



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

**Modelado de la intensidad de
materiales en aerogeneradores para
su integración en el modelo MEDEAS**

Autor:

Ruiz Azpeleta, Miguel

Tutores:

**Miguel González, Luis Javier
Capellán Pérez, Íñigo**

**Ingeniería de Sistemas y
Automática**

Valladolid, Julio de 2021

Índice

Índice de ilustraciones	7
Glosario	13
Resumen	15
Abstract.....	15
1.- Introducción	17
1.1.- Presentación del problema	17
1.2.- Acerca de la capacidad mundial instalada	20
1.3.- Principios físicos de aprovechamiento de la energía eólica.	25
2.- Objetivos.....	29
3.- Metodología	31
3.1.- La dinámica de sistemas como forma de simulación.....	32
3.1.1.- Simulación de modelos	33
3.1.2.- Los diagramas causales	34
3.1.3.- Los diagramas de flujo	36
3.1.4.- Modelado.....	38
3.2.- VenSim.....	39
3.3.- Identificación de las tecnologías eólicas actuales y potencialmente futuras relevantes.....	40
3.3.1.- Clasificación de aerogeneradores según su torre de contención	41
3.3.1.1.- “Full-concrete, field cast towers”	41
3.3.1.2.- “Precast concrete towers”	42
3.3.1.3.- “Tubular steel towers”	44
3.3.1.4.- “Lattice steel towers”	45
3.3.1.5.- “Spiral-welded steel towers”	46
3.3.1.6.- Estructuras híbridas de hormigón y acero	47
3.3.2.- Clasificación de aerogeneradores según su tipo de generador ...	48
3.3.2.1.- Síncronos.....	49
3.3.2.1.1.- SG-PM-DD	49

3.3.2.1.2.- SG-PM-MS y SG-PM-HS.....	49
3.3.2.1.3.- SG-E-DD	49
3.3.2.2.- Asíncronos	50
3.3.2.2.1.- AG.....	50
3.3.2.2.2.- DF.....	50
3.3.3.- Clasificación de aerogeneradores offshore según su anclaje al lecho marino	51
3.3.3.1.- “Semi-submersible platform”	51
3.3.3.2.- “Spar-buoy”	51
3.3.3.3.- “Tensión-leg platform”	51
3.3.3.4.- Monopilote.....	52
3.3.3.5.- De gravedad	53
3.3.3.6.- De trípode	53
3.3.3.7.- “Jacket”	53
3.4.- Cuotas de mercado y previsiones	54
3.5.- Intensidades de materiales en aerogeneradores	57
3.5.1.- Materiales críticos en la Unión Europea	57
3.5.2.- Materiales críticos para la construcción de aerogeneradores.....	59
3.5.3.- El imán permanente	61
3.5.4.- Evolución temporal de intensidades materiales	65
3.5.5.- Recopilación de datos.....	73
3.6.- El Modelo MEDEAS	81
3.7.- Modelado.....	84
3.7.1.- Esquema de modelado	84
3.7.2.- Modelado independiente a MEDEAS	85
3.7.3.- Integración con el modelo MEDEAS.....	94
3.8.- Escenarios	99
3.9.- Resultados de la simulación	102
3.9.1.- Escenarios extremos	102
3.9.2.- Escenarios de mejora tecnológica y continuidad.....	113

3.9.3.- Disminución en la intensidad material de Neodimio y Disprosio	127
3.9.4.- Caso de menores reservas.....	130
3.9.5.- EROI.....	132
3.9.6.- Tasa de reciclaje	138
3.9.7.- Resumen de resultados.....	141
3.9.8.- Orientación hacia futuros trabajos.	146
4.- Conclusiones.....	147
Agradecimientos	149
Bibliografía	151

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.- Emisiones de CO ₂ (Olivier, 2017).....	18
Ilustración 2.- Uso de materiales críticos en la Unión Europea	19
Ilustración 3.- Capacidad eólica mundial instalada (IRENA, 2020)	21
Ilustración 4.- Capacidad eólica frente a capacidad renovable total (IRENA, 2020).....	22
Ilustración 5.- Share de potencia instalada por regiones (IRENA, 2020)	23
Ilustración 6.- Esquema de trabajo.....	31
Ilustración 7.- Realimentación en un Sistema (Forrester, 2009).....	32
Ilustración 8.- Realimentación positiva	35
Ilustración 9.- Realimentación negativa	35
Ilustración 10.- Ejemplo de sistema complejo "DaisyWorld"	37
Ilustración 11.- Interfaz de usuario de VenSim.....	39
Ilustración 12.- Construcción de una torre de hormigón prefabricado.....	43
Ilustración 13.- Construcción de una torre de acero.....	44
Ilustración 14.- Torre de acero en celosía.....	45
Ilustración 15.- Torre del tipo "spiralift"	46
Ilustración 16.- Torre híbrida hormigón-acero.....	47
Ilustración 17.- Anclaje mediante cables (Floating Offshore Wind Market Technology Review, 2020)	51
Ilustración 18.- Anclajes directos (Igwemezie et al., 2019).....	52
Ilustración 19.- Proyección de la cuota de mercado de las diferentes tecnologías (Junne et al., 2020).....	54
Ilustración 20.- Cuota de mercado para aerogeneradores offshore en el escenario de mejora tecnológica (Viebahn et al., 2015).....	55
Ilustración 21.- Cuota de mercado para aerogeneradores onshore en el escenario de mejora tecnológica (Viebahn et al., 2015).....	56
Ilustración 22.- Materiales críticos para la Unión Europea (Blengini et al., 2020)	59
Ilustración 23.- Utilización de materiales en los componentes de un aerogenerador (Bobba et al., 2020).....	60
Ilustración 24.- Composición en masa de imanes NdFeB genéricos.....	62

Ilustración 25.- Intensidades materiales de Neodimio, Disproso y Terbio en aerogeneradores SG-PM-DD	66
Ilustración 26.- Intensidades materiales de Neodimio en aerogeneradores SG-PM-DD.....	67
Ilustración 27.- Intensidades materiales de Disproso en aerogeneradores SG-PM-DD.....	67
Ilustración 28.- Regresión del Neodimio en SG-PM-DD.....	69
Ilustración 29.- Regresión del Neodimio en SG-PM-DD sin previsiones.....	69
Ilustración 30.- Regresión del Disproso en SG-PM-DD	70
Ilustración 31.- Intensidades materiales de Neodimio y Disproso en aerogeneradores SG-PM-MS	71
Ilustración 32.- Intensidades materiales de Neodimio y Disproso en aerogeneradores SG-PM-HS	72
Ilustración 33.- Módulos del modelo MEDEAS (Solé et al., 2020).....	82
Ilustración 34.- Pestaña "energy electricity ELEC RES.generation" del modelo MEDEAS.....	83
Ilustración 35.- Esquema del objetivo de nuestro modelo	84
Ilustración 36.- Modelo "Onshore".....	85
Ilustración 37.- Modelo "Offshore"	86
Ilustración 38.- Subscript en VenSim.....	87
Ilustración 39.- Nomenclatura de los subscript	88
Ilustración 40.- Lectura de datos	89
Ilustración 41.- Mejora en la intensidad de materiales.....	91
Ilustración 42.- Selección de escenario de continuidad o mejora tecnológica.....	92
Ilustración 43.- Interruptor para los diferentes escenarios.....	93
Ilustración 44.- Origen de la variable "RES elec capacity under construction TW"	95
Ilustración 45.- Variable "RES elec capacity under construction TW".....	96
Ilustración 46.- "materials.demand for RES elec" del modelo original.....	97
Ilustración 47.- "materials.demand for RES elec" del modelo realimentado..	97
Ilustración 48.- "materials required for new RES elec Mt" para tecnología ya existente (hidrológica).....	98

Ilustración 49.- "materials required for new RES elec Mt" para eólica terrestre	98
Ilustración 50.- Shares Mejora tecnológica Onshore	100
Ilustración 51.- Shares Mejora tecnológica Offshore	100
Ilustración 52.- Shares Continuista Onshore	101
Ilustración 53.- Shares Continuista Offshore	101
Ilustración 54.- Construcción de MW onshore en los casos extremos	102
Ilustración 55.- Construcción de MW offshore en los casos extremos	102
Ilustración 56.- Consumo de cobre onshore en escenarios extremos.....	104
Ilustración 57.- Consumo de cobre offshore en escenarios extremos.....	104
Ilustración 58.- Consumo acumulado de Cobre en casos extremos frente a reservas	105
Ilustración 59.- Consumo acumulado de Cobre en casos extremos frente a recursos	106
Ilustración 60.- Consumo de Cobre total en casos extremos frente a recursos	107
Ilustración 61.- Consumo de Neodimio onshore en escenarios extremos ...	108
Ilustración 62.- Consumo de Neodimio offshore en escenarios extremos ...	108
Ilustración 63.- Consumo de Neodimio en casos extremos frente a reservas	109
Ilustración 64.- Consumo de Neodimio total en casos extremos frente a reservas	110
Ilustración 65.- Consumo de Disprosio onshore en escenarios extremos....	111
Ilustración 66.- Consumo de Disprosio offshore en escenarios extremos ...	111
Ilustración 67.- Consumo de Disprosio en casos extremos frente a reservas	112
Ilustración 68.- Consumo de Disprosio total en casos extremos frente a reservas	112
Ilustración 69.- Construcción de nuevos MW onshore para el escenario de mejora tecnológica.....	113
Ilustración 70.- Construcción de nuevos MW offshore para el escenario de mejora tecnológica.....	114
Ilustración 71.- Capacidad instalada onshore en el escenario de mejora tecnológica	115

Ilustración 72.- Capacidad instalada offshore en el escenario de mejora tecnológica.....	115
Ilustración 73.- Construcción de nuevos MW onshore para el escenario de continuidad.....	116
Ilustración 74.- Construcción de nuevos MW offshore para el escenario de continuidad.....	117
Ilustración 75.- Capacidad instalada onshore en el escenario de continuidad.....	118
Ilustración 76.- Capacidad instalada offshore en el escenario de continuidad.....	118
Ilustración 77.- Capacidad onshore y offshore para el escenario de mejora tecnológica.....	119
Ilustración 78.- Capacidad onshore y offshore para el escenario de continuidad tecnológica.....	119
Ilustración 79.- Capacidad total comparada de ambos escenarios.....	120
Ilustración 80.- Consumo de Cobre en los escenarios de mejora tecnológica y de continuidad.....	121
Ilustración 81.- Consumo de cobre para renovables sobre reservas.....	121
Ilustración 82.- Consumo de Cobre para otros usos.....	122
Ilustración 83.- Consumo total de Cobre sobre reservas.....	123
Ilustración 84.- Consumo total de Cobre sobre recursos.....	123
Ilustración 85.- Consumo de Neodimio en los escenarios de mejora tecnológica y de continuidad.....	124
Ilustración 86.- Consumo de Neodimio en renovables sobre reservas.....	125
Ilustración 87.- Consumo de Disprosio en los escenarios de mejora tecnológica y de continuidad.....	126
Ilustración 88.- Consumo de Disprosio en renovables sobre reservas.....	126
Ilustración 89.- Reducción de Neodimio en el escenario continuista.....	127
Ilustración 90.- Reducción de Neodimio en el escenario de mejora tecnológica.....	127
Ilustración 91.- Reducción de Disprosio en el escenario continuista.....	128
Ilustración 92.- Reducción de Disprosio en el escenario de mejora tecnológica.....	128
Ilustración 93.- Consumo de Neodimio sobre reservas con mejora.....	129

Ilustración 94.- Consumo de Disproso sobre reservas con mejora.....	129
Ilustración 95.- Consumo de Neodimio sobre reservas mínimas (Tabla 5)..	131
Ilustración 96.- Consumo de Disproso sobre reservas mínimas (Tabla 5) ..	131
Ilustración 97.- Pestaña "energy EROI.RES_elec" de MEDEAS.....	133
Ilustración 98.- EROI SG-PM-DD.....	133
Ilustración 99.- EROI SG-PM-MS/HS.....	134
Ilustración 100.- EROI SG-E-DD.....	134
Ilustración 101.- EROI onshore de las distintas subtecnologías	135
Ilustración 102.- EROI offshore de las diferentes subtecnologías	135
Ilustración 103.- EROI renovables	136
Ilustración 104.- EROI escenarios de mejora tecnológica y continuista.....	137
Ilustración 105.- EROI del modelo MEDEAS-W original.....	138
Ilustración 106.- Consumo de Disproso. Mejora tecnológica con reciclado del 15%	139
Ilustración 107.- Consumo de Neodimio. Mejora tecnológica con reciclado del 15%	140
Ilustración 108.- Consumo acumulado total de Disproso en 2060	141
Ilustración 109.- Consumo acumulado total de Neodimio en 2060.....	142
Ilustración 110.- Consumo acumulado total de Cobre en 2060.....	143

Glosario

Windaon_PM_DD: Aerogenerador terrestre, síncrono, de imán permanente y sin caja de cambios.

Windaon_PM_MS_HS: Aerogenerador terrestre, síncrono, de imán permanente, y con caja de cambios de media o alta velocidad.

Windaon_E_DD: Aerogenerador terrestre, síncrono, excitado eléctricamente, y sin caja de cambios.

Windaon_AG: Aerogenerador terrestre, asíncrono.

Windaoff_PM_DD: Aerogenerador marino, síncrono, de imán permanente y sin caja de cambios.

Windaoff_PM_MS_HS: Aerogenerador marino, síncrono, de imán permanente y con caja de cambios de media o alta velocidad.

Windaoff_E_DD: Aerogenerador marino, síncrono, excitado eléctricamente y sin caja de cambios.

Windaoff_AG: Aerogenerador marino, asíncrono.

NdFeB: Imán de Neodimio-Hierro-Boro.

Resumen

Cada vez más, la sociedad demanda cambios que redunden en la adopción de un estilo de vida más sostenible. La generación de energía eólica puede ayudar lograr este objetivo, aunque también crea nuevos inconvenientes que se deben mitigar, principalmente el agotamiento debido a una elevada demanda de los recursos materiales necesarios para su construcción, mantenimiento, y desmantelamiento. Por ello, en este trabajo, y tras una extensa revisión de la literatura existente, hemos analizado cómo se ven afectados ciertos materiales críticos para este sector económico, principalmente el Neodimio, Disproseo y Cobre, a través de la creación de un modelo de simulación mediante la dinámica de sistemas que subdivide los grandes bloques de eólica terrestre y marina en las subtecnologías más relevantes, y que ha sido integrado en el modelo MEDEAS. De esta manera hemos simulado diferentes escenarios que pueden servir de base para la adopción de políticas que minimicen este impacto.

Palabras clave: “Aerogenerador”, “Materiales”, “Recursos”, “Dinámica de sistemas”, “Energía”.

Abstract

Society is increasingly demanding changes that might result in the adoption of a more sustainable lifestyle. One of the potential technologies that may help change this paradigm is wind power, although it creates new disadvantages that must be mitigated, mainly depletion due to a high demand for the material resources necessary for its construction, maintenance and dismantling. Therefore, in this work, and after an extensive review of the existing literature, we have analysed how certain critical materials for this economic sector are affected, mainly Neodymium, Dysprosium and Copper, through the creation of a simulation model using system dynamics that subdivides the large blocks of onshore and offshore wind power into the most relevant sub-technologies, and which has been integrated into the MEDEAS model. We have thus simulated different scenarios that can serve as a basis for the adoption of policies that will minimise this impact.

Keywords: “Wind power”, “Materials”, “Resources”, “System dynamics”, “Energy”.

1.- Introducción

1.1.- Presentación del problema

La producción de energía, junto con la forma en que dicha energía es producida, es uno de los asuntos más importantes del mundo moderno. Además de esto, tan importante es la producción en sí, como el momento en el que se produce, ya que la acumulación de energía eléctrica a grandes cantidades no es viable, salvo excepciones, como, por ejemplo, las centrales hidroeléctricas reversibles, que no van a ser objeto de este estudio. En resumidas cuentas, si no se produjera la cantidad de energía eléctrica necesaria para ser consumida en el momento en el que es requerida, el mundo no podría funcionar tal y lo conocemos actualmente. Dicha producción no es inocua para la sociedad humana, ni para el planeta en su conjunto. Todo viene con su contrapartida.

En el caso de las sociedades humanas, la producción de energía conlleva enormes costes económicos, no sólo en el proceso de la generación, sino también en la construcción de los sistemas de generación, incluyendo el coste de los materiales necesarios y su transporte, entre otros. Este problema es en general paliado por los rendimientos económicos que se extraen de la energía generada, puesto que todos los sistemas de generación utilizados son eficientes desde el punto de vista económico, salvo en casos experimentales de nuevos modelos de generación sobre tecnologías ya existentes, o en los casos de investigación de nuevas formas de generación de energía, como la fusión nuclear.

Para el caso del planeta en su conjunto, entendido como un ecosistema global, tenemos el problema de la emisión de contaminantes, principalmente de gases de efecto invernadero. Desde la década de los 50, las señales son evidentes. Como bien refleja el estudio de (Pachauri & Meyer, 2014), cada década ha sido objetivamente más cálida que la anterior, habiéndose aumentado la temperatura global unos $0,85^\circ$ en los últimos 30 años. Además de los problemas que esto genera en la atmósfera, adicionalmente los océanos también se están calentando, lo cual no sólo provoca una disminución de la habitabilidad para las especies que lo pueblan, sino que también puede cambiar la salinidad del agua, aumentándola en los lugares en los que ya era alta, y disminuyéndola donde ya era baja, en definitiva, llevando a cualquiera de los extremos las condiciones. Adicionalmente se han producido pérdidas de masa en la criosfera, lo cual ha supuesto un aumento del nivel del mar de aproximadamente 20 cm. Esto es debido principalmente a que los

combustibles fósiles son la principal fuente de energía actualmente. Estos combustibles son muy eficientes energéticamente hablando, ya que tienen un alto poder calorífico, lo que hace que se puedan extraer grandes cantidades de energía de ellos. Sin embargo, la combustión a la que se les somete para que liberen dicha energía genera una cantidad tan elevada de residuos y gases contaminantes y de efecto invernadero (Ilustración 1) que hacen insostenible que esta situación se mantenga, sobre todo debido a la creciente demanda de energía, y a la naturaleza no renovable de estos tipos de combustibles.

