se alcanzó un hito energético histórico sin precedentes hasta la fecha, que fue el de abastecer la demanda eléctrica con tan sólo energías renovables (principalmente eólica, solar, biomasa e hidráulica).

En el año 2014 se generaron 12111GWh de energía eólica en Portugal con un factor de capacidad del 28,4% (de los más altos de Europa). Esto es debido a que casi el 65% de la energía eólica instalada en Portugal es off-shore que generalmente tiene un mayor factor de capacidad.

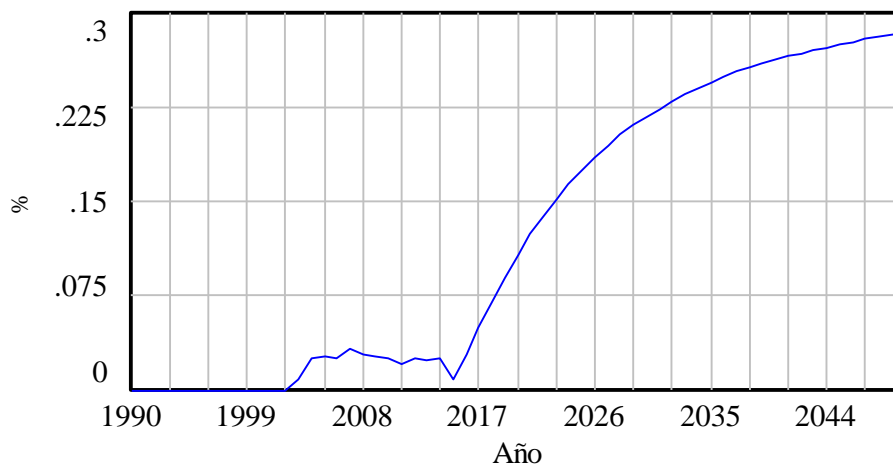
Eslovaquia:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Slovak Republic] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Slovak Republic] : Current

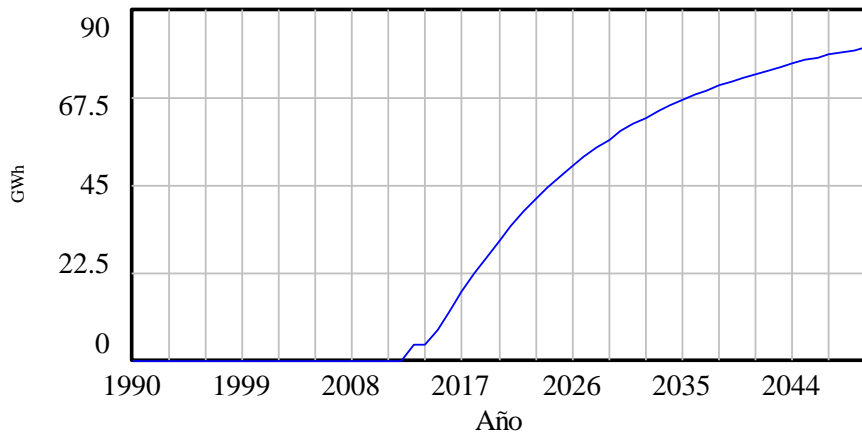
Figura 70 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Eslovaquia.

Eslovaquia al igual que otros países situados en la Europa del Este como Hungría o Estonia, tiene una tradición histórica de energía eólica menos arraigada que otros países de centro de Europa, la energía eólica generada en el año 2014 tan sólo fue de 6GWh, el país de los estudiados en el modelo que menos energía eólica genera junto con Eslovenia.

Pese a tener una geografía montañosa e irregular y carecer de salidas al mar, se puede producir un ligero aumento de la energía eólica generada, el modelo caracteriza este aumento como 90GWh para el año 2050.

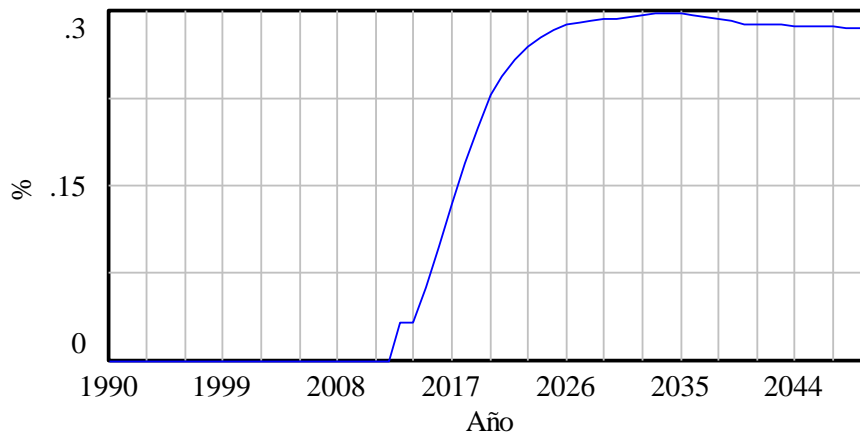
Eslovenia:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Slovenia] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Slovenia] : Current

Figura 71 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Eslovenia.