Global greenhouse gas emissions, per country and region

Trend

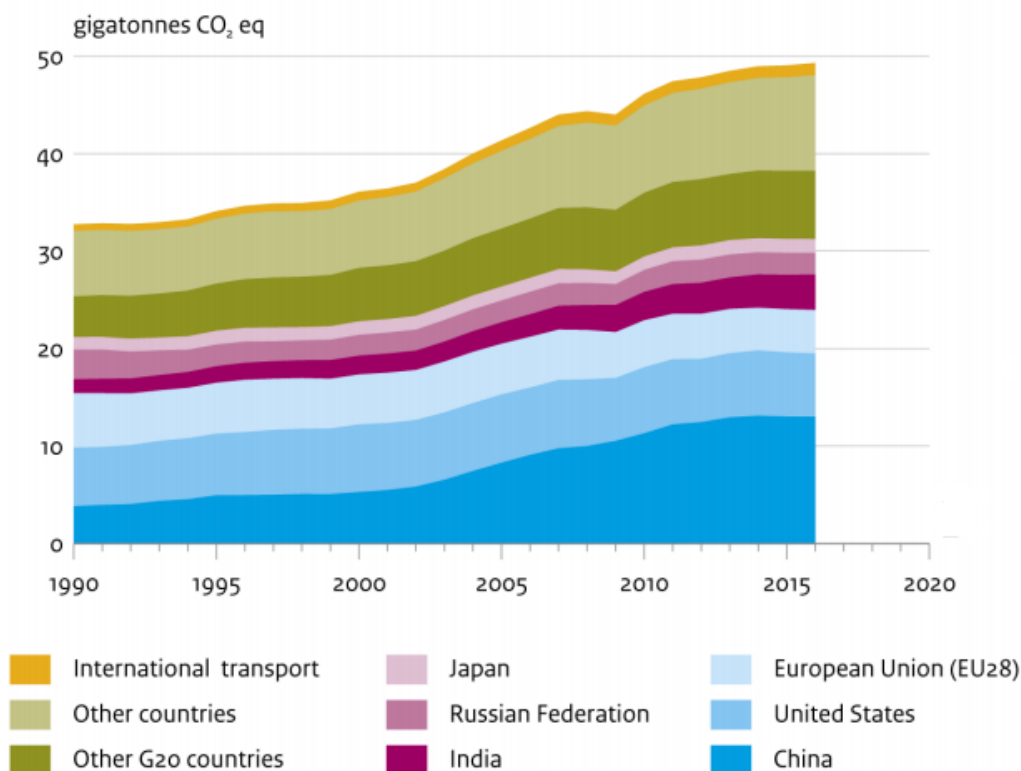


Ilustración 1.- Emisiones de CO₂ (Olivier, 2017)

Una de las principales fuentes de energía alternativa, y la que vamos a tratar aquí, es la generación eólica mediante aerogeneradores de eje horizontal.

Un aerogenerador, básicamente es capaz de convertir la energía cinética del viento, generada por procesos naturales en la parte más baja de la atmósfera terrestre, a través de la rotación de un eje, en energía eléctrica, sin generar gases de efecto invernadero en el proceso de la producción de la energía. Es

importante recalcar esto, en el propio proceso de producción de la energía, ya que la construcción de un aerogenerador genera ciertos problemas, aunque por lo general menores que las formas de energía convencionales.

Uno de los problemas principales es el daño que la instalación de estos sistemas produce a la fauna autóctona. Esto puede ser debido a muertes de fauna provocadas directamente por la misma estructura del aerogenerador, como pueden ser colisiones de aves contra las palas, al no ser un elemento reconocible para ellas, o electrocuciones provocadas por las líneas de alta tensión. También se pueden provocar fenómenos mucho más sutiles y difíciles de relacionar, como la muerte de murciélagos por la diferencia de presión que generan las palas, que, en casos extremos, y si el animal se encuentra a muy poca distancia, pueden provocar el colapso de sus órganos internos. Estudios como el de (Sanz-Aguilar et al., 2015) han estudiado estos fenómenos.

Dichos problemas son esencialmente el consumo de tierras raras y, en general, materiales considerados críticos, en su construcción, y el consumo energético que es utilizado para su fabricación, tanto para la construcción de los diferentes elementos que componen el aerogenerador, como para el transporte de las partes, ya que se deben tener en cuenta las posibles limitaciones tanto de transporte, como de precio por reducción de la oferta al provenir muchas de ellas de países inestables políticamente, y que pueden provocar daños en el futuro de estas tecnologías (*The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, 2021), su montaje final, el mantenimiento que se le debe proporcionar, y su desmantelamiento a la llegada del fin de su vida útil.

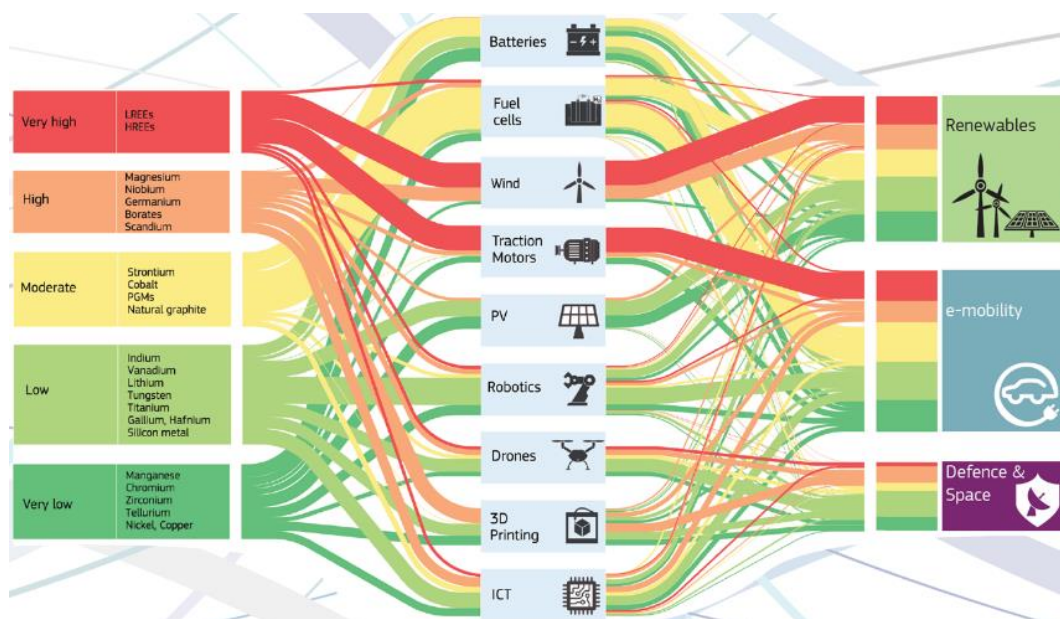


Ilustración 2.- Uso de materiales críticos en la Unión Europea

En el caso de la utilización de tierras raras, las energías renovables no son el único sector económico en el que son necesarias, como se aprecia en la Ilustración 2 (Bobba et al., 2020). En la práctica se utilizan en la casi totalidad de los sectores relacionados con las nuevas tecnologías. Hablaremos con mayor profundidad sobre estos temas en el apartado 3.5.1.- Materiales críticos en la Unión Europea y 3.5.2.- Materiales críticos para la construcción de aerogeneradores.

La energía utilizada para esto evidentemente debe venir de otras fuentes de energía y su cuantía dependerá también de la tecnología del generador.

Las principales clasificaciones que podemos emplear para distinguir los diferentes tipos de tecnologías son:

- Según su ubicación: se pueden clasificar en terrestres (onshore), y marinos (offshore).
- Según su tipo de generador: pueden ser de imán permanente o excitados eléctricamente, y con o sin caja de cambios, y sus combinaciones.
- Según su estructura: según los materiales empleados, y adicionalmente, en el caso de los offshore, según su anclaje al lecho.

1.2.- Acerca de la capacidad mundial instalada

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020) la capacidad mundial total instalada en el año 2020 es de un total de 733 GW, de los cuales 699 son generados por aerogeneradores terrestres, y los restantes 34 por aerogeneradores marinos.

Según estudios anteriores (Kim et al., 2015), la capacidad mundial instalada a principios del año 2014 era de 336,3 GW, frente a los 318,9 reportados por la World Wind Energy Association («WWEA», 2019), y los 349,3 de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020).

Vamos a utilizar los datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables, ya que no sólo son datos fiables, sino que también contiene datos del resto de medios de producción de energía, y permitirá unas comparaciones y estadísticas más acertadas.

Como podemos observar en la Ilustración 3, el crecimiento en la producción de energía mediante la generación eólica es evidente. Hemos pasado de una potencia instalada en el año 2000 de 16,9 GW a los 733,3 del año 2020. La generación offshore, aunque sigue siendo reducida en comparación con la terrestre, también ha experimentado un ascenso, pasando de representar tan solo un 0,4% en el año 2000 hasta el casi 5% que representa actualmente.

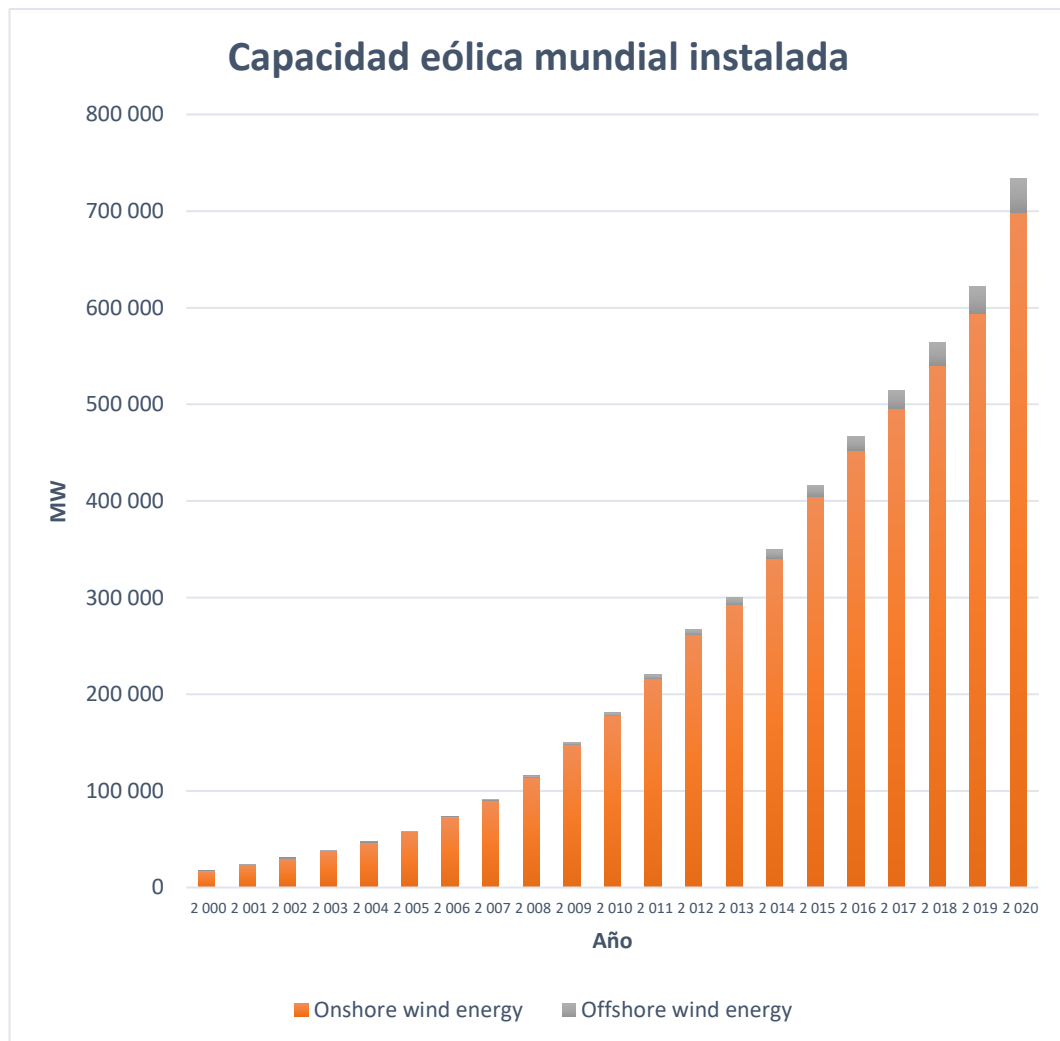


Ilustración 3.- Capacidad eólica mundial instalada (IRENA, 2020)

Si comparamos los datos de generación eólica con el total de la energía renovable generada (Ilustración 4), vemos como este tipo de generación de energía renovable ha ganado mucho terreno en las últimas dos décadas, pasando de un 2,24% de share del total de energías renovables en el año 2000 (16927 MW frente a los 753867MW totales renovables) hasta un 24,51% en 2020 (622249 MW frente a los 2538441 MW totales renovables), multiplicándose casi por 11 el share.

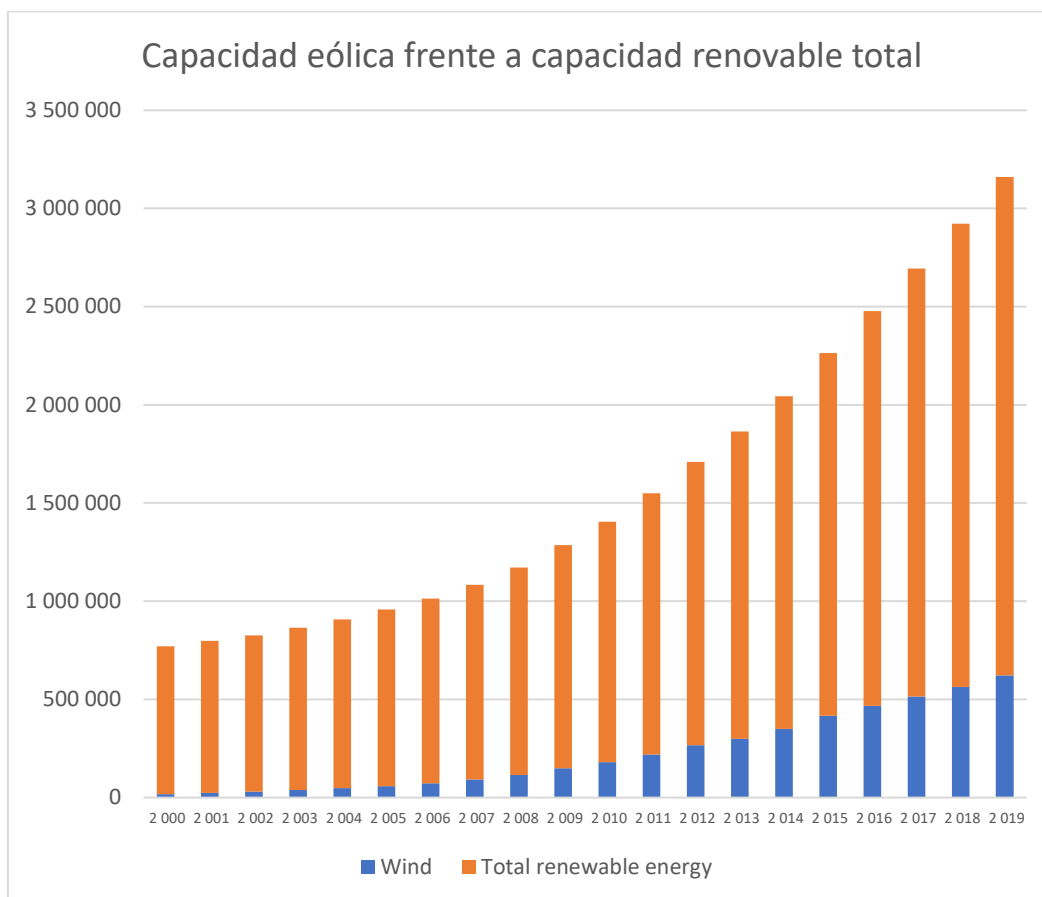


Ilustración 4.- Capacidad eólica frente a capacidad renovable total (IRENA, 2020)

Por último, el share con respecto al total de energía producida, más importante aún si cabe, ha crecido aún más, desde el casi despreciable 0,49% del año 2000, hasta un nada desdeñable 9,13% del total de la energía, tanto renovable como no renovable, 18,5 veces más.

Estos datos dejan patentes el elevado interés del mercado en sistemas de generación eólica. Algunas de las causas que han propiciado estos incipientes cambios en la forma de generación de energía son, por ejemplo, la búsqueda de algunos países a reducir su grado de dependencia de combustibles fósiles u otras fuentes de energía no presentes naturalmente en su territorio, lo cual a la larga genera importantes ahorros en la importación de, sobre todo, combustibles fósiles, cuyo mercado está controlado principalmente por el pequeño grupo de países productores. Parte de las causas son también la búsqueda de una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, que como hemos visto antes, no va a poder seguir aumentando indefinidamente como hasta ahora, y la presión social, que mayoritariamente aboga por una transición hacia una sociedad más sostenible.

Si desagregamos los datos por regiones, podemos obtener una mejor visión general acerca de los territorios que más están apostando por la generación eólica. Como ya conocemos los datos totales de generación, vamos a emplear un gráfico que refleje el share por regiones, y no el total instalado, valor que ya conocemos gracias a las anteriores estadísticas.

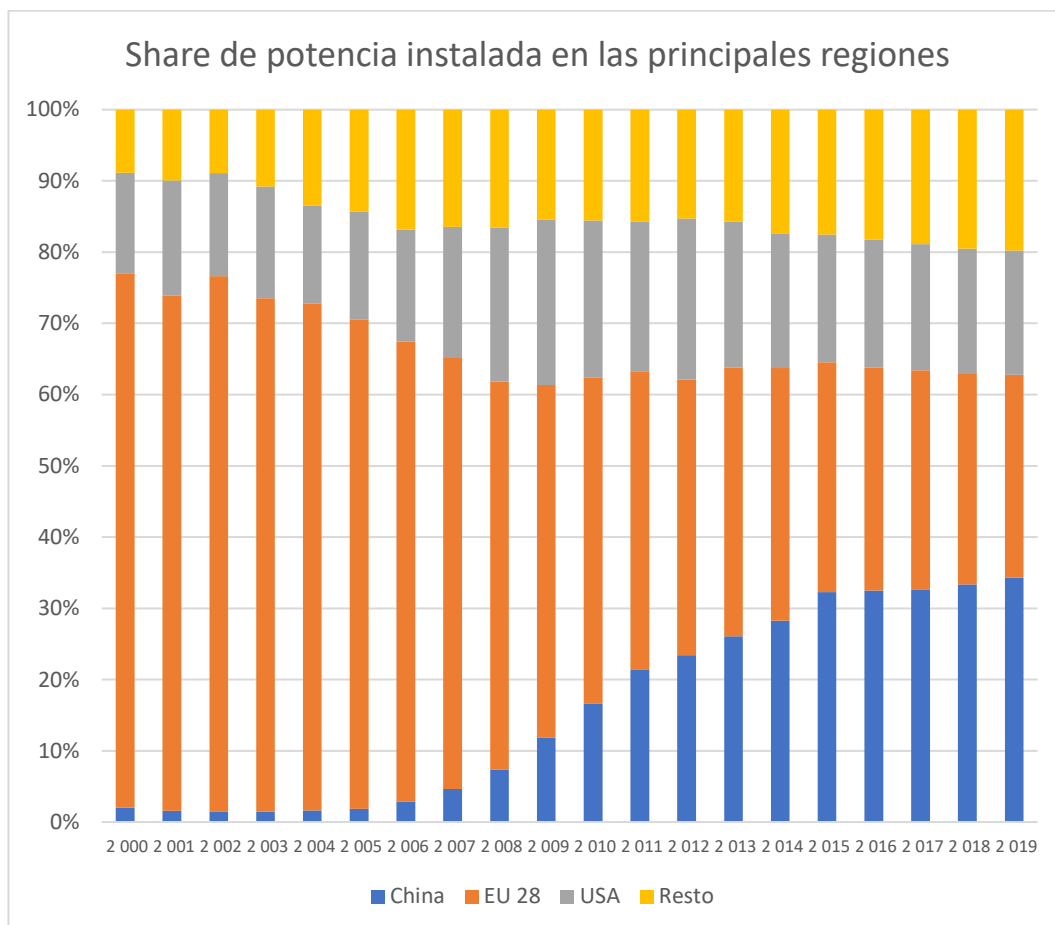


Ilustración 5.- Share de potencia instalada por regiones (IRENA, 2020)

He considerado las regiones más importantes como China, la Unión Europea, Estados Unidos, y el resto del mundo. China y Estados Unidos por ser las dos mayores potencias mundiales, la Unión Europea ya que, al mantener una política común, actúa como una región unida, y en el resto del mundo he incluido a todos los demás países, que no son relevantes individualmente, pero que aun así suponen una parte importante del total.

La Ilustración 5 refleja, por desgracia, que la Unión Europea, está perdiendo mucho terreno con respecto al resto de regiones, pasando de representar casi tres cuartas partes de la generación eólica mundial a poco más de una cuarta parte. En el otro extremo de la balanza encontramos a China, que crece de un share poco menos que despreciable a comienzos de siglo hasta superar a Europa, con un tercio del share mundial. Estados Unidos se mantiene constante, y el resto del mundo duplica su share.

Esto debería hacernos reflexionar acerca del camino que está siguiendo Europa en materia de generación de energía limpia, ya que una bajada de este calibre no puede ser explicada por factores externos al propio poder legislativo, como podrían ser la falta de localizaciones adecuadas para la construcción de parques eólicos, velocidades del viento insuficientes, u otros motivos relacionados con el propio funcionamiento de un aerogenerador. La falta de ambición de los legisladores al no destinar suficientes recursos a paliar estos problemas puede llevarnos a una futura desventaja competitiva con respecto a otras regiones, lo cual a largo plazo tan sólo puede traer problemas.

Otras estadísticas importantes acerca de la generación eólica actual son:

- El 95,31% de la potencia eólica mundial actualmente es generada por molinos terrestres (698,9 GW). Tan sólo 34,4 GW son generados por medio de molinos offshore. Esto se explica principalmente por las complicaciones que trae su mantenimiento, al ser mucho menos accesibles en caso de avería en cualquiera de sus sistemas, y a la clase de generadores que se montan en ellos para prevenir dichas averías, sobre lo que hablaremos más adelante.
- De los países europeos, Alemania es la principal potencia generadora, con 56 GW terrestres y 7,5 marinos, ostentando el mayor valor de potencia eólica por habitante del mundo. España ocupa el segundo lugar, con 25,8 GW.
- Reino Unido es el país con más proporción de generación eólica offshore, con 9,6 GW marinos frente a 12,4 terrestres.

1.3.- Principios físicos de aprovechamiento de la energía eólica.

La energía, en el caso de un generador eólico, sufre varios procesos de transformación hasta llegar a la forma deseada, que es la energía eléctrica. La energía cinética del viento, a través de la mediación de las aspas instaladas en el molino se convierte en energía mecánica, y posteriormente, dicha energía mecánica consistente en el giro del eje se transforma en energía eléctrica por medio de un generador.

Esto no siempre ha sido así, ya que inicialmente, los molinos de viento aprovechaban la energía directamente de forma mecánica, ya fuera para drenar zonas anegadas de agua, como en el caso de los molinos holandeses, o para moler grano, como en el caso de los molinos del resto de Europa.

La energía mecánica que un aerogenerador es capaz de recoger del viento está directamente relacionada con el área de rotación que barren sus aspas.

$$E = \frac{1}{2} t \rho A v^3$$

Ecuación 1.- Energía mecánica de un aerogenerador

Donde:

- E: Energía cinética.
- T: Tiempo.
- ρ : Densidad del aire (variable según las condiciones atmosféricas).
- A: Área barrida por las aspas de la hélice.
- v: Velocidad del viento.

Por lo tanto, se puede actuar en los factores de las siguientes formas: en el caso del tiempo, la densidad del aire, y la velocidad a la que se mueve, no se puede actuar sobre estos factores directamente, ya que vienen dados por factores externos como son el clima de la zona, la época del año, la localización geográfica... Sin embargo, sí que se puede actuar indirectamente sobre estos factores, actuando indirectamente sobre ellos, es decir realizando estudios sobre el terreno para elegir el emplazamiento del aerogenerador según las condiciones climáticas de la zona. Por ejemplo, en general los aerogeneradores offshore son más eficientes que los terrestres, ya que, al estar situados en zonas marinas, las corrientes de aire por lo general son mayores y más regulares.

En el caso del área sí que se puede actuar directamente. Incrementando el tamaño de las aspas de un aerogenerador, y, por lo tanto, también su altura y tamaño genera, vamos a poder aumentar su eficiencia. Esto por lo general no es tan sencillo y supone una serie de desafíos adicionales a la construcción. Uno de estos problemas es el ruido generado por la rotación de las aspas, que aumenta según aumenta tanto el tamaño del aerogenerador, como la velocidad de rotación de sus aspas (Oelker, 2008). Esto provoca que cuanto más grandes sean las aspas de un aerogenerador, menor va a tener que ser su velocidad de rotación, para así limitar los efectos de la contaminación acústica generada, al menos en el caso de los modelos onshore, ya que en el caso de los offshore esto no es algo a tener en cuenta. Una gran velocidad de rotación de las aspas también genera problemas de choques con pájaros, lo cual supone alteraciones del ecosistema por la muerte de estos ejemplares, y posibles daños materiales a las aspas del aerogenerador, por lo que para esto también es preferible un mayor tamaño con una menor velocidad de rotación.

Para solucionar estas situaciones, se han desarrollado diseños teóricos de aerogeneradores como el de UpWind Project de una altura de 300 metros y palas de 200, con un generador de 20MW. En la práctica esta clase de molinos, aunque son más eficientes, también generan una gran cantidad de problemas en su construcción, ya que por lo general es complicado poder garantizar su buen funcionamiento en diversas condiciones de viento, y la garantía de que pueda soportar condiciones climáticas adversas se reduce debido a las enormes fuerzas a las que estarían sometidos los diferentes elementos de un sistema de ese tamaño.

Según los estudios de Albert Betz (BETZ, 1920), físico alemán especializado en mecánica de fluidos, y considerado pionero de la energía eólica por sus estudios, teniendo un papel imprescindible en el desarrollo teórico de las turbinas eólicas, el máximo rendimiento que podría alcanzar un aerogenerador real sería de un 59,6%. Tal fue su contribución a esta materia que dicho límite se le conoce como límite de Betz. En la práctica ese valor es incluso más bajo, ya que existen otros muchos factores en la propia construcción del aerogenerador que rebajan esa cifra.

Si lo pensamos intuitivamente, un rendimiento del 100% implicaría que la turbina eólica es capaz de captar toda la energía mecánica que el viento transporta, por lo que el aire entraría con una velocidad "x" al sistema, el sistema captaría toda la energía mecánica contenida, y eso haría que el aire tuviese una velocidad de 0 a la salida, lo cual es evidentemente imposible. Esto hace imposible que jamás se construya un aerogenerador capaz de extraer el 100% de la energía mecánica del aire.

La Ecuación 1 anterior, para el caso de un generador se suele expresar en potencias y no en energías, por lo que deberíamos eliminar el término que representa al tiempo. Además, la eficiencia, siendo su mayor valor de 0,596, es decir, el límite de Betz, es un factor por el cual debemos multiplicar a dicha expresión para llegar al valor real, obteniendo finalmente la expresión de la potencia.

$$P = \eta \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Ecuación 2.- Potencia de un aerogenerador

Donde:

- P: Potencia del aerogenerador.
- η : Eficiencia del aerogenerador (siempre inferior al valor de 0,596, el límite de Betz).
- ρ : Densidad del aire.
- A: Área barrida por las aspas de la hélice.
- v: Velocidad del viento.

Una vez explicados los anteriores términos en la Ecuación 1, vamos a centrarnos ahora en el término de la eficiencia.

La eficiencia en el caso de un aerogenerador es de tres tipos: eficiencia aerodinámica, eficiencia mecánica, y eficiencia eléctrica. El límite de Betz se refiere a la eficiencia total de un aerogenerador, que resulta del producto de estas tres eficiencias intermedias. Sin embargo, dicho límite se suele asociar con la eficiencia aerodinámica, que no puede pasar del mencionado 59,6%. A partir de ese valor, la eficiencia se ve reducida por pérdidas en los otros dos supuestos.

La eficiencia mecánica tiene en cuenta las pérdidas que se producen por la fricción de los componentes mecánicos internos. Típicamente dicha eficiencia es de un 95%, aunque será mayor para el caso de los molinos sin caja de cambios (Direct Drive) que para los que sí cuentan con una, y tendrá un valor distinto en cada modelo incluso entre los que utilicen una misma tecnología.

La eficiencia eléctrica es la que tiene en cuenta las pérdidas de energía producidas en el propio proceso de transformación de energía mecánica a energía eléctrica, y suele suponer con las tecnologías actuales, un 5% adicional de pérdidas.

Según estudios realizados (H. Li & Chen, 2008), el conjunto de las eficiencias mecánica y eléctrica para los aerogeneradores sin caja de cambios varía entre el 90,7 y el 91,6%, mientras que en el caso de los aerogeneradores con caja de cambios oscila entre un 88,4 y un 90,0%, en condiciones óptimas en todos los casos. Sin embargo, en los modelos con caja de cambios, al tener un cierto número de velocidades fijas, y según el propio estudio de (H. Li & Chen, 2008) esto puede hacer que en la práctica se produzca entre un 5 y un 10% menos de energía que en el caso DD. En ambos casos las mejores eficiencias se obtienen con molinos que, utilizando el mismo tipo de generación, son de mayor potencia. Estos datos tienen lógica ya que los aerogeneradores sin caja de cambios tienen un considerable menor número de partes mecánicas por lo que se producen menores pérdidas en esas zonas.

2.- Objetivos

- Evaluar el estado actual de la generación eólica como medio de producción de energía eléctrica y valorar su importancia con respecto a la generación global de energía, y a la generación de energía limpia.
- Investigar sobre las diferentes tecnologías, tanto actualmente como en previsiones, que utilizan los aerogeneradores y valorar la idoneidad de su aplicación según el uso que se va a dar de ellas en función de su localización, su eficiencia, su uso de materiales críticos, su necesidad de mantenimiento...
- Recopilar exhaustivamente toda la información posible sobre los requerimientos de materiales de las diferentes tecnologías, principalmente sobre los materiales considerados críticos por la Unión Europea.
- Estimar los requerimientos materiales necesarios para la futura instalación de molinos eólicos, y su sensibilidad respecto a las diferentes opciones disponibles, principalmente con relación a los tipos de generadores utilizados.

3.- Metodología

En el transcurso del presente trabajo vamos a seguir aproximadamente cinco etapas, que seguirán un esquema similar al siguiente:

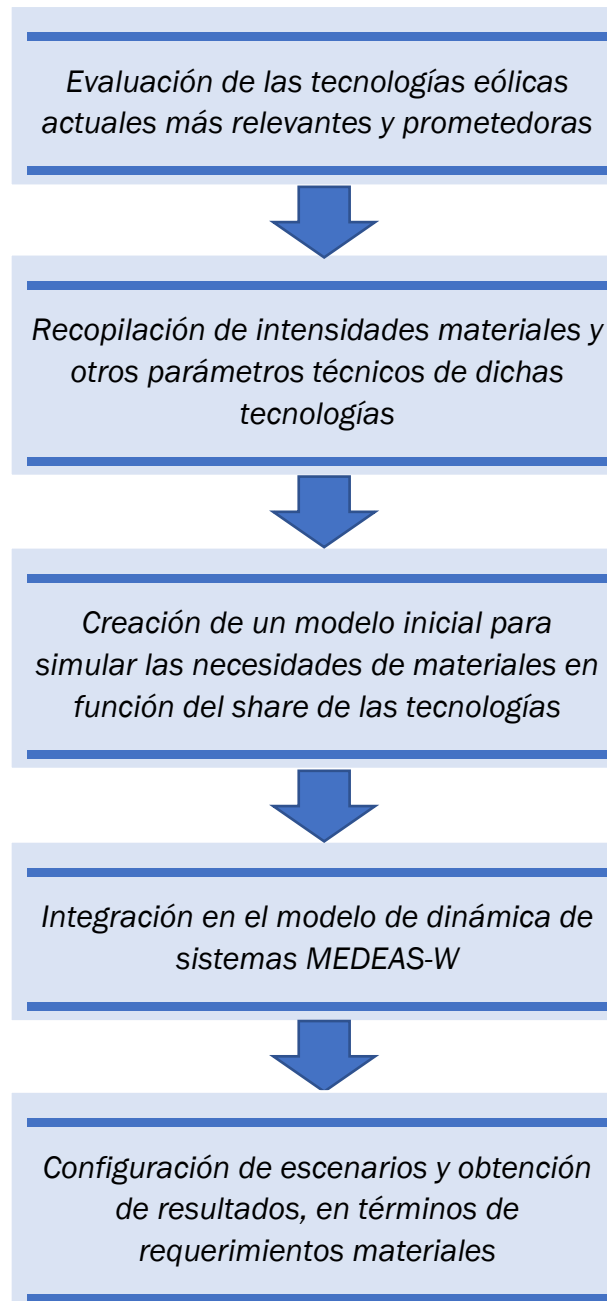


Ilustración 6.- Esquema de trabajo

3.1.- La dinámica de sistemas como forma de simulación.

Según la Real Academia de la Lengua Española, un sistema es, en la acepción que nos interesa, un “Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto” («REAL ACADEMIA ESPAÑOLA», 2019). Dicho más claramente, un sistema es un todo. Un todo compuesto, no sólo por los elementos que lo componen, sino también por las relaciones que gobiernan a dichos elementos, pudiendo llegar a ser estas relaciones tan o más importantes que los elementos en sí mismos. Todo este conjunto es el que permite al sistema conseguir un fin común (Aracil, 1995).

Se considera que esta ciencia nació gracias al libro “Teoría general de los sistemas” (von Bertalanffy, 1968), aunque conceptos previos habían surgido unos años atrás, principalmente en el MIT. Inicialmente, esta herramienta fue creada para facilitar los procesos industriales, analizando su comportamiento para poder entender mejor su funcionamiento, y actualmente se utiliza para modelar el comportamiento de sistemas de todo tipo, como, por ejemplo, el modelo MEDEAS del Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid, del cual hablaremos más adelante.