Eslovenia es el único país de los 20 estudiados situado en los Balcanes y procedente de la antigua Yugoslavia, además ha sido de los últimos países en unirse a la unión europea, por lo que su crecimiento eólico en el periodo 1990-2014 ha sido distinto al del resto de países europeos.

La energía eólica generada en el año 2014 fue de tan sólo 4GWh, como se puede comprobar su historia eólica no se puede comparar con ningún otro país del modelo salvo con Eslovaquia. Tras el ingreso en la unión se espera que se produzca un aumento de la capacidad eólica instalada en el periodo 2015-2050.

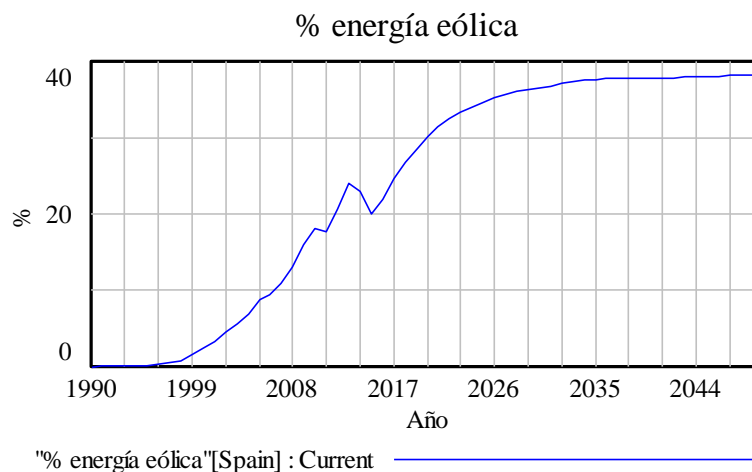
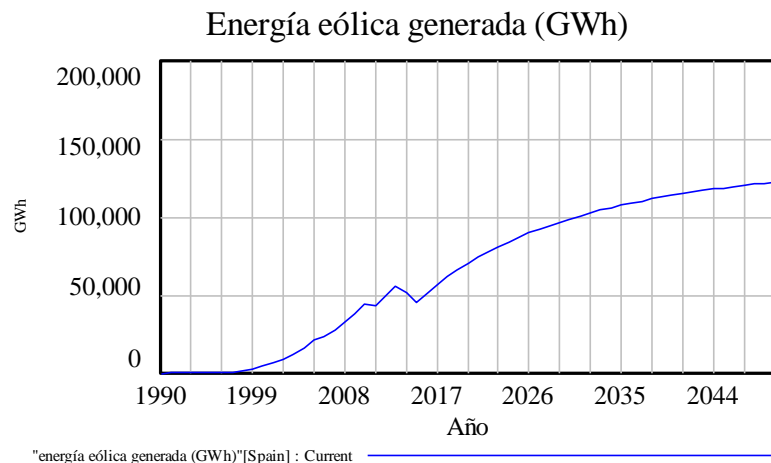
España:

Figura 72 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. España.

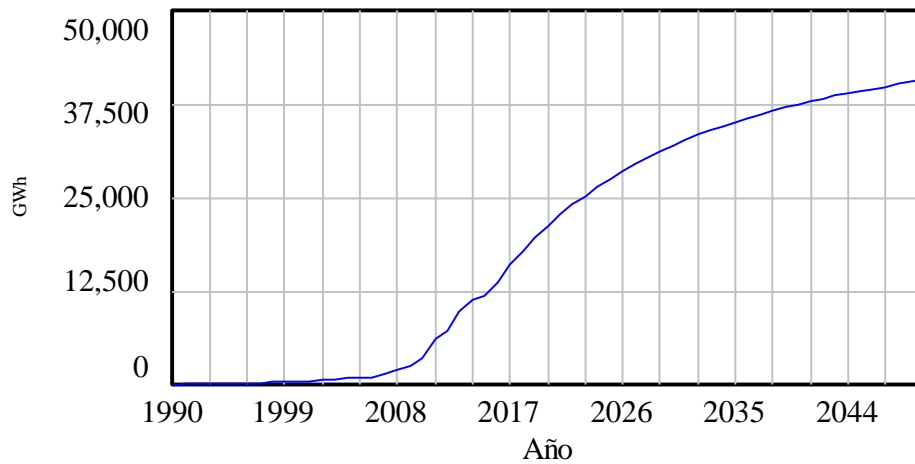
España es después de Alemania la segunda potencia Europea en cuanto a potencia eólica se refiere. En las gráficas de pueden observar cómo en el año 2014 la energía eólica generada era de 52013GWh, las estimaciones del modelo son para el año 2050 una energía eólica generada alrededor de los 130000GWh.

España es tras Francia el segundo país con mayor superficie de Europa, además la generación de energía eólica generada crecería aún más exponencialmente si se instalaran más instalaciones off-shore. España en la actualidad carece de parques eólicos off-shore pese a ser el país europeo con más km de costa.