Este tipo de enfoque surge como contraposición a los paradigmas habituales anteriores, como la separación de un elemento a estudiar en partes más pequeñas para analizarlas por separado, con lo que se perdía la gran parte que suponen las interacciones y realimentaciones entre ellas (Ilustración 7). También elimina la limitación que tiene el ser humano, que suele pensar en linealmente, una causa genera un efecto, cuando en realidad los sistemas dependen de muchos más factores, no evidentes para un observador común.

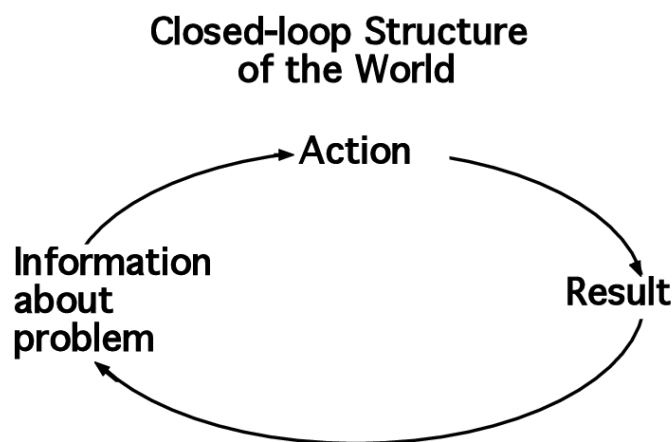


Ilustración 7.- Realimentación en un Sistema (Forrester, 2009)

El mejor ejemplo de un sistema de este tipo es un ecosistema. En este caso se trata de un sistema que se organiza a sí mismo, y en el cual no sólo existen diferentes especies independientes entre sí, sino que entre ellas se dan diversas relaciones, como por ejemplo relaciones complementarias, como las de depredador y presa, o diferentes tipos de relaciones asociativas, ya sean beneficiosas o perjudiciales, como la simbiosis entre especies, o el parasitismo. Esto genera intercambios muy importantes entre los diferentes elementos, como, por ejemplo, intercambios de materia a través del alimento, o a través del dióxido de carbono desechado por las especies animales, que es aprovechado por las especies vegetales...

Es por esto por lo que la dinámica de sistemas no se encarga de dar predicciones acerca de valores concretos, sino que se encarga de modelar comportamientos generales del sistema a partir de ciertas condiciones impuestas, y las diferencias producidas al variar dichas condiciones. Esto es, en el ejemplo del ecosistema, un modelo de dinámica de sistemas no podría predecir el tiempo de vida de un individuo de una determinada especie, pero sí, por ejemplo, la esperanza de vida de dicha especie en función de los parámetros del resto del ecosistema, y cómo varía en función de los cambios que se produzcan en su entorno.

3.1.1.- Simulación de modelos

Según la RAE, un modelo es un “Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento” («REAL ACADEMIA ESPAÑOLA», 2019).

Los modelos, a grandes rasgos, pueden ser de dos tipos principalmente:

- Modelos mentales: Se basan principalmente en el conocimiento de una persona sobre un sistema. Son por lo general muy limitados, ya que, como hemos mencionado antes, el cerebro humano no está por lo general preparado para entender un sistema no lineal, por lo que probablemente no se visualicen bien los retardos o las realimentaciones. Además de esto, en ningún caso se puede considerar que un modelo así tenga validez científica, y por si fuera poco, está sujeto a juicios y prejuicios del que realiza el modelo, al que le costará mucho romper la barrera que supone el sesgo de confirmación.

- **Modelos formales:** Toman como punto de partida los modelos mentales creados anteriormente, y a partir de ellos establecen una serie de relaciones formales, por lo general destinadas a su programación y posterior simulación por ordenador. Estos modelos ya tienen en cuenta las relaciones adecuadas entre los diferentes elementos y evitan los prejuicios mediante el uso de las matemáticas para establecer el funcionamiento del modelo. El modelo MEDEAS es un modelo de este tipo, siendo tan complejo que participan en su desarrollo diversas universidades de toda Europa.

Un modelo también se puede enfocar de diferentes maneras según el punto principal de interés del que le ha desarrollado.

- **Modelos conductistas:** Son modelos en los que lo importante son los datos de salida, y no el comportamiento interno del modelo. También se les llama modelos de caja negra, usando una analogía evidente. Para que un modelo de este tipo funcione y sea fiable se necesita una gran cantidad de datos históricos del sistema, y el modelo se crea para que ajuste a los datos disponibles. El principal problema de este tipo de modelos es que no son capaces de predecir cambios estructurales en el sistema, es decir, en otras palabras, sólo modelan con exactitud el sistema en el rango para el cual tenemos datos históricos. Si nos salimos de ese rango corremos el riesgo de que no se apegue para nada a la realidad.
- **Modelos estructuralistas:** También llamados de caja blanca, son los que la dinámica de sistemas utiliza, y de este tipo es el modelo MEDEAS. El modelo se desarrolla mediante el análisis detallado de los distintos elementos que lo conforman, y sus relaciones. De esta manera, al contrario que en los modelos de caja negra, lo importante es la lógica interna del modelo, aunque luego se puedan hacer ajustes con parámetros y valores históricos. Este tipo de modelos permite modelar sistemas con una mayor incertidumbre que los anteriores, y además admite cambios estructurales en las condiciones del sistema.

3.1.2.- Los diagramas causales

Consisten en una representación gráfica de un modelo.

En dicha representación, las variables se representan como nodos, que estarán unidos por las relaciones entre ellos, representados como flechas. Cada una de estas relaciones puede ser positiva o negativa, dependiendo de cómo se afecten las variables entre sí. Por ejemplo, si consideramos un sistema con tres variables, como pueden ser el tiempo de carga de un aparato, el tiempo de uso,

y la cantidad de batería que tiene, podemos ver relaciones tanto positivas como negativas. Una relación positiva sería la que relacionaría el tiempo de carga, con la cantidad de batería disponible, ya que cuanto mayor sea el tiempo de carga, mayor será la batería disponible (Ilustración 8). Sin embargo, la relación entre el tiempo de uso y la batería disponible será negativa, ya que, si el tiempo de uso aumenta, la cantidad de batería disminuye (Ilustración 9), al contrario que en el caso anterior.

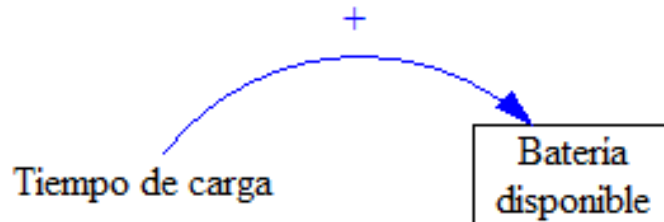


Ilustración 8.- Realimentación positiva

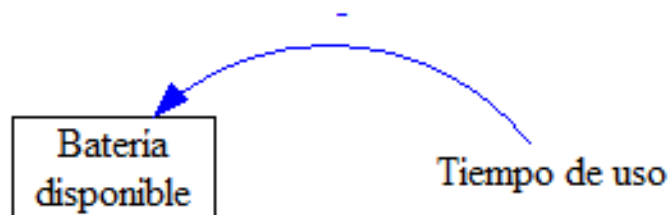


Ilustración 9.- Realimentación negativa

Esto, aunque parezca algo lógico, puede llevar a interpretaciones erróneas si no se es capaz de diferenciar entre causalidad y correlación, ya que por ejemplo, si introducimos una variable que sea la hora del día, la persona que realiza el modelo no tiene acceso al tiempo de carga, y el dispositivo se ha cargado siempre a una hora similar, se podría inferir que la batería depende de la hora del día, cuando no es así. Estos problemas, que en este ejemplo son tan evidentes y están muy exagerado, pueden aparecer de formas muy sutiles en modelos complejos, y se debe ser capaz de identificar cuándo suceden para que el modelo tenga validez.

En un sistema complejo, con diversas realimentaciones, es muy probable que se formen bucles de realimentación. Estos bucles también pueden ser positivos o negativos, y por lo general, los positivos no son para nada deseables. Un bucle positivo se produce cuando lo componen un número par de relaciones negativas, y lleva a situaciones inestables del sistema, y uno negativo cuando el número de relaciones negativas es impar, lo que por lo general lleva al sistema a una situación estable.

3.1.3.- Los diagramas de flujo

También denominados diagramas de Forrester, son la traducción de un diagrama causal a una forma matemática que permite al ordenador procesar la información introducida.

En ellos aparecen los siguientes elementos:

- Flujos: Determinan las relaciones entre los elementos, y por lo general dependen del tiempo. En VenSim se representan como una válvula.
- Stocks: Son acumulaciones de datos, y están unidos por los flujos, que son los que se encargan de variarlos. Se representan mediante un rectángulo. También puede haber stocks que vengan de fuera del modelo, por lo general infinitos (por ejemplo, en el modelo de los clientes de un supermercado, los clientes vendrían de, e irían a un stock externo al modelo, que representaría el entorno), y que son llamados fuentes o sumideros dependiendo de si son de entrada o de salida.
- Variables auxiliares: Son el resto de parámetros del modelo, variables o constantes, y desarrollan mejor las relaciones existentes.

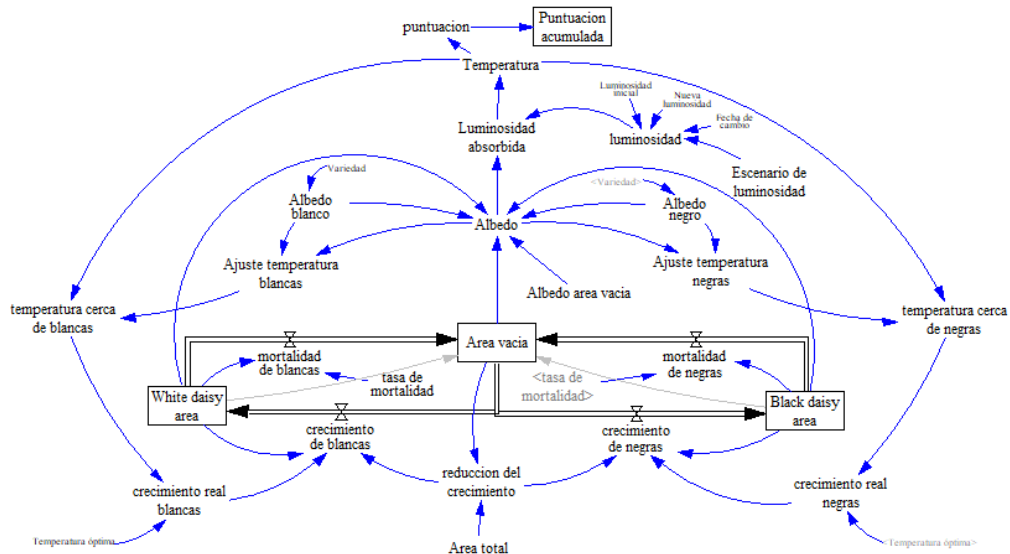


Ilustración 10.- Ejemplo de sistema complejo "DaisyWorld"

En la Ilustración 10 está representado un sistema complejo realizado en la asignatura de "Dinámica de Sistemas complejos", consistente en la auto regulación de la temperatura en un planeta cubierto por flores blancas y superficie vacía, en función de diversos parámetros, como el albedo de las diferentes zonas, la luminosidad de la estrella, la mortalidad y el crecimiento de las flores, las temperaturas óptimas de vida de las diferentes variedades...

Este ejemplo sirve para demostrar que con la dinámica de sistemas no sólo se pueden modelar sistemas como líneas de producción, industrias, o en general los sistemas que a la vista parecen más deterministas, sino que se puede modelar cualquier tipo de sistema, con la limitación eso sí, de los datos disponibles.

Para esto también es importante separar las variables y relaciones relevantes de las que no lo son, puesto que un sistema no tiene por qué ser más preciso cuanto más complejo sea. Puede que haya elementos que no sean necesarios para la simulación o no aporten la información suficiente como para que su introducción en el modelo resulte positiva. Por ejemplo, en el modelo de la Ilustración 10 quizás se podría haber tenido en cuenta la composición del suelo. Sin embargo, puede que las diferencias en dicha composición sean tan pequeñas que los cambios que produzcan en el modelo sean despreciables, o que directamente no se introduzcan para reducir la complejidad.

3.1.4.- Modelado

El proceso de creación de un modelo se puede dividir generalmente en 5 fases:

- **Articulación del problema:** También denominada “selección de fronteras”, consiste en decidir qué problema queremos solucionar con la creación de un modelo. Para ello debemos tener en cuenta el horizonte temporal, desde cuándo ha partido y hasta cuando se prevé que llegue, cuáles son las variables clave que lo forman, y realizar una búsqueda exhaustiva de datos históricos y previsiones, si existen.
- **Formulación de hipótesis:** Una hipótesis es según la RAE una “suposición de algo posible o imposible para sacar de ello una o más consecuencias” («REAL ACADEMIA ESPAÑOLA», 2019). Para crear la hipótesis debemos investigar si existen modelos matemáticos que ya se hayan encargado del problema, o de otros similares, y si existen, modificarlos para nuestras necesidades. También se deben dividir las variables identificadas en el paso anterior en variables endógenas (las que son explicadas por el modelo), exógenas (las que influyen al modelo, es decir, el entorno, pero que no son afectadas por el comportamiento del modelo) y las excluidas, que como su nombre indica son las que se ha decidido dejar de lado, ya sea por su baja importancia o porque no se consideran necesarias.
- **Formulación del modelo dinámico de simulación:** Es el modelo formal generado a partir de la hipótesis, y pretende probarlas, o rechazarlas. Se realiza mediante programas de simulación por ordenador, que al fin y al cabo son representaciones gráficas de un modelo matemático subyacente.
- **Pruebas:** Para mejorar el modelo. Se puede afinar para el rango de valores que suponemos que van a tomar las variables según las hipótesis, aunque es muy recomendable someter al modelo a condiciones extremas, y a cambios de paradigma, y comprobar si funciona en condiciones iniciales radicalmente distintas a las originales.
- **Diseño de políticas de mejora:** En función de los distintos escenarios a aplicar, se evalúan diferentes políticas de mejora, sus efectos sobre el sistema, el destino que alcanzan, y se comparan con el resultado esperado para intentar elegir la que más se ajuste a nuestras necesidades.

3.2.- VenSim

VenSim es el programa en el que está desarrollado el modelo MEDEAS (sobre el que vamos a trabajar más adelante), y se trata de un software que permite programar y simular modelos creados siguiendo la lógica de la dinámica de sistemas. Este trabajo ha sido realizado utilizando la versión “VenSim® DSS 8.1.1”.

Es muy importante el hecho de que se trata de un entorno de programación gráfica, lo cuál ayuda mucho a comprender algo más intuitivamente el funcionamiento de los modelos creados de esta manera. Partiendo de un diagrama causal o de Forrester, se puede crear un modelo tan complejo como se desee mediante la introducción de sus distintos elementos y fórmulas (Ilustración 11).

También permite la introducción de grandes cantidades de datos en bruto a partir de, por ejemplo, hojas de Excel, y la escritura de los datos resultado de la misma forma.

Permite la utilización de diferentes métodos de integración para la realización de los cálculos, como son Euler o Runge-Kutta.

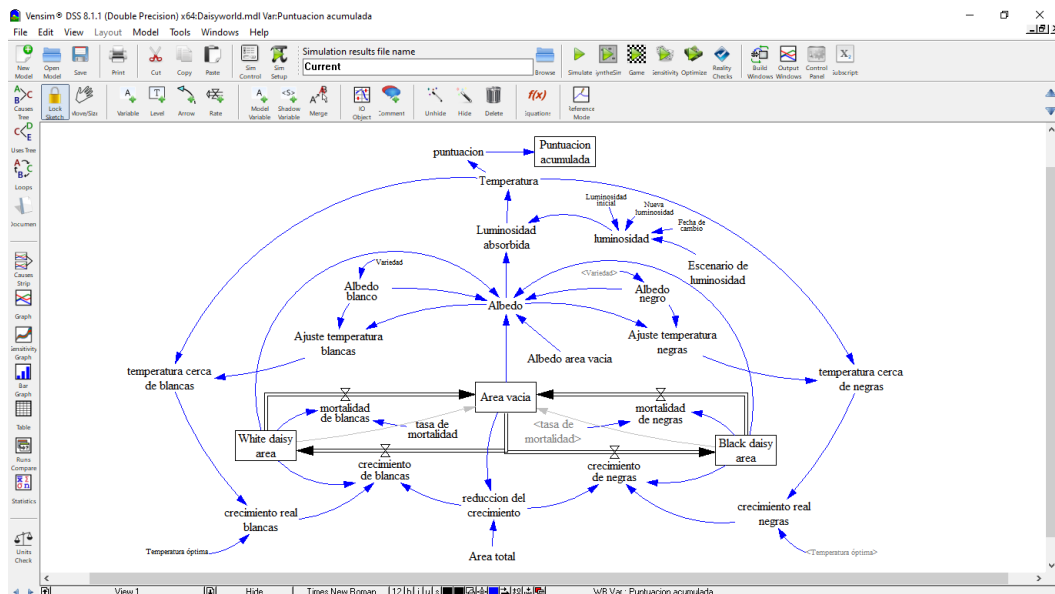


Ilustración 11.- Interfaz de usuario de VenSim

3.3.- Identificación de las tecnologías eólicas actuales y potencialmente futuras relevantes.

Existen multitud de tecnologías eólicas diferentes, clasificables según diversos aspectos.

La principal diferencia entre aerogeneradores radica en el lugar en el que se han construido, diferenciando los modelos onshore, los más comunes, que han sido construidos en tierra firme, y los offshore, o molinos marinos, construidos sobre el lecho marino. Por lo general, debido a su localización los aerogeneradores terrestres van a ser menos complejos en cuanto a su construcción se refiere, pero algo menos eficientes que sus homólogos marinos debido a la distribución habitual de los vientos.

La segunda clasificación que voy a realizar, y la que voy a desarrollar en este apartado va a tener tres bloques principales:

- Según el material o la forma de construcción de la torre de contención, es decir, de la estructura del aerogenerador, tanto para molinos onshore como offshore.
- Según el anclaje al lecho marino en el caso concreto de los molinos offshore.
- Según el modelo de generador de electricidad utilizado. Esta última categoría a mi juicio es la más importante, ya que en ella radica la mayor parte de las diferencias en la eficiencia que vamos a conseguir, y en el generador es donde vamos a encontrar los materiales críticos que son el objetivo de estudio.

Vamos a centrarnos exclusivamente en el aerogenerador como estructura independiente, y no en todos los elementos anexos a su construcción, como el cableado para el transporte de la energía generada o centros de transformación, que, aunque necesarios, no forman parte directamente de la estructura.

3.3.1.- Clasificación de aerogeneradores según su torre de contención

3.3.1.1.- *“Full-concrete, field cast towers”*

La torre de contención de estos modelos de molinos está construida en hormigón armado, y directamente fabricada en la localización final. Con estos modelos se pueden alcanzar alturas desde 60 hasta 120 metros, utilizando una torre de contención hueca que puede ir desde los 3 hasta los 8 metros de diámetro dependiendo de la altura de la estructura, lo cual permite potencias de salida máximas de hasta 3-4 MW. Son las turbinas más pesadas, con entre 8 y 19 toneladas de peso por cada metro de altura, pero proporcionan una enorme resistencia y durabilidad.

Permiten ahorrar costes de transporte, al no ser necesario transportar partes prefabricadas de la estructura al lugar de construcción, pero consumen muchos recursos materiales y tiempo de construcción, ya que se deben transportar los materiales en bruto a la zona, y se debe esperar a que cada sección de la torre fragüe para iniciar la construcción de la siguiente.

Existe un gran problema en la construcción de este tipo de estructuras, y es la dependencia de la meteorología. La mezcla de hormigón debe adaptarse a las condiciones meteorológicas, y si no se realiza correctamente se pueden producir graves inestabilidades estructurales, o incluso grietas que afectan a la integridad estructural de la torre.

Se construye por secciones verticales, por lo general de unos 4 metros de altura (von der Haar & Marx, 2015), y la propia torre debe estar diseñada para soportar no sólo su peso, sino también el del andamio utilizado para su construcción, que, una vez acabada la construcción de una sección, se levantará sobre sí mismo para continuar con la siguiente parte.

Debido a que el hormigón no soporta apenas esfuerzos de tracción, se suele pretensar con el armazón de acero para así conseguir una leve pero constante compresión de manera natural en el hormigón que evite posibles esfuerzos futuros de tracción.

Otro elemento para considerar es el tamaño de los cimientos, que pueden acercarse a los 20x20 m², con un grosor de 2m, lo cual provoca serios problemas de temperatura en el proceso de solidificación de la mezcla que pueden dar lugar a un mayor estrés del esperado sobre la estructura, a grietas, o a una mayor probabilidad de degradación futura del material.

3.3.1.2.- “Precast concrete towers”

Las torres de contención de estos modelos son similares en tamaño y materiales a las anteriores, con la diferencia de que éstas constan de anillos de hormigón prefabricado montados con la ayuda de grúas unos sobre otros y ensamblados in situ.

Al estar dichos anillos fabricados en una planta especializada, y con condiciones climatológicas controladas, se pueden conseguir elementos de mucha mayor calidad y en un tiempo más corto, eliminando los problemas de las condiciones meteorológicas, o las reacciones exotérmicas de endurecimiento, lo cual permite reducir el diámetro de la torre de contención de los aerogeneradores más grandes de los aproximadamente 8 metros de los anteriores modelos hasta los 5 metros.

Sin embargo, al ser necesario transporte, los aerogeneradores de gran tamaño son más caros. A pesar de esta complicación, se alcanzan tamaños y potencias similares a los del anterior tipo.

El montaje se realiza de forma que las juntas de cada segmento no estén colocadas directamente una sobre otra, sino rotadas 90 o 60°, para aumentar la resistencia estructural de la torre, de forma similar a como los ladrillos de una casa se colocan intercalados.



Ilustración 12.- Construcción de una torre de hormigón prefabricado

3.3.1.3.- “Tubular steel towers”

La torre de contención de estos modelos de molinos está construida en acero. Con estos modelos se pueden alcanzar alturas desde 60 hasta 120 metros con una torre de contención hueca desde los 3 hasta los 4,5 metros de diámetro, pero con un mucho menor grosor en las paredes que en sus homólogos de hormigón. Esto hace que sean mucho más ligeras, pudiendo llegar a pesar tan sólo entre 2 y 5 toneladas por metro de altura, una cuarta parte que sus equivalentes de hormigón. Esto también ayuda a reducir los costes de transporte.

Suelen tener una forma ligeramente cónica truncada, y estar formadas por sucesivos anillos apilados verticalmente. Se deben añadir refuerzos que prevengan la deformación de la estructura en una forma ovalada.



Ilustración 13.- Construcción de una torre de acero

3.3.1.4.- “Lattice steel towers”

Similares en apariencia a las actuales torres de alta tensión. Consumen una cantidad de materiales enormemente reducida, pero presentan problemas en cuanto a los esfuerzos mecánicos que pueden soportar, y por lo tanto son muy vulnerables a cualquier tipo de esfuerzo inesperado (Das & Shivakumar, 2015).

Esto influye en el hecho de que el generador de energía que pueden soportar en su parte superior debe ser más ligero que en los otros casos.

Pueden alcanzar alturas desde los 60 hasta los 160 metros, con una torre de contención distinta a todo el resto de modelos que, al no ser maciza, puede tener diámetros o perímetros del tamaño necesario, sin una aproximación concreta, y son las más ligeras, entre 2 y 3 toneladas por metro de altura.

Son muy fáciles de transportar y de ensamblar, ya que no es necesario el transporte de enormes y pesadas partes de la estructura como en los otros casos, sino que son muy modulares, lo cual las hace una opción muy barata.

La forma de la torre más utilizada para modelos grandes es la cónica, y se ha observado que las torres más pesadas por lo general son las que más resistencia a esfuerzos proporcionan.



Ilustración 14.- Torre de acero en celosía

3.3.1.5.- "Spiral-welded steel towers"

Pueden aumentar la integridad estructural de la torre al presentar un diseño espiral en lugar de cilíndrico, similar a los sistemas de elevación "spiralift". Un spiralift es un actuador lineal utilizado para el levantamiento de grandes pesos, cuya principal ventaja es que es telescópico, por lo que no es necesario espacio para el almacenaje del sistema de elevación cuando está en reposo. Consta de una lámina de acero que según se va desenrollando, toma forma cilíndrica consiguiendo un resultado final de una columna telescópica. Es utilizado, por ejemplo, en el Teatro Real de Madrid para levantar escenarios.

Este tipo de aerogeneradores aprovechan este principio, aunque sin la movilidad, en una torre fija. Su montaje final se realiza in situ, a partir de hojas de acero enrolladas que son cortadas de forma trapezoidal y soldadas, eliminando las limitaciones de tamaño impuestas por el transporte de las piezas de la torre en los anteriores modelos, lo cual permitiría la construcción de torres de mayor diámetro y altura, y, por lo tanto, con potencial para producir una mayor cantidad de energía. También reducirían las posibilidades de colapso de la estructura, al aumentar su integridad estructural con este diseño (Jay et al., 2016).

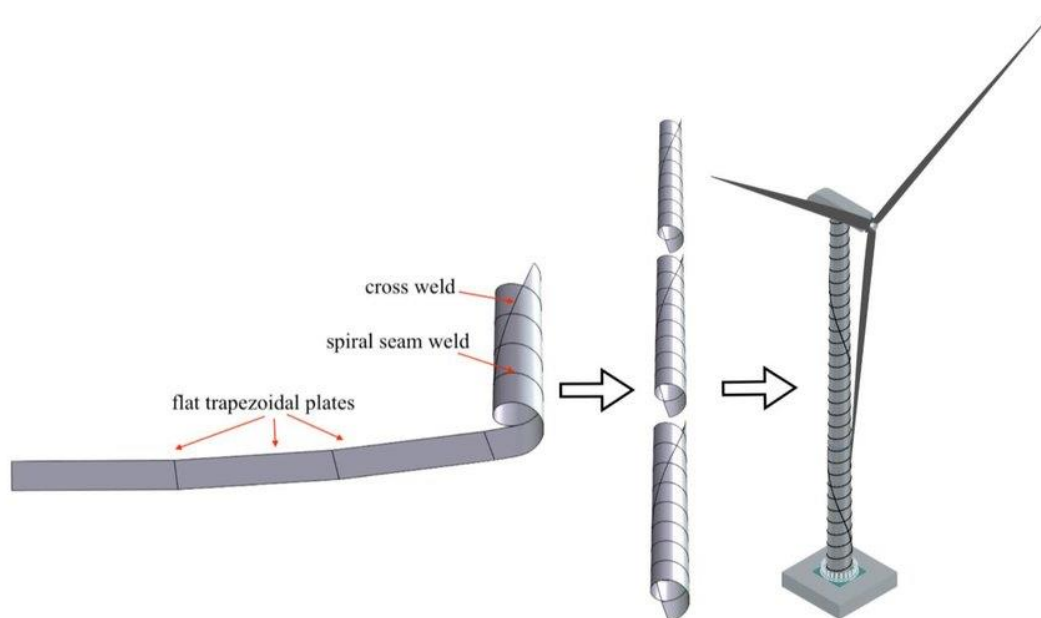


Ilustración 15.- Torre del tipo "spiralift"

3.3.1.6.- Estructuras híbridas de hormigón y acero

Permiten alcanzar alturas desde los 80 hasta los 140 metros, con diámetros de su torre de contención de entre 3 y 5 metros, y una relación peso/altura muy variable, ya que su construcción puede variar enormemente dependiendo de las necesidades, y de la proporción de hormigón y acero utilizada, de entre 3 y 15 toneladas por cada metro de altura.

Con este tipo de torres se pretenden utilizar las ventajas de cada uno de los modelos que anteriormente se han enumerado para tratar de reducir los puntos débiles de cada tipo de estructuras.



Ilustración 16.- Torre híbrida hormigón-acero

Las más utilizadas, por su baja complejidad, y gran resistencia probada son las torres de hormigón y las de acero.

Según informes especializados (*Wind Tower Market Size, Share, Growth | Global Forecast [2020-2027], 2020*) el 54,4% de las torres construidas son en hormigón, principalmente por el ahorro de costes que suponen en molinos de gran tamaño, con en torno a un 43% de share para las construidas en acero, y un 2,5-3% para las torres híbridas entre estos dos materiales. El share del resto de modelos es despreciable, apenas se utilizan, ya que por lo general se prefieren utilizar las torres más comunes y con eficacia probada, que probablemente debido a las economías de escala resulten más económicas en la práctica.

3.3.2.- Clasificación de aerogeneradores según su tipo de generador

Al considerar el proceso de construcción de un sistema generador de energía para un molino eólico, distinguimos dos modelos principales, los que constan de una caja de cambios para regular la velocidad de rotación del generador en función de la velocidad de rotación del eje, y los llamados “Direct Drive”, en los que la energía mecánica entrante al generador procede directamente del eje de las palas.

Si nos centramos en el tipo de generador, se puede clasificar también de dos formas. Los excitados eléctricamente, que constan de una serie de rotores bobinados que, cuando el rotor externo, es decir, en nuestro caso el eje de las palas del molino gira a una velocidad de rotación mayor que la velocidad síncrona del generador, se transmite una fuerza electromagnética que se convertirá posteriormente en electricidad, y los que constan de un imán permanente, en los que el campo permanece constante.

Resumiendo las principales ventajas de cada sistema (Bang et al., 2008), los generadores que cuentan con una caja de cambios son más baratos, más pequeños, y más ligeros, pero los “Direct Drive”, al no depender tanto de partes mecánicas, son superiores en cuanto a la reducción de costes de mantenimiento, fiabilidad, y eficiencia. En los inicios de estas tecnologías, los sistemas de caja de cambios eran más populares, aunque la tendencia está cambiando, y los sistemas “Direct Drive” están creciendo cada vez más. Lo mismo pasa con los que constan de un imán permanente, que cada vez amplían su cuota de mercado.

3.3.2.1.- Síncronos

Los generadores síncronos funcionan mediante la inducción electromagnética, según marca la Ley de Faraday, induciendo diferencias de potencial entre un campo magnético y un conductor eléctrico.

Suponen aproximadamente un 80% de la cuota de mercado en aerogeneradores terrestres, y un 40% en los marinos (Junne et al., 2020), y en crecimiento constante.

3.3.2.1.1.- SG-PM-DD

Constan de un generador síncrono, de imán permanente, y sin caja de cambios (Direct Drive). Las palas de la turbina están directamente conectadas al generador, lo que hace que estos modelos operen a una menor velocidad de giro, al no poder aumentar mecánicamente mediante una caja de cambios.

Estos modelos son los que menos mantenimiento requieren, lo cual les hace ideales especialmente para los modelos offshore, a los que es más difícil acceder para reparar posibles averías.

3.3.2.1.2.- SG-PM-MS y SG-PM-HS

Constan de un generador síncrono, de imán permanente, y con caja de cambios. Dependiendo de su velocidad se clasifican como MS (“Medium Speed”) o HS (“High Speed”).

Permiten aumentar la velocidad efectiva del generador mediante la mencionada caja de cambios y adecuarla según la velocidad real del viento. Además, necesitan un imán permanente más pequeño que los que no constan de una caja de cambios. Además, por lo general, cuanto mayor sea la velocidad del modelo menor es el tamaño del generador necesario.

3.3.2.1.3.- SG-E-DD

Constan de un generador síncrono, excitado eléctricamente, y sin caja de cambios. Necesitan generadores más pesados que sus homólogos sin caja de cambios. Tienen la gran ventaja de no necesitar un imán permanente como los anteriores, y eso hace que apenas consuman materiales críticos como Neodimio o Disprosio, como sí hacen los modelos anteriores. Actualmente están mucho más extendidos que los anteriores, aunque en un declive progresivo.

3.3.2.2.- Asíncronos

Los generadores asíncronos constan de una jaula bobinada con cobre que, si se utiliza como generador, haciéndose girar a una velocidad mayor que la velocidad síncrona del generador, inducirá una corriente eléctrica que podrá ser suministrada a la red.

Con este tipo de generadores resolvemos los problemas de utilización de materiales críticos que tenemos en los imanes permanentes de los modelos anteriores, pero surge el problema de las grandes cantidades de cobre necesarias para el bobinado de la jaula, como se aprecia en la Tabla 1.

El cobre no es considerado crítico por la Unión Europea, y por lo tanto, no aparece en sus estudios. Sin embargo, muchos autores como (Valero et al., 2018) lo consideran un material con elevado riesgo de desabastecimiento, ya que tienen en cuenta más elementos como las reservas estimadas en el subsuelo. Además, al ser necesario para una gran cantidad de sectores económicos adicionales, el modelo MEDEAS, sobre el que vamos a trabajar, ya tiene en cuenta unos consumos muy grandes de cobre, por lo que debemos ser cuidadosos.

El 20% restante de la cuota de mercado terrestre, y 60% marina (Junne et al., 2020) está ocupada por este tipo de generadores. Apenas se fabrican nuevos aerogeneradores con esta tecnología, aunque al ser extenso el parque existente actualmente, se debe tener muy en cuenta.

3.3.2.2.1.- AG

Constan de un generador asíncrono, excitado eléctricamente, con caja de cambios, pero se está quedando obsoleto al ser menos eficiente y más costoso de mantener que el resto de modelos, y aunque todavía existen muchos modelos con esta tecnología, apenas se fabrican nuevos de este tipo.

3.3.2.2.2.- DF

Generadores asíncronos con doble alimentación (Muller et al., 2002). Permiten reducir el coste del inversor, y mejorar el rendimiento general con respecto a los de tipo "AG".

3.3.3.- Clasificación de aerogeneradores offshore según su anclaje al lecho marino

3.3.3.1.- “Semi-submersible platform”

Se caracteriza por flotar parcialmente sumergida en la superficie del mar, y por estar anclada al lecho marino con catenarias. Para estabilizar este tipo de molinos se suelen requerir estructuras de una gran superficie y peso.

3.3.3.2.- “Spar-buoy”

Su base consta de una boya cilíndrica alargada vertical, lo que permite mantener el centro de gravedad muy bajo y así aumentar la estabilidad. Es fácil de fabricar, pero complicada de transportar y ensamblar, y suele estar restringida a aguas de más de 100 metros de profundidad.

3.3.3.3.- “Tensión-leg platform”

Consta de una estructura flotante semi sumergible anclada al lecho marino con cables de amarre. La tensión producida permite que la estructura sea más pequeña y ligera, pero aumenta las fuerzas que soporta el resto de la estructura. Además, presenta graves riesgos de inestabilidad global en el caso de que uno de los amarres falle.