Desde las épocas en las que se utilizaba el viento para moler el grano en los molino de viento, España ha sido un país que ha utilizado los recursos de esta fuente, de hecho las principales constructoras mundiales de parques eólicos son españolas Iberdrola, Gamesa, Acciona...

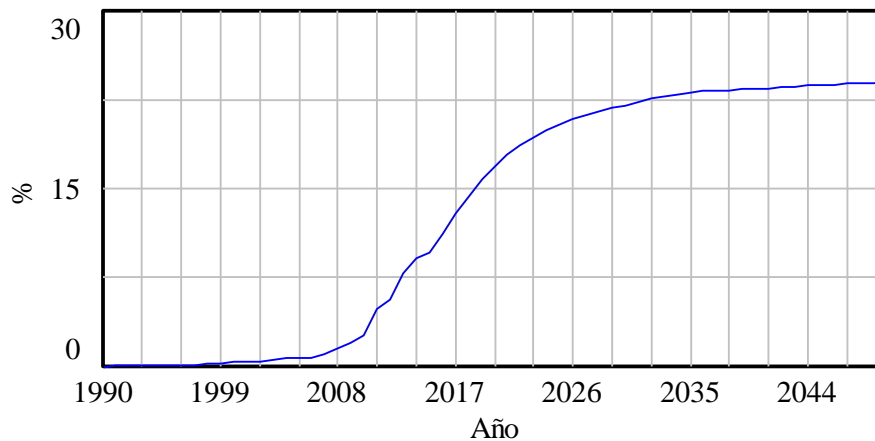
Suecia:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[Sweden] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[Sweden] : Current

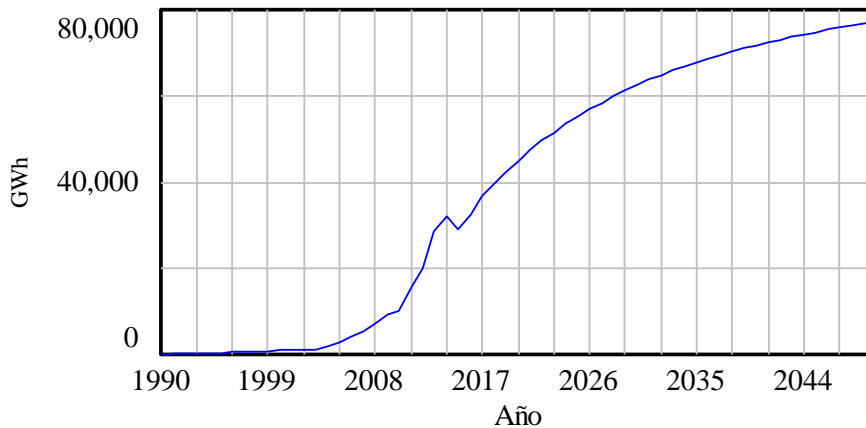
Figura 73 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Suecia.

Suecia es uno de los países europeos con mayor superficie y además cuenta con gran superficie de costa aprovechable para la instalación de energía eólica off-shore, desde el año 2008 Suecia ha realizado intentos de imitar el modelo Danés de basar su principal fuente de energía en la eólica O-shore.

La energía eólica generada en Suecia en el año 2014 fue de 11234GWh, las estimaciones del modelo para el año 2050 son de alcanzar los 39000GWh, objetivo alcanzable en gran medida por la energía eólica Off-shore.

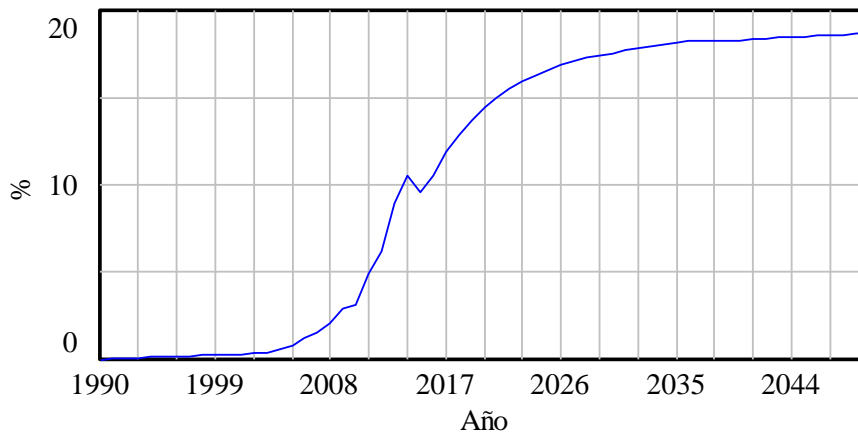
Reino Unido:

Energía eólica generada (GWh)



"energía eólica generada (GWh)"[UK] : Current

% energía eólica



"% energía eólica"[UK] : Current

Figura 74 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Reino Unido.

El Reino Unido históricamente es el tercer país que más energía eólica genera de Europa en gran parte debido a la energía eólica off-shore (63% del total de la energía eólica producida en UK). La energía eólica generada en el año 2014 era de 32015GWh satisfaciendo el 18,75 de la energía eléctrica demandada.

Tras el referéndum de permanencia en la Unión de Junio de 2016 (BREXIT) el 51,9% de los ciudadanos británicos optó por la secesión, por lo que a partir de ahora las políticas energéticas británicas son una incógnita, seguramente con objetivos distintos a los planteados en la Europa roadmap 2050 y en los acuerdos sobre el clima de París de Diciembre de 2015.

Comparación entre países:

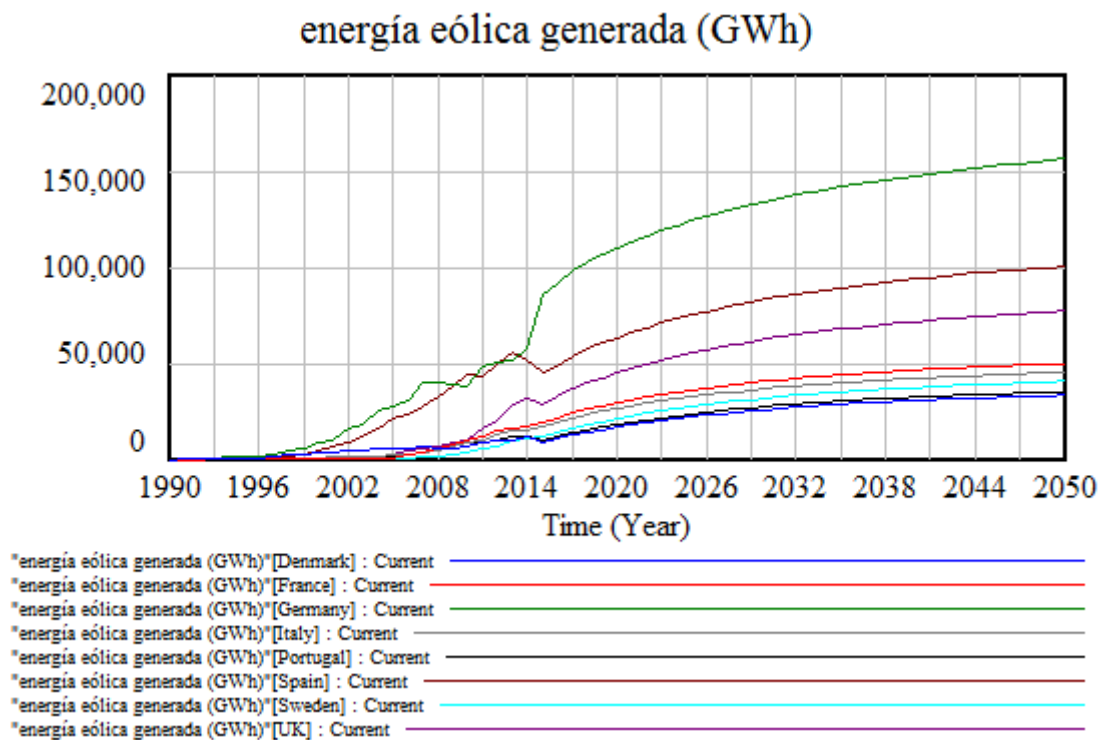


Figura 75 Países europeos con mayor energía eólica. Periodo 1990-2050

En la gráfica (figura 75) se observan los ocho países europeos que más energía eólica generan a lo largo del periodo 1990-2050. En país con mayor generación de energía eólica es Alemania (línea verde), seguido de España (línea marrón) y Reino Unido (línea morada).

De las gráficas entre países se puede obtener las siguientes interpretaciones de resultados:

- 6) Los países con energía eólica Off-shore, generalmente tiene una energía eólica menos intermitente, lo que les brinda mayores factores de capacidad y por tanto el % de energía eólica que cubre la demanda eléctrica es también mayor. En esta lista el país más destacable es Dinamarca, seguido por Irlanda, Reino Unido, Portugal.
- 7) Los países de la Europa del Este, tienen menor infraestructura eólica, la energía eólica generada durante el periodo 1990-2014 ha sido significativamente menor que otros países del resto de Europa. En esta lista aparecen países como Eslovaquia, Estonia o también países europeos que no se han incluido en el modelo como Lituania, Letonia, Republica Checa.