Estos tres sistemas (Ilustración 17) se emplean principalmente en parques eólicos situados mar adentro, donde la gran profundidad del lecho marino hace imposible el anclaje directo, por lo que la base es flotante y se ancla al lecho mediante cables (*Floating Offshore Wind Market Technology Review, 2020*).

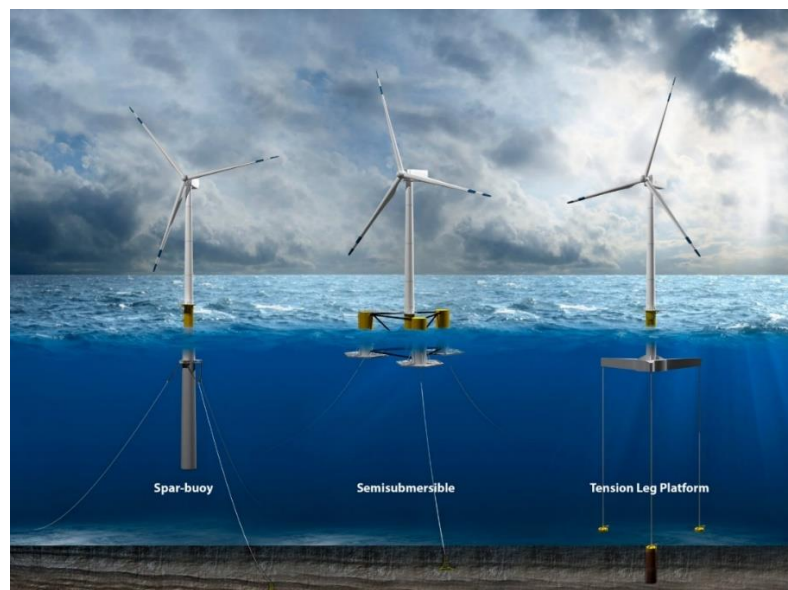


Ilustración 17.- Anclaje mediante cables (*Floating Offshore Wind Market Technology Review, 2020*)

En el caso de sistemas eólicos más cercanos a la costa se emplean cimentaciones más convencionales (Ilustración 18), en las que el aerogenerador es anclado directamente al lecho marino, y no mediante cables (Igwemezie et al., 2019).

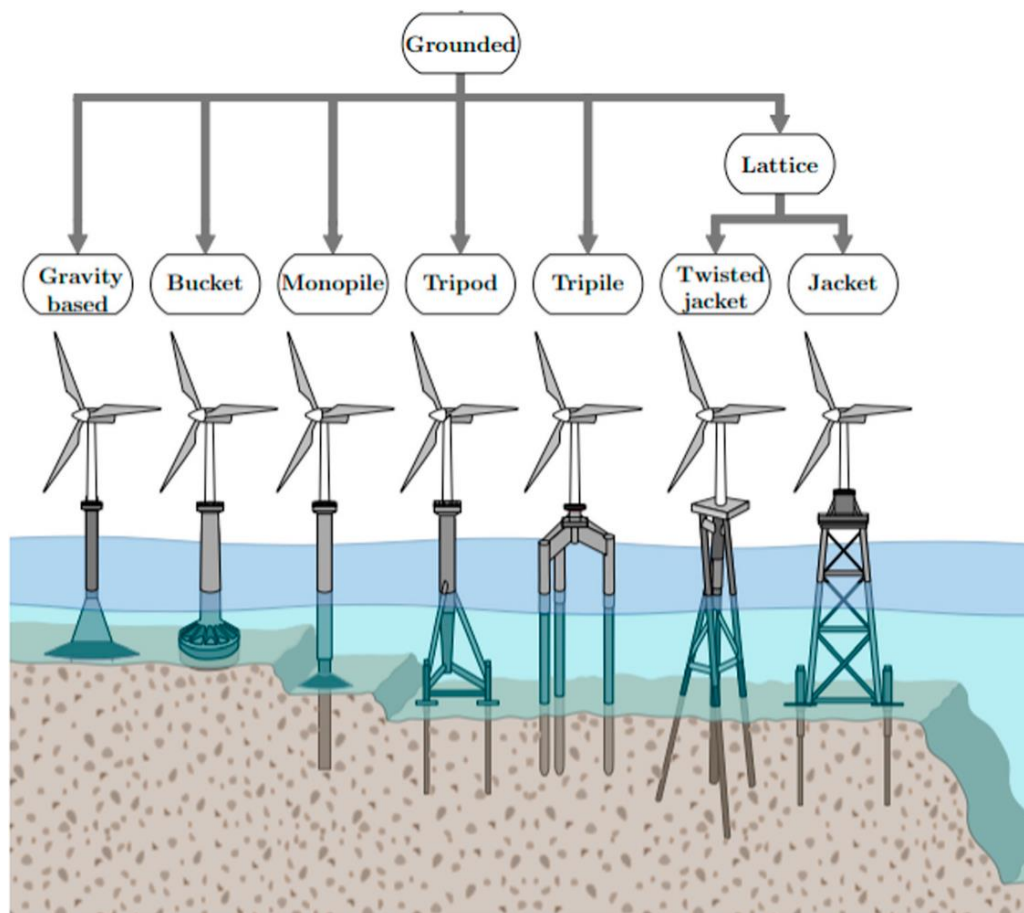


Ilustración 18.- Anclajes directos (Igwemezie et al., 2019)

3.3.3.4.- Monopilote

Se utiliza en aguas cercanas a la costa, con una profundidad del lecho marino no superior a los 15 metros, y consiste principalmente en un cilindro de acero que se entierra lo suficiente como para sujetar la torre. Cuanto menor sea la estabilidad estructural del suelo, mayor deberá ser la profundidad del monopilote, sirviendo para suelos blandos de arena o arcilla.

3.3.3.5.- De gravedad

Se utiliza en aguas con una profundidad no superior a 30 metros, y requiere una mayor preparación previa del terreno, al enterrarse en el lecho como cimentación una plataforma de hormigón o acero mucho más ancha que en el anterior modelo.

3.3.3.6.- De trípode

Para aguas algo más profundas, pueden estar basadas en un monopilote que a la hora de la cimentación se divide en tres anclajes distintos para aumentar la estabilidad de la turbina en aguas algo más profundas, o que desde la misma base del molino se divida en tres pilotes menores durante todo el tramo sumergido.

3.3.3.7.- “Jacket”

Se utiliza para anclajes directos al lecho marino en zonas con una profundidad mayor de 30 metros, y consta de una estructura en celosía con varios puntos de anclaje, a diferencia de las anteriores, que estaban ancladas en un solo punto. No es adecuada para suelos rocosos por su alta complejidad de instalación. Son similares a las “lattice towers” onshore, asemejándose en su forma a una torre de alta tensión.

Todas ellas son utilizadas en función de la zona de la costa en la que se emplaza el aerogenerador al que deben sustentar.

Si investigamos acerca del share de los diferentes tipos de anclajes, los datos más fiables (*Offshore Wind Power Market Share, Statistics | Global Forecast, 2026, 2019*) nos muestran que un 70% de los molinos eólicos offshore se sitúan en zonas en las que el lecho marino está a menos de 30 metros de profundidad, por lo que es probable que utilicen cimentaciones y anclajes del segundo grupo tratado, mientras que el restante 30% se sitúan en aguas más profundas, aunque se espera que para 2026 esta cifra alcance el 50% debido a las inversiones que se están realizando en este sentido, ya que cuanto más mar adentro se encuentra un aerogenerador, generalmente es mayor el aprovechamiento del viento.

Adicionalmente a esto, se está experimentando con estructuras híbridas que generen electricidad tanto de forma eólica como mareomotriz en la misma plataforma, aunque no será objeto de este estudio.

3.4.- Cuotas de mercado y previsiones

Para realizar este análisis debemos separar entre dos escenarios posibles:

- “CONT”: Un escenario continuista, que extrapola las tendencias actuales del mercado, que asume que sólo las tecnologías que han alcanzado la suficiente madurez están listas para ser producidas, instaladas, y utilizadas a gran escala, y que la investigación para abaratar tecnologías más novedosas apenas va a existir.
- “TC”: Un escenario de mejora tecnológica, en el que se tienen en cuenta las previsiones existentes de implantación en el mercado de todas las tecnologías existentes, hayan o no alcanzado su mayor grado de madurez. También asume que se seguirá investigando acerca de las tecnologías más novedosas, y en general, se trata de un escenario mucho menos conformista.

El estudio más importante en este sentido es el realizado por Tobias Junne (Junné et al., 2020), que nos muestra unas previsiones bastante razonables y bien fundamentadas.

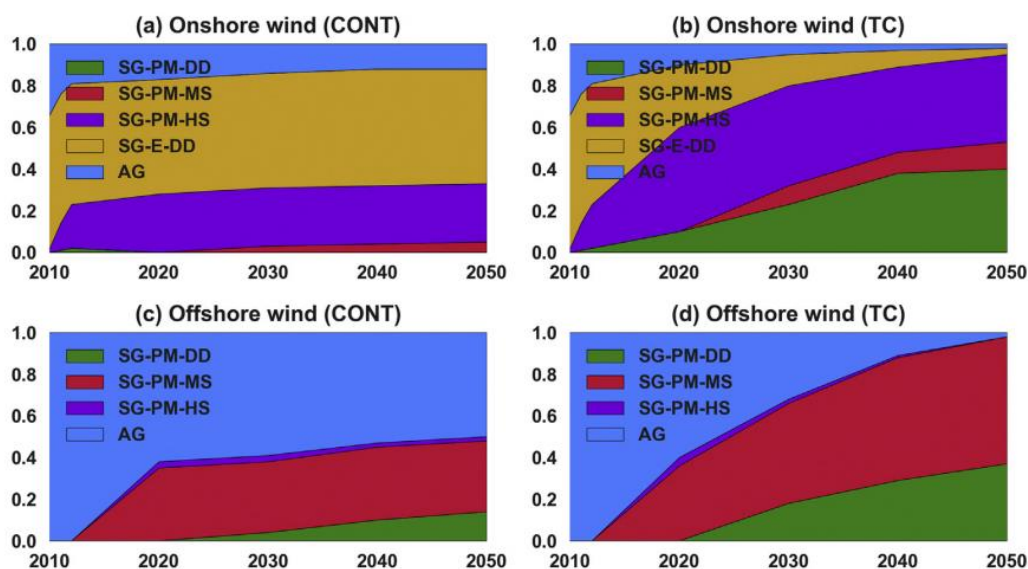


Ilustración 19.- Proyección de la cuota de mercado de las diferentes tecnologías (Junné et al., 2020)

Analizando estos gráficos lo primero que vemos es que actualmente el mercado de generación eólica offshore está dominado por los generadores de tipo AG, modelo del cual se fabrican cada vez menos unidades, pero manteniéndose el parque actual, por su baja eficiencia y su complicado mantenimiento. Esto hace

que el escenario continuista no tenga demasiado sentido, ya que es mucho más probable que en el futuro se construyan aerogeneradores más eficientes y de mejor calidad.

El escenario de cambio tecnológico parece mucho más plausible, ya que asume que cuando se vayan reemplazando los molinos obsoletos que finalicen su vida útil, se irán reemplazando por modelos más modernos, con imanes permanentes, y tendiendo a reducir el uso de las cajas de cambios, como parece que dictan las previsiones, ya que las enormes facilidades en el mantenimiento de una estructura tan aislada como es un aerogenerador offshore, compensan con creces, por el momento, cualquier otra desventaja.

En el caso concreto de los aerogeneradores terrestres, que copan actualmente el 95,5% de la cuota de mercado global, según datos de la WWEA (Ilustración 3), se puede observar que los más populares actualmente son los excitados eléctricamente sin caja de cambios. Sin embargo, en el escenario de mejora tecnológica los que utilizan un imán permanente parecen ir a copar el mercado en menos de 30 años, a pesar de la escasez de materiales críticos necesarios para el imán permanente que montan.

Si analizamos las previsiones de otro estudio también reciente (Viebahn et al., 2015), podemos observar estimaciones similares.

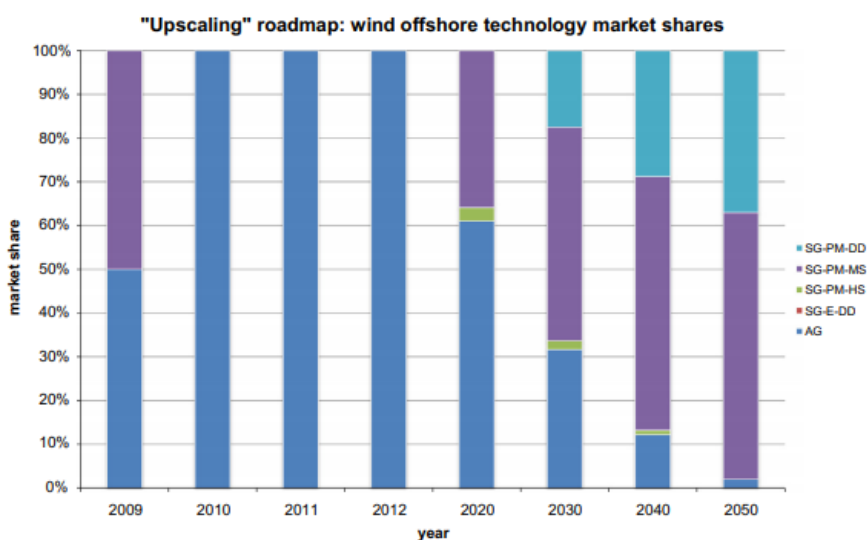


Ilustración 20.- Cuota de mercado para aerogeneradores offshore en el escenario de mejora tecnológica (Viebahn et al., 2015)

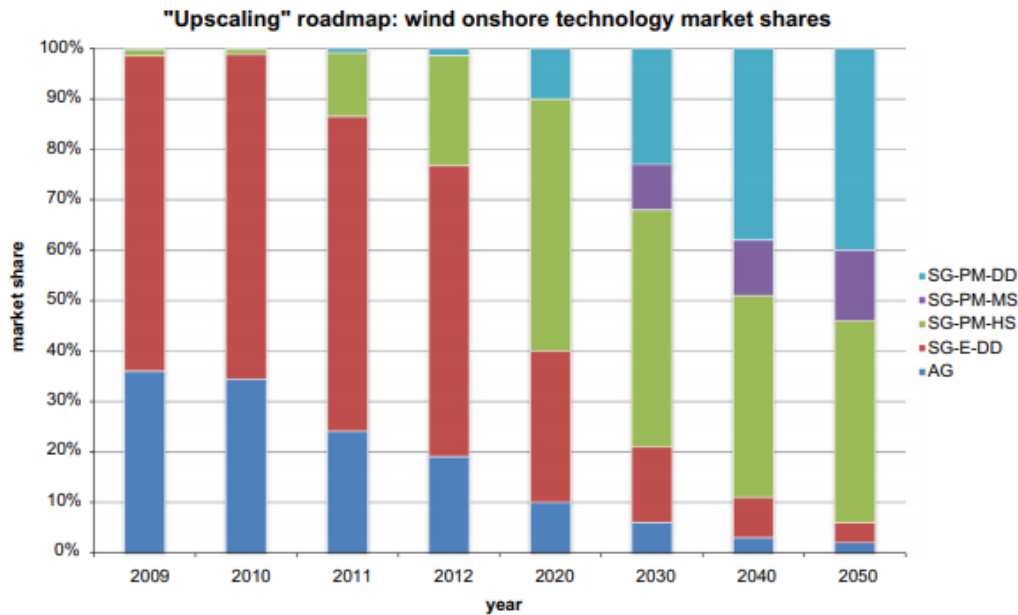


Ilustración 21.- Cuota de mercado para aerogeneradores onshore en el escenario de mejora tecnológica (Viebahn et al., 2015)

Las enormes similitudes entre ambas previsiones son evidentes. Esto es un buen síntoma, parecen robustas, y las asumiremos a partir de ahora.

En todos los casos se aprecia una tendencia a la reducción de los sistemas que constan de un generador asíncrono debido a la baja eficiencia que representan con respecto a sus tecnologías competidoras.

El mayor crecimiento es para los generadores sin caja de cambios, que sustituyen a modelos más obsoletos como los asíncronos, y a los síncronos excitados eléctricamente, principalmente debido a que esto supone unos mucho menores costes de mantenimiento al contener un mucho menor número de partes mecánicas móviles.

Los modelos con un imán permanente, que, aunque consumen una gran cantidad de materiales críticos para su fabricación, tienen una eficiencia más elevada que compensa estas desventajas, también se espera que vayan a sufrir un crecimiento muy importante.

Esto nos deja con una situación en la que para el año 2050, si no se producen faltas de stock o dificultades en el aprovisionamiento de materiales críticos, el mercado puede llegar a estar ocupado casi exclusivamente por molinos de imán permanente, y repartido de forma bastante equitativa entre los que utilicen o no una caja de cambios. Si esto no ocurre, veremos más adelante cómo podrá reaccionar el mercado en nuestra simulación.

3.5.- Intensidades de materiales en aerogeneradores

3.5.1.- Materiales críticos en la Unión Europea

Es evidente que uno de los activos más importantes y estratégicos de la sociedad actual son los recursos minerales. Dependemos de ellos para todos los aspectos de la vida, aunque muchas veces no seamos conscientes de ello.

Para Manuel Regueiro (Regueiro y González-Barros, 2014), reputado geólogo, un material es considerado crítico cuando existe un riesgo real de que se produzca escasez en el suministro de ese mineral, y adicionalmente, que dicha escasez produzca un impacto sobre la economía más elevado que el de otras materias primas no consideradas críticas.