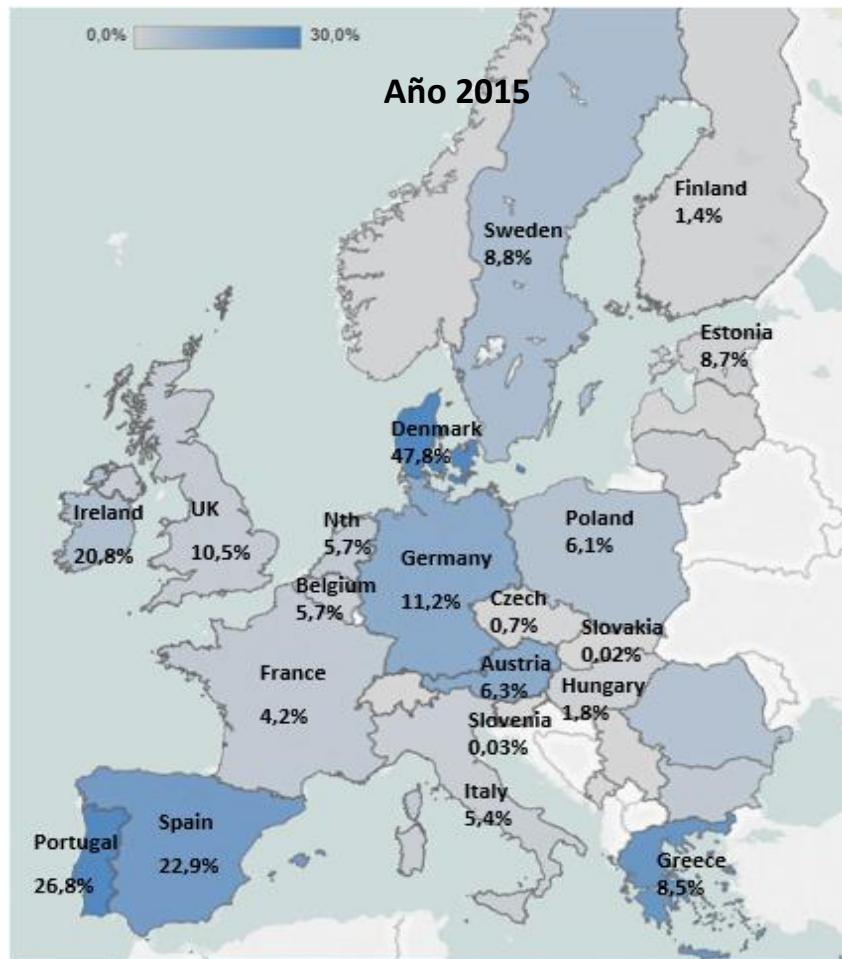


Figura 76 % de energía eólica que cubre la demanda de energía eléctrica. Año 2015

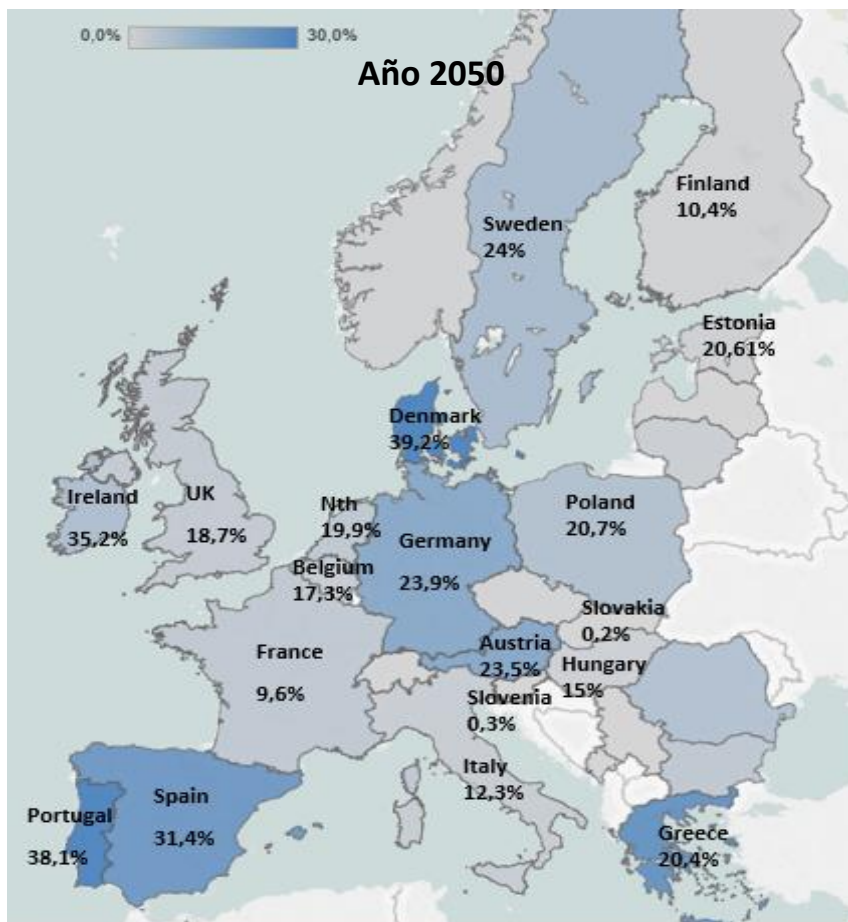


Figura 77 % de energía eólica que cubre la demanda de energía eléctrica. Año 2050

Por último, para finalizar el presente trabajo, en (Figuras 76,77) se establece una comparativa entre el porcentaje de eólica que satisface la demanda de energía eléctrica en el año 2015 y en el año 2050.