Esto puede ocurrir por diversos motivos, como pueden ser la poca extracción global o la baja cantidad presente en la corteza terrestre, pero también puede ocurrir por la concentración de las minas en un determinado territorio que controle su exportación, lo que se agrava si dicho territorio es políticamente inestable, o por la decisión de las extractoras de dicho mineral de no suplir toda la demanda para así subir los precios.

Según la Unión Europea, un material crítico es aquel que es un prerequisite necesario para el correcto desarrollo de sectores estratégicos como las energías renovables, la movilidad eléctrica, la defensa, la industria aeroespacial, y las tecnologías digitales (Bobba et al., 2020).

Vemos que no existe una definición específica acerca de lo que es un material crítico, sino que depende de la interpretación que se le otorgue, y de los intereses del que lo considera como tal.

La Unión Europea elabora regularmente una lista con todos los minerales considerados críticos en nuestro territorio, en función de las industrias para la que se utilizan (Blengini et al., 2020).

La lista más reciente es la siguiente:

- Antimonio (antimony)
- Berilio (beryllium)
- Cobalto (cobalt)
- Fluorita (fluorspar)
- Galio (gallium)

- Germanio (germanium)
- Grafito (graphite)
- Indio (indium)
- Magnesio (magnesium)
- Niobio (niobium)
- Derivados del platino como:
 - Platino (platinum)
 - Paladio (palladium)
 - Iridio (iridium)
 - Rodio (rhodium)
 - Rutenio (ruthenium)
 - Osmio (osmium)
- Tierras raras como:
 - Itrio (yttrium)
 - Escandio (escandium)
 - Lantano (lanthanum)
 - Cerio (cerium)
 - Praseodimio (praseodymium)
 - Neodimio (neodymium)
 - Prometio (promethium)
 - Samario (samarium)
 - Europio (europium)
 - Gadolinio (gadilinium)
 - Terbio (terbium)
 - Disproso (dysprosium)
 - Holmio (holmium)
 - Erbio (erbium)
 - Tulio (thulium)
 - Iterbio (ytterbium)
 - Lutecio (lutetium)
 - Tantalio (tantalum)
 - Tungsteno (tungsten)
- Metales preciosos como:
 - Oro (gold)
 - Plata (silver)
 - Renio (rhenium)
 - Telurio (tellurium)

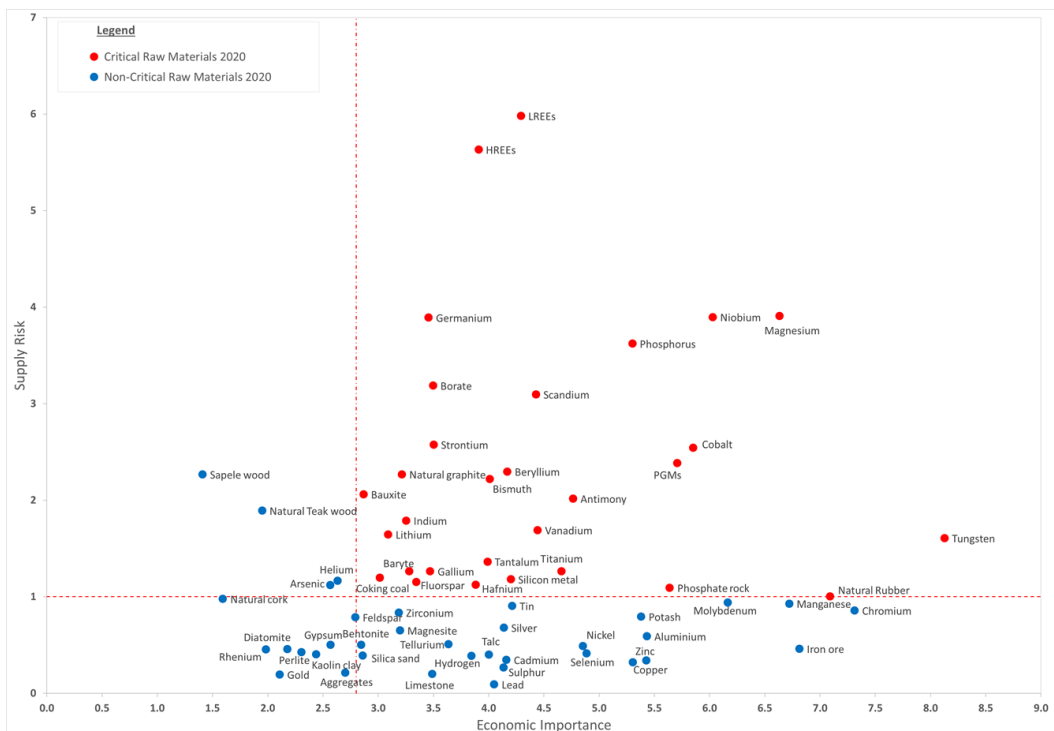


Ilustración 22.- Materiales críticos para la Unión Europea (Blengini et al., 2020)

3.5.2.- Materiales críticos para la construcción de aerogeneradores

La Unión Europea también distingue estos materiales según el sector productivo al que van dirigidos (*European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020*). Los materiales utilizados en la construcción de un aerogenerador promedio son, por tanto:

- En la torre, aspas y eje:
 - Hierro: Aleado con carbono en forma de acero, tanto para las torres, como para las palas y el eje.
 - Cromo: También aleado en el acero, principalmente en el eje y las palas.
 - Manganeso: En las aleaciones de acero.
 - Molibdeno: De nuevo aleado junto al hierro.
 - Níquel: En el acero, y en otras aleaciones que forman parte del rotor.
 - Niobio: Microaleado en aceros de alta resistencia para la torre. Brasil (85%), Canadá (13%).
 - Aluminio: Como elemento de baja densidad, para reducir el peso de la góndola y palas.

- En el imán permanente:
 - Boro: Como aditivo en los imanes NdFeB (compuestos por Neodimio, Hierro y Boro), y como lubricante.
 - Hierro: Componente principal del imán.
 - Neodimio: Componente principal del imán.
 - Disproso: Aditivo que proporciona estabilidad al imán a altas temperaturas.
 - Praseodimio: Aditivo para el imán.
- Para el generador:
 - Cromo.
 - Aluminio.
 - Níquel.
 - Cobre: Utilizado principalmente para cables y bobinados.
 - Plomo: Para soldaduras y revestimientos en el caso de la transmisión de energía en aerogeneradores marinos.

De estos materiales, el Neodimio, Praseodimio, Disproso, Boro y Niobio se encuentran en la lista de materiales críticos para la Unión Europea. Por lo tanto, se da por supuesto que el suministro de los demás está relativamente asegurado y afianzado.

Figure 18. Raw materials used in wind turbines

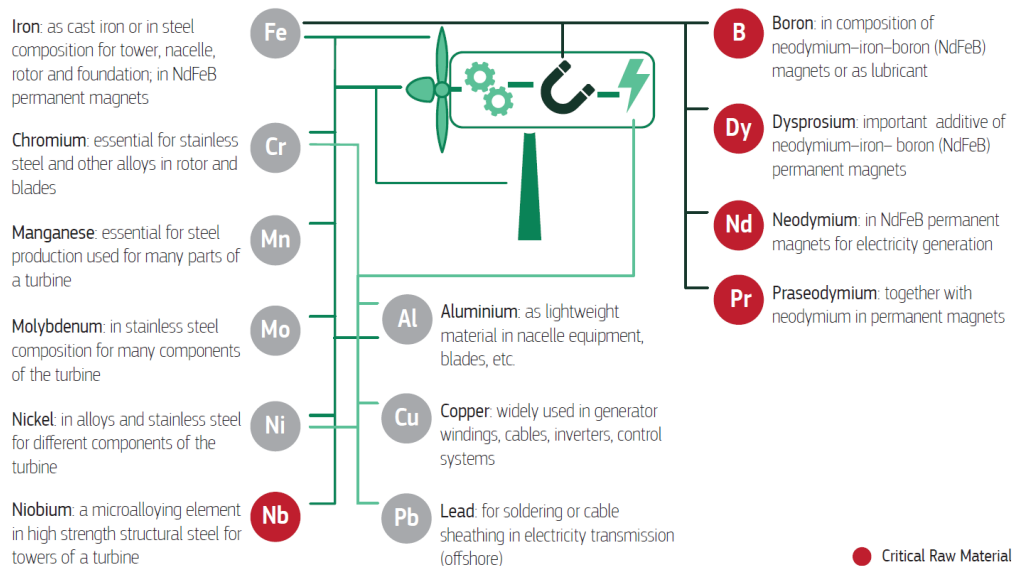


Ilustración 23.- Utilización de materiales en los componentes de un aerogenerador (Bobba et al., 2020)

Además de estos, otros autores (Kim et al., 2015) identifican otra serie de elementos que, aunque en menor medida, también son utilizados para estas construcciones.

- Fluorita: Méjico (25%), España (14%), Sudáfrica (12%), Bulgaria (10%) y Alemania (6%).
- Cobalto: Congo (68%), Finlandia (14%) y Guayana francesa (5%).
- Galio: Alemania (35%), Reino Unido (28%), China (27%) y Hungría (2%).
- Oro.
- Indio: Francia (28%), Bélgica (23%), Reino Unido (12%), Alemania (10%) e Italia (5%).
- Magnesio: China (93%).
- Paladio: Rusia (40%), Sudáfrica (37%), Canadá (10%), Estados Unidos (6%) y Zimbabue (5%).
- Platino: Sudáfrica (71%), Rusia (13%), Zimbabue (7%) y Canadá (5%).
- Rodio: Sudáfrica (80%), Rusia (12%), Zimbabue (5%).
- Renio.
- Plata.
- Tantalio: Congo (36%), Ruanda (30%), Brasil (13%).
- Teluro.

Los porcentajes por país indicados en algunos de los minerales (sobre los que hay información disponible) representan la procedencia de cada material utilizado en la Unión Europea, según la propia Comisión Europea (Blengini et al., 2020).

3.5.3.- El imán permanente

A pesar de que actualmente la mayoría de los generadores existentes, al tener una muy prolongada vida media de entre 20 y 25 años, son de modelos ya obsoletos que no contienen un imán, la realidad es que el mercado cada vez busca más sustituir los tradicionales generadores por los modelos más modernos que constan de un imán permanente.

La composición de dichos imanes es variable pero los más utilizados son los imanes NdFeB, compuestos de Neodimio, Hierro, Boro, Praseodimio, Disproseo, y pueden incluir pequeñas cantidades de otros elementos como el Terbio, el Niobio o el Aluminio. Existe un segundo tipo de imán permanente de Samario-

Cobalto, pero es mucho menos común que los imanes NdFeB, debido principalmente a su menor fuerza magnética. Apenas hay literatura reciente sobre estos materiales, y no hay modelos de aerogeneradores que utilicen esta clase de imanes permanentes por lo que no la tendremos en cuenta para el estudio.

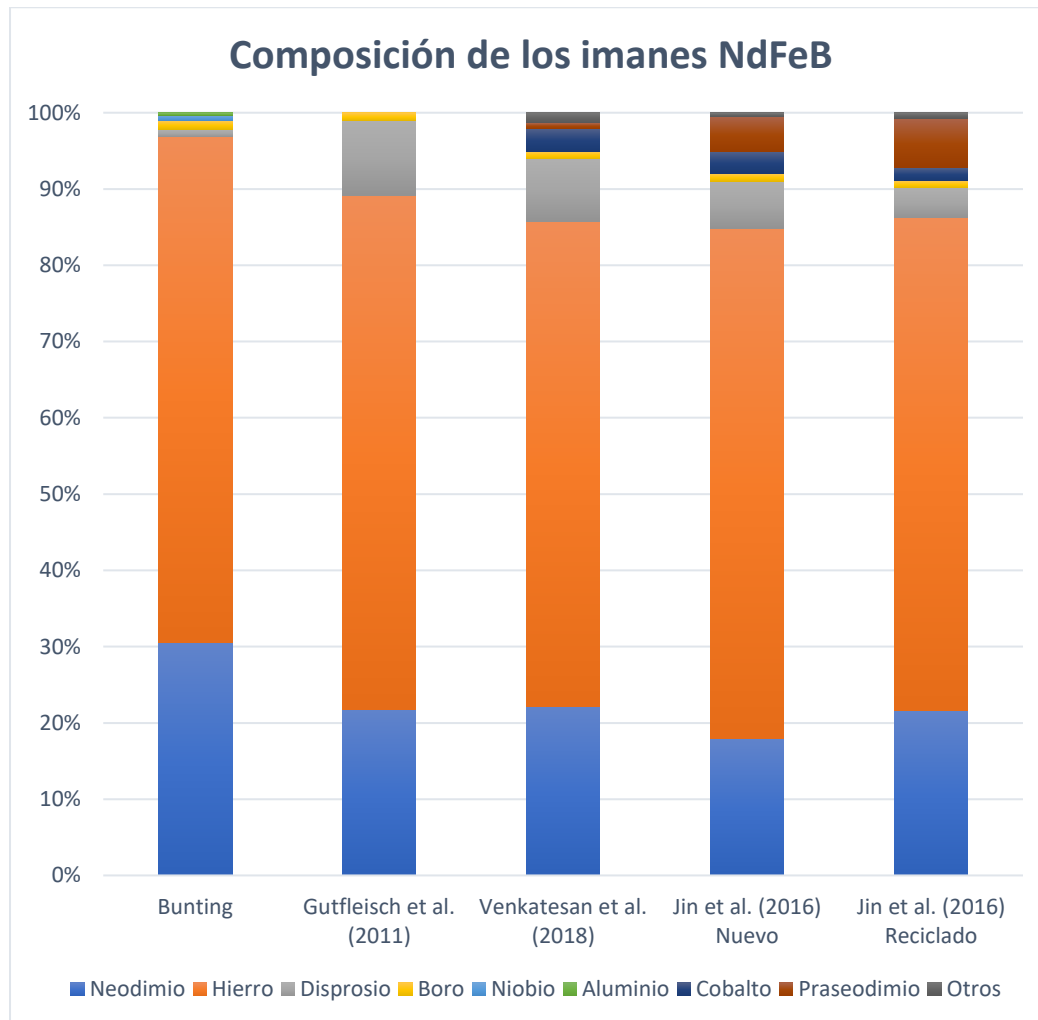


Ilustración 24.- Composición en masa de imanes NdFeB genéricos

Dependiendo del fabricante, la proporción en la que los diferentes elementos componen un imán permanente puede variar, no sólo en cantidades, sino también en qué tipo de aditivos se incluyen o no para tratar de mejorar el rendimiento.

Como su nombre indica, todos ellos incluyen una gran cantidad de Hierro, así como Neodimio y Boro, pero también incluyen Disproso, y pueden estar dopados con Niobio, Aluminio, Cobalto o Praseodimio.

Las composiciones más típicas, expresadas en porcentaje de masa total del imán, son las que aparecen en la Ilustración 24, y son las siguientes:

- 30,5% de Neodimio; 66,35% de Hierro; 1,1% de Boro; 0,3% de Aluminio; 0,75% de Niobio y 1% de disprosio según la marca Buntig («How Magnets Are Made», 2020).
- 21,77% de Neodimio; 67,44% de Hierro; 9,81% de Disprosio y 0,98% de Boro según (Gutfleisch et al., 2011).
- 22,21% de Neodimio; 63,54% de Hierro; 8,19% de Disprosio; 2,99% de Cobalto; 1% de Boro; 0,76% de Praseodimio y 1,31% de otros aditivos según (Venkatesan et al., 2018).
- 18% de Neodimio; 66,88% de Hierro; 6,15% de Disprosio; 4,6% de Praseodimio; 1,02% de Boro; 2,84% de Cobalto y 0,51% de otros aditivos, en el caso de un imán de nueva manufactura, según (Jin et al., 2016).
- 21,63% de Neodimio; 64,57% de Hierro; 3,96% de Disprosio; 6,43% de Praseodimio; 0,93% de Boro; 1,74% de Cobalto y un 0,74% de otros aditivos, en el caso de un imán hecho a partir de materiales reciclados, también según (Jin et al., 2016).

La mayoría de los artículos sobre este tema se centran en el Neodimio y el Disprosio, al ser los elementos más necesarios para la construcción de este tipo de imanes, y no se centran tanto en el Boro, a pesar de ser uno de los elementos que da nombre al imán.

El Hierro, al no ser crítico, y por lo tanto no existir potenciales problemas de suministro, no es modelado por estos estudios, aunque se da por hecho que aproximadamente el 70% de la masa de estos imanes está formada por este material.

El Boro, a pesar de ser un material crítico, no es tenido en cuenta en los estudios sobre intensidades materiales en imanes permanentes, debido la baja cantidad necesaria en los imanes permanentes, ya que sus principales usos son la fabricación de aceros especiales, aleaciones de gran resistencia a impactos, vidrios de borosilicato, y la que probablemente sea su aplicación más conocida, como amortiguador de control de reacciones en centrales nucleares, debido a su gran capacidad de absorción de neutrones.

El resto de materiales que aparecen recogidos en la Ilustración 24 no son esenciales en la fabricación de estos imanes, y son utilizados o no a discreción del fabricante, dependiendo de las propiedades que quiera conferir al imán.

Evidentemente, este tipo de imanes no sólo se utilizan en la construcción de turbinas eólicas. Según el estudio de (Yang et al., 2017), en 2015 el share de utilización de este tipo de imanes, destinaba el 43% de la producción a la fabricación de automóviles, en concreto en los motores de tracción de vehículos eléctricos, para hacerlos más compactos y densos en materia energética, el 17% a molinos eólicos (una demanda estimada de 8500 toneladas), un 15% a dispositivos mecánicos de almacenamiento de información (HDDs), un 14% a vehículos eléctricos o híbridos, y un 12% a bicicletas eléctricas y asimilables.