El año 2015, recordamos es el año cuando se dejan de tener datos históricos, por tanto estos porcentajes que aparecen sobre el mapa europeo de Figura 76, están basados en datos recopilados por instituciones de validez OECD, Eurostat, EWEA como ya se ha explicado a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Sobre este mapa, Figura 76, se puede comprobar como los países con mayor porcentaje de energía eólica que abastece la demanda de energía eléctrica, son Dinamarca (47,8%), Portugal (26,8%) y España (22,9%)

Por otro lado, el año 2050, es el año dónde finaliza el modelo desarrollado para este trabajo elaborado en Vensim, los resultados obtenidos están basados en hipótesis que caracterizan la dinámica del sistema.

En Figura 77, el porcentaje de eólica satisfaciendo la demanda eléctrica tiende a homogenizarse entre distintos países europeos, gran parte de los países de centro Europa alcanzan porcentajes en torno al 20%. Los países con mayores porcentajes siguen siendo Dinamarca (39,2%), Portugal (38,1%), España (31,4%), además aparece Irlanda con (35,2%) y Suecia (24%).



Capítulo 8

Bibliografía

8. Bibliografía

- [1] General Secretariat of the European Council, «2030 Climate and energy policy framework. Conclusions,» <http://www.consilium.europa.eu>, Bussels, October 2014.
- [2] X. Ruiz, «El papel de la UE en las negociaciones sobre el cambio climático,» *UNISCI, Universidad Complutense de Madrid*, nº 39, p. 22, Octubre 2015.
- [3] European Climate Foundation, ECF «Practical Guide for a Properous Low-Carbon Europe,» Brussels 2010.
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Renewable Energy Technology: Cost Analysis Series,» Brussels, June 2012.
- [5] EEA European Environment Agency, «Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 An indicator-based report,» *ISSN 1725-9177*, Copenhagen 2012.
- [6] European Commission, «Quarterly Report On European Gas Markets,» Market Observatory for Energy, Commission européenne, B-1049 Bruxelles , 2015.
- [7] Martín García Juan, *Teoría y Ejercicios de Dinámica de sistemas*, Barcelona, 2014.
- [8] J. D. Sterman, *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex Worl*, Massachusetts Institute of Technology (MIT): McGrawHill, 2001 Massachusetts.
- [9] A. Ford, *Modeling the Environment*, Washington DC: Island Press, 2000.
- [10] J. Aracil, *Dinámica de sistemas*, Madrid: Isdefe, 1998.
- [11] Carlos De Castro, Margarita Mediavilla, Luis Javier Miguel, Fernando Frechoso, «Global wind power potential: Physical and technological limits,» *ELSEVIER*, pp. 6677-6682, November 2010.

- [12] Greenpeace, «Global Wind Energy Outlook,» GWEC Greenpeace International, 2008.
- [13] Sebastian Schafhirt*, Ana Page, Gudmund Reidar Eiksund, Michael Muskulus, «Influence of Soil Parameters on the Fatigue Lifetime of Offshore,» *Elsevier*, vol. 94, pp. 347-356, January 2016.
- [14] Francesco Balduzzi, «Darrieus wind turbine blade unsteady aerodynamics: a three-dimensional Navier-Stokes CFD assessment,» *Elsevier*, vol. 128, pp. 550-563, 2017.
- [15] Daniel Chan, John Mo, «Life cycle reliability and maintenance analyses of wind turbines,» *1st International Conference on Energy and Power, ICEP2016, 14-16 December 2016, RMIT Energy Procedia Elsevier*, vol. 110, pp. 328-333, 2017.
- [16] G. Nikitasa, L. Aranyb, S. Aingarana, JegaNathan Vimalanc, S. Bhattacharyaa, «Predicting long term performance of offshore wind turbines using cyclic,» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Elsevier*, vol. 92, p. 678.683, 2017.
- [17] George Caralis, Kostas Rados, «On the effect of spatial dispersion of wind power plants on the wind energy capacity credit in Greece,» *Environmental Research Letters*, nº 3, 2008 3 Department of Pollution Control Technologies, Technological Educational Institute of West Macedonia, Greece.
- [18] EUROPEAN COMMISSION Directorate-General for Energy, «EU Reference Scenario 2016 Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050,» ENER-REFERENCE2015@ec.europa.eu, Brussels.
- [19] Union of the Electricity Industry - EURELECTRIC, «Electricity's Contribution To sustainable Energy Use,» www.eurelectric.org, Brussels.
- [20] Directorate-Generale for Mobility and Transport by the E3M-lab of the Institute of Communication and Computer Systems at the National Technical University of Athens (ICCS-NTUA), «EU Energy Transport and GHG Emissions Trends To 2050,» Athens, Greece, December 2013.
- [21] N. Boccard, «Capacity factor of wind power realized values vs. estimates,» *ELSEVIER*, Vols. %1 de %2Departament d'Economia, Universitat de Girona, Girona, Spain, nº 37, p. 2679–2688, 2009.
- [22] White S., «Net energy pay back and co2 emissions from three mid western,» *Natural*

Resources Research, vol. 15, n° 4, pp. 271-281, 2006.

- [23] European Wind Energy Association (EWEA), «Wind Energy Scenarios for 2030,» Brussels, August 2015.
- [24] Joseph Wheatley, «Quantifying CO2 savings from wind power,» *ELSEVIER*, vol. 63, pp. 89-96, Diciembre 2013.
- [25] F. Gutiérrez-Martín, R.A. Da Silva-Álvarez , «Effects of wind intermittency on reduction of CO2 emissions: The case of the Spanish power system,» *Elsevier*, vol. 61, pp. 108-117, 2013.
- [26] T. Piketty, «Carbone et inégalité: de Kyoto à Paris, Evolution de l'inégalité mondiale des émissions de CO2 (1998-2013) et perspectives pour un financement équitable de l'adaptation,» *Paris School of Economics*, vol. 1, pp. 5-28, 2013.
- [27] B. C. F. Nikiforos-Georgios Zacharof, «Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions,» *Elsevier Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 60, pp. 97-131, May 2017.
- [28] EWEA European Wind Energy Association, «Saving water with wind energy,» Brussels, June 2014.
- [29] European Environment Agency, «Towards efficient use of water resources in Europe,» EEA Report, No 1/2012 <http://www.eea.europa.eu/publications/towards-efficient-use-of-water>, Copenhagen, 2012.
- [30] D. & B. G. Vanham, «A review on the indicator water footprint for the EU28,» European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Italy, 2013.
- [31] Consumer Council for Water, «“Metering How much water does an average person/ household use?,» <http://www.ccwater.org.uk/server>, 2013.
- [32] European Wind Energy Association EWEA, «The Economics of wind energy,» March 2009.
- [33] International Energy Agency (IEA/OECD), «Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios and Strategies to 2050,» Paris, 2009.



- [34] Global Wind Energy Council (GWEC) and Greenpeace, «Global Wind Energy Outlook 2010,» Brussels, 2010.
- [35] Roger Bentley, «Explaining the price of oil 1971–2014 : The need to use reliable data on oil discovery and to account for ‘mid-point’ peak,» *Science Direct*, vol. 86, pp. 880-890, November 2015.
- [36] L. J., «Oil and gas. What future?,» *Science Direct*, Vols. %1 de %2Presented at the Groningen annual Energy Convention, Groningen, Netherlands , 2006.
- [37] C. Skrebowski, «The Oil Crunch: a wake-up call for the UK economy,» *Science Direct*, vol. UK Industry Taskforce on Peak Oil & Energy Security (ITPOES) , 2010.
- [38] EWG, «Fossil and nuclear fuels – the supply outlook (No. 2013/03/18 LBST),» *Science Direct Energy Watch Group* , 2013.
- [39] K. Aleklett, «The peak of the oil age – analyzing the world oil production reference scenario in World Energy Outlook 2008,» *Science Direct*, Vols. %1 de %2Energy Policy, 38, p. 1398–1414, 2010.
- [40] G. Maggio, «When will oil, natural gas, and coal peak?,» *Science Direct*, vol. 98, pp. 111-122, 2012.
- [41] J. Laherrère, «Peak oil y Seguridad Energética,» *Science Direct*, Presented at the Segundo Simposio ASPO Argentina Buenos Aires, Buenos Aires (Argentina) , 2010.
- [42] Mohr SH, «Fossil fuel future production, world and Australia focus.,» *Science Direct Presented at the Australian Frontiers of Science 2012: Science for a green economy*, Sidney 2012.
- [43] Jacobsen M., «100% Clean and Renewable Energy Winnd, Water and Sunlight for 139 countries All-Sectors Roadmap: Stanford 2017.

<i>Figura 1 Instituciones y empresas colaboradoras con el estudio energético elaborado para la Europa Roadmap 2050 [3].....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2 Red de intercambio de energía europeo modelado por la Europa Roadmap 2050 [3].....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 Tabla de costes de distintas fuentes de generación de energía eléctrica [4].....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 % de reducción de emisión de CO2 desglosado por sector para el año 2050 [3].....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5 Aumento registrado de la temperatura media del planeta en el periodo 1850-2000 [5].....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 Impactos predecibles del cambio climático para cada zona de Europa [5]</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 Lliteratura sobre el "peak-oil" [36], [37], [38], [39], [40], WEO World Energy Outlool 2012..</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8 Precios del crudo del petróleo periodo 1947-2011 [35]</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9 Curva del cenit del gas [41], ASPO Newsletter n100 2009, [42],WEO World energy Outlook 2012 OECD/IEA.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10 Source: Eurostat, data as of 12 May 2016 from data series nrg_103m. Net imports refer to imports minus exports. Note: Eurostat metodologica.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 % de los recursos energéticos utilizados por país de la UE en el año 2014.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12 Datos Eurostat, porcentaje de MW de energía eólica instalados por país, periodo 1990-2014.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 13 diagrama de flujo o diagrama de Forrester</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14 Fases en la construcción de un modelo [10].....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15 Editor de ecuaciones de VENSIM. Variable capacidad instalada inicial (1990-2014).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16 Potencia eólica instalada en Europa. Periodo 1990-2014.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 17 Izqda curva de la potencia logística periodo 2015-2050. Drcha Incremento de potencia periodo 2015-2050.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18 Editor de ecuaciones de VENSIM. Variable crecimiento anual.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 19 Cargas que actuan sobre una estructura eólica off-shore</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20 Tiempo de retorno de la inversión de una turbina eólica según su tamaño</i>	<i>44</i>
<i>Figura 21 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23 Editor de ecuaciones de VENSIM. Variable Demanda de energía, periodo1990-2014.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 24 Demanda de energía eléctrica, periodo 1990-2014.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 25 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 26 Evolución de la demanda en Europa 2005-2050 por fuente de energía [18].....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27 Evolución de la demanda en Europa 2005-2050 por fuente de energía [19].....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28 Variación de demanda por mejoras tecnológicas. [20].....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 29 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....</i>	<i>51</i>

Figura 30 Editor de ecuaciones de Vensim. Variable factor de capacidad (1990-2014).....	52
Figura 31 Factores de capacidad de diferentes tecnologías presentes en Europa.....	53
Figura 32 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....	55
Figura 33 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....	55
Figura 34 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....	57
Figura 35 Aportación de cada sector a las emisiones totales de CO ₂ . Años 1990, 2014 [26].....	58
Figura 36 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....	59
Figura 37 Porcentaje de agua consumido en Europa por sector [28]	61
Figura 38 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....	62
Figura 39 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....	63
Figura 40 Editor de ecuaciones. Variables costes por MW instalado.....	64
Figura 41 Gráfica de precios de fabricación de turbinas decrecientes por año y por potencia de turbina.....	64
Figura 42 Variables utilizadas en la construcción del modelo en Vensim.....	65
Figura 43 Capacidad eólica instalada, periodo 1990-2050. Modelo en VENSIM.....	69
Figura 44 Demanda de energía eléctrica en el periodo 1990-2014. Modelo en VENSIM.....	70
Figura 45 Energía eólica generada (GWh). Modelo en VENSIM	70
Figura 46 Análisis de sensibilidad, energía eólica generada (GWh), periodo 1990-2050.....	71
Figura 47 Porcentaje de energía eólica que cubre la demanda. Modelo VENSIM.....	72
Figura 48 Análisis de sensibilidad para el porcentaje de demanda abastecido por energía eólica. VENSIM.....	73
Figura 49.....	74
Figura 50 Porcentaje de reducción de emisiones de CO ₂ respecto a los niveles de 1990.....	75
Figura 51 Equivalente del CO ₂ ahorrado por la energía eólica en nº de vehículos.....	76
Figura 52 consumo de agua equivalente en número de ciudadanos, periodo 1990-2050 (elaboración propia).....	77
Figura 53 Costes totales de instalación energía eólica periodo 1990-2050 (elaboración propia)	77
Figura 54 Beneficios aportados por la energía eólica periodo 1990-2050 (elaboración propia).....	78
Figura 55 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Austria.....	88
Figura 56 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Bélgica.....	89
Figura 57 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Dinamarca.	90
Figura 58 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Estonia.	91
Figura 59 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Finlandia.	92
Figura 60 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Francia.	93
Figura 61 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Alemania.....	94
Figura 62 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Grecia.....	95

<i>Figura 63 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Hungría.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 64 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Irlanda.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 65 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Italia.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 66 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Luxemburgo.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 67 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Holanda.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 68 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Polonia.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 69 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Portugal.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 70 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Eslovaquia.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 71 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Eslovenia.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 72 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. España.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 73 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Suecia.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 74 Energía eólica generada (GWh) y % de eólica, periodo 1990-2050. Reino Unido.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 75 Países europeos con mayor energía eólica. Periodo 1990-2050.....</i>	<i>108</i>



Índice de Ecuaciones:

1 Factores que limitan el crecimiento de la energía eólica instalable en Europa	39
2 Ecuación standard, función logística	40
3 Función logística, que modela el crecimiento de la potencia eólica instalable en Europa.....	40
4 Ecuación, nueva capacidad eólica palmificada	46
5 Ecuación, nueva capacidad en construcción	46
6 Ecuación en Vensim para la demanda eléctrica prevista	51
7 Ecuación en Vensim para el factor de capacidad	52
8 Ecuación en Vensim, para el % de descarbonización, referencia año 1990	60
9 Ecuación en Vensim para los m ³ de agua ahorrados.....	62
10 Ecuación potencia instalada para el global de la UE.....	86
11 Ecuación potencia instalada por país de la UE. Ecuación vectorial.....	87