En total, la demanda anual de este tipo de imanes asciende a las aproximadamente 51000 toneladas, excluyendo la utilización en pequeñas cantidades de estos imanes en electrodomésticos y artículos de casa, que podrían suponer entre 10000 y 20000 toneladas adicionales.

En la Ilustración 24 observamos como uno de los estudios (Jin et al., 2016) diferencia entre imanes fabricados desde cero, e imanes fabricados con material reciclado. Junto con (Zakotnik & Tudor, 2015), están de acuerdo en que el reciclaje de este tipo de dispositivos es por lo general muy complicado, sobre todo en el caso de pequeñas cantidades en electrodomésticos o artículos de consumo habitual, al ser casi imposible separarlos del resto de componentes del dispositivo, mientras que en el caso de aerogeneradores o, por ejemplo, de escáneres de resonancias magnéticas, otra gran aplicación de los imanes permanentes, al estar muy bien diferenciados del resto de componentes, se hace mucho más viable su reciclaje.

Según el ya mencionado estudio de (Zakotnik & Tudor, 2015), se pueden reciclar hasta un 90% de las tierras raras presentes en un imán permanente, con la adición de tan solo un 5% de materiales nuevos con respecto a la masa de materiales inicial. Eso sí, esto sería un sistema cerrado en el que el reciclaje de los imanes permitiría fabricar nuevos imanes, pero no destinar los materiales reciclados a otras aplicaciones.

Existen intentos de lograr reducir la cantidad de materiales críticos necesarios para la creación de imanes permanentes, de los que hace un buen resumen (Pavel et al., 2017). Por ejemplo por parte de (Pathak et al., 2015), quién desarrolló un imán permanente sin disprosio y con un 20% menos de neodimio, sustituyéndolos por cobalto y cerio (que aunque también forman parte de las tierras raras, son mucho más baratas y abundantes). Sin embargo, no se pudo aplicar a gran escala. También se ha considerado el terbio como un sustituto del disprosio, pero su elevado precio hace inviable económicamente su uso a gran escala.

Además de esto, se está tratando de reducir la cantidad necesaria de estos materiales en los procesos de fabricación habituales, así como valorando hasta qué punto el reciclaje de estos componentes puede ayudar a reducir la demanda (Zakotnik & Tudor, 2015).

3.5.4.- Evolución temporal de intensidades materiales

El Neodimio y el Disprosio son los elementos críticos más importantes en cuanto a la construcción del imán permanente se refiere. Para analizar los requerimientos de estos materiales, vamos a investigar acerca del uso real que se les da en los tres modelos de aerogenerador que disponen de este tipo de imanes permanentes, como son SG-PM-DD, SG-PM-MS y SG-PM-HS.

Para la obtención de los valores, primero debemos saber la cantidad de imán necesaria para el correcto funcionamiento del aerogenerador. Al existir aerogeneradores de diversas potencias y tamaños, siempre vamos a referenciar los valores por cada MW de potencia.

Los valores más extendidos en la literatura, y que vamos a asumir aquí son de aproximadamente 650 kg/MW de imán permanente en los aerogeneradores del tipo SG-PM-DD, de 160 kg/MW para los SG-PM-MS y de 80 kg/MW para los SG-PM-HS (Viebahn et al., 2015) y (Lacal-Aránategui, 2015).

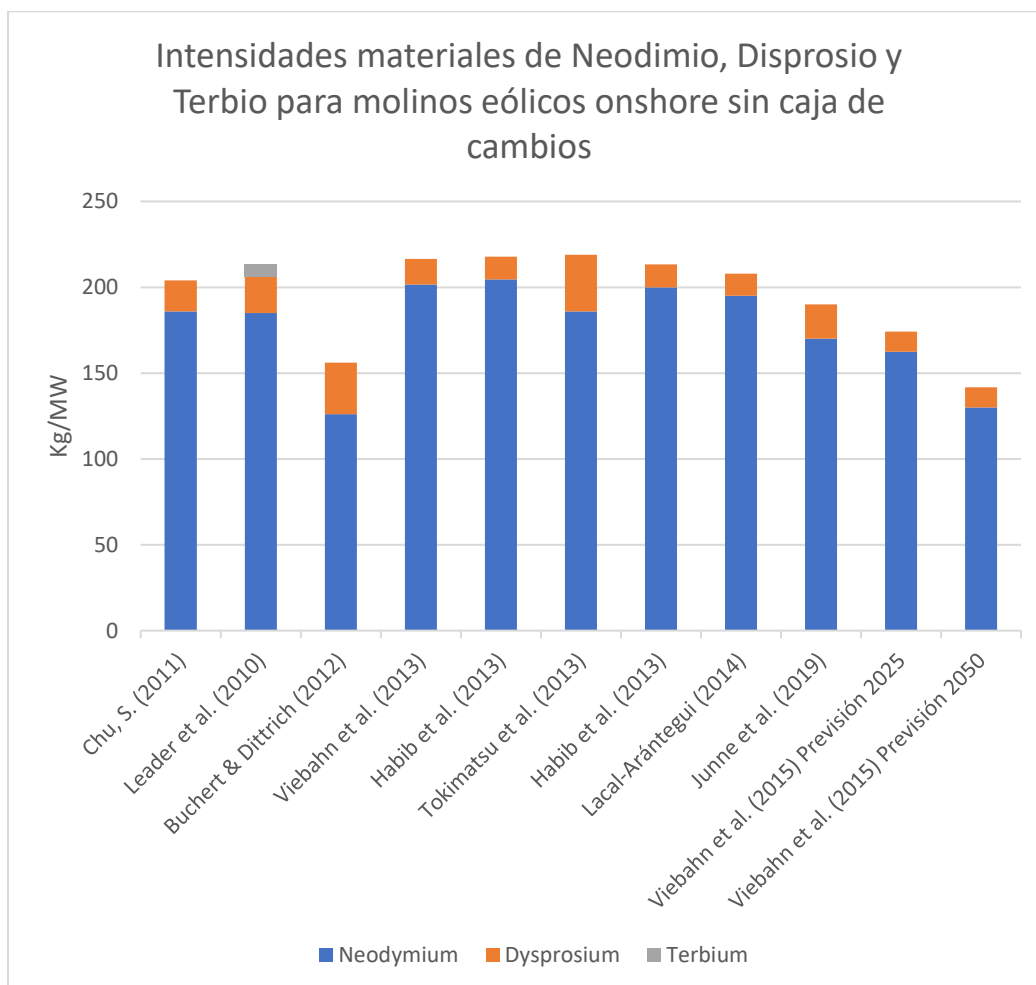


Ilustración 25.- Intensidades materiales de Neodimio, Disproσιο y Terbio en aerogeneradores SG-PM-DD

El Terbio sólo es tenido en cuenta en un estudio y supone una muy pequeña parte del total, por lo que lo consideraremos despreciable.

En la Ilustración 25 aparecen los estudios que he considerado más relevantes sobre este tema ordenados en orden cronológico, junto con dos previsiones a futuro. Ahora vamos a analizar por separado el Neodimio y el Disproσιο para tratar de extraer un patrón en la reducción de la intensidad necesaria.

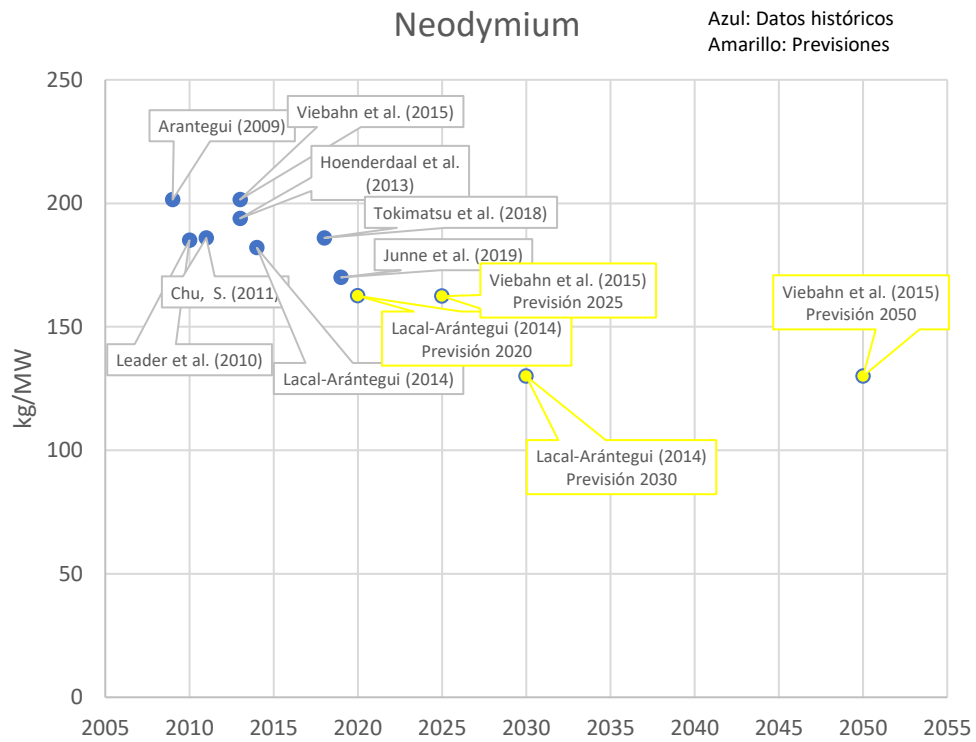


Ilustración 26.- Intensidades materiales de Neodimio en aerogeneradores SG-PM-DD

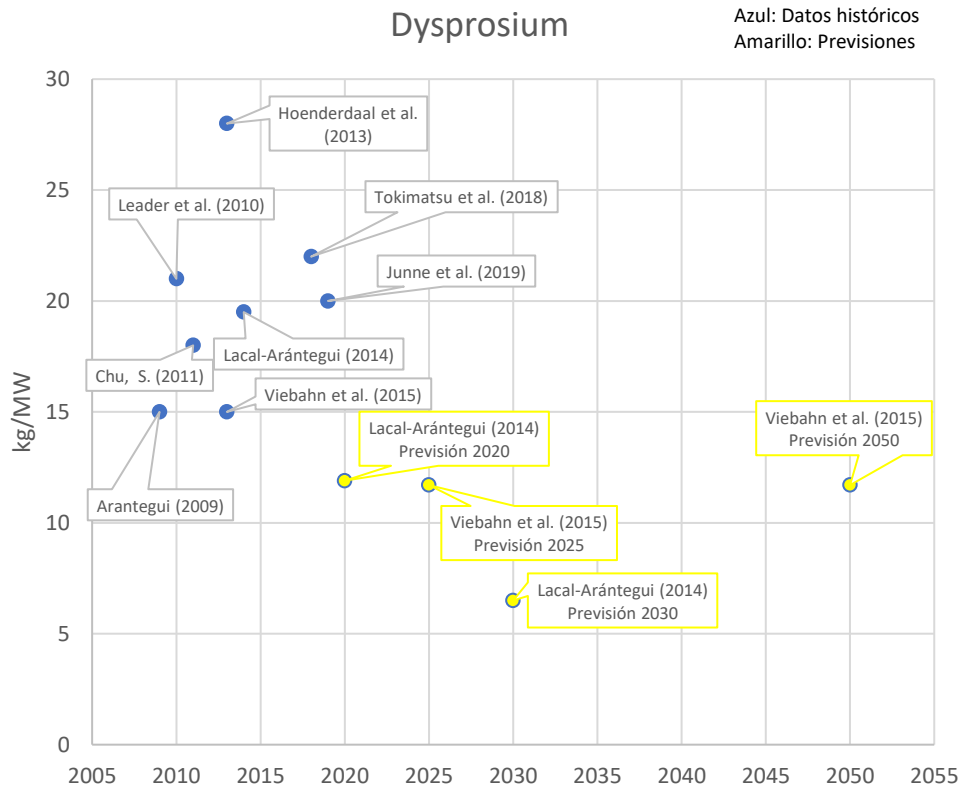


Ilustración 27.- Intensidades materiales de Disprosio en aerogeneradores SG-PM-DD

Si observamos la evolución temporal de Neodimio en la Ilustración 26, podemos observar cómo la intensidad material ha ido, en general, reduciéndose levemente en los últimos 15 años, dato que coincide bastante bien con las previsiones (en amarillo) estudiadas por (Viebahn et al., 2015).

Dichas previsiones tienen en cuenta la mejora en la fabricación de dichos imanes debido al aumento en la demanda de este tipo de aerogeneradores, lo que supondrá una mejora en los procesos de fabricación, y un aumento en la investigación, que darán como resultado una reducción en la intensidad de materiales necesarias de Neodimio y Disproseo. Las previsiones coinciden en llegar a un 20% de Neodimio y un 1% de Disproseo con respecto a la masa total del imán, aunque dichas previsiones asumen que la cantidad necesaria de imán no se reducirá, seguirá siendo de 650 kg/MW.

Por lo general, para el caso del Neodimio, la mayoría de autores consideran que supone alrededor del 31-32% del peso total de un imán permanente. Al ser dichos valores bastante estables y coherentes, es posible hacer una regresión. Sin embargo, debemos cambiar la escala temporal, ya que, si lo hacemos tomando el eje x desde 2000 hasta 2050, surgen problemas, al interpretar el programa que llevamos reduciendo la intensidad de neodimio desde el año 0.

Por esto vamos a utilizar un eje x auxiliar que vaya desde el 0 hasta el 50, en lugar de comenzar en 2000. Si hacemos esto, y ajustamos con una línea de tendencia potencial, que es la que más se ajusta al modelo, tanto visualmente, ya que ajusta muy bien los puntos existentes, como teóricamente, ya que la mejora será cada vez más lenta en el tiempo, a medida que se vaya acercando al óptimo, y tanto estadísticamente, ya que obtenemos un valor de R^2 elevado, obtenemos el resultado que aparece en la Ilustración 28.

La ecuación que podría modelar la intensidad material del Neodimio por tanto es $y = 374,89 * (x - 2000)^{-0,274}$, donde y es la intensidad material en Kg/MW, y x es el año por considerar, comenzando desde el 2000 (que hemos considerado como año 0). Esto nos arroja unas previsiones para 2025 de en torno a 155 Kg/MW, para 2050 de 128,3, y para 2100 de 106,1 Kg/MW.

Si eliminamos las previsiones de (Viebahn et al., 2015) y (Lacal-Aránzategui, 2015), obtenemos una moderación en el descenso de Neodimio necesario, pero aun así seguimos consiguiendo una reducción muy importante, de 172 kg/MW para 2025, 157,91 para 2050, y 144,31 para 2100.

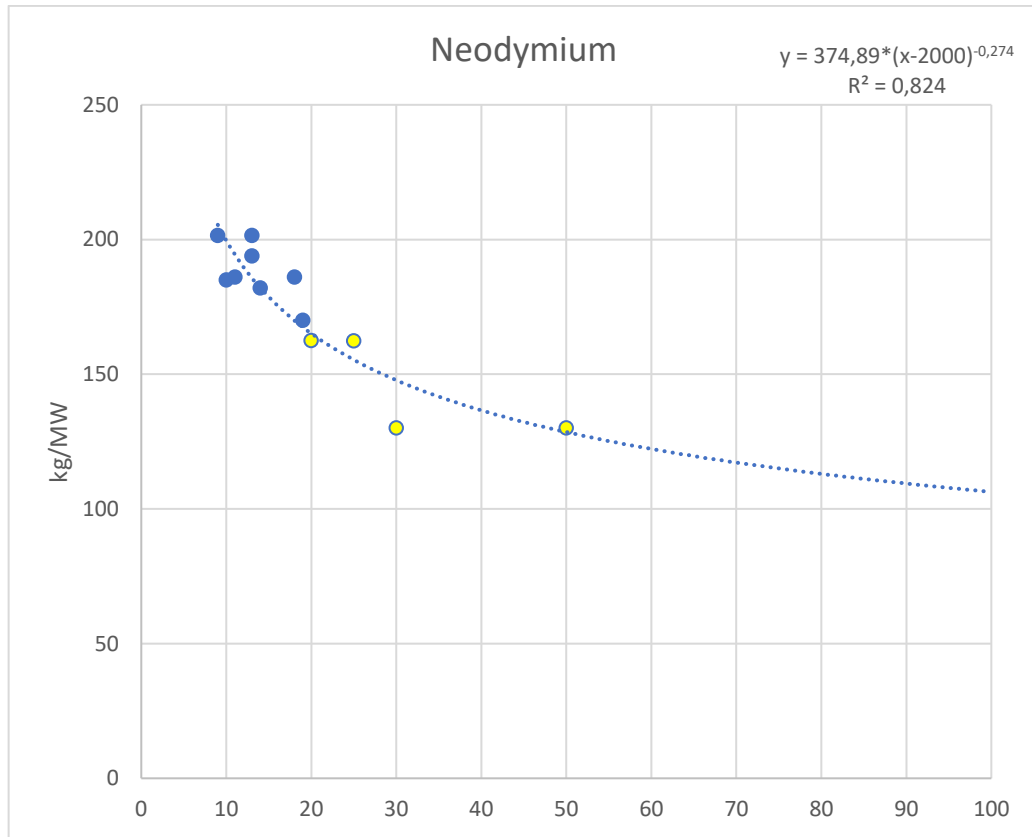


Ilustración 28.- Regresión del Neodimio en SG-PM-DD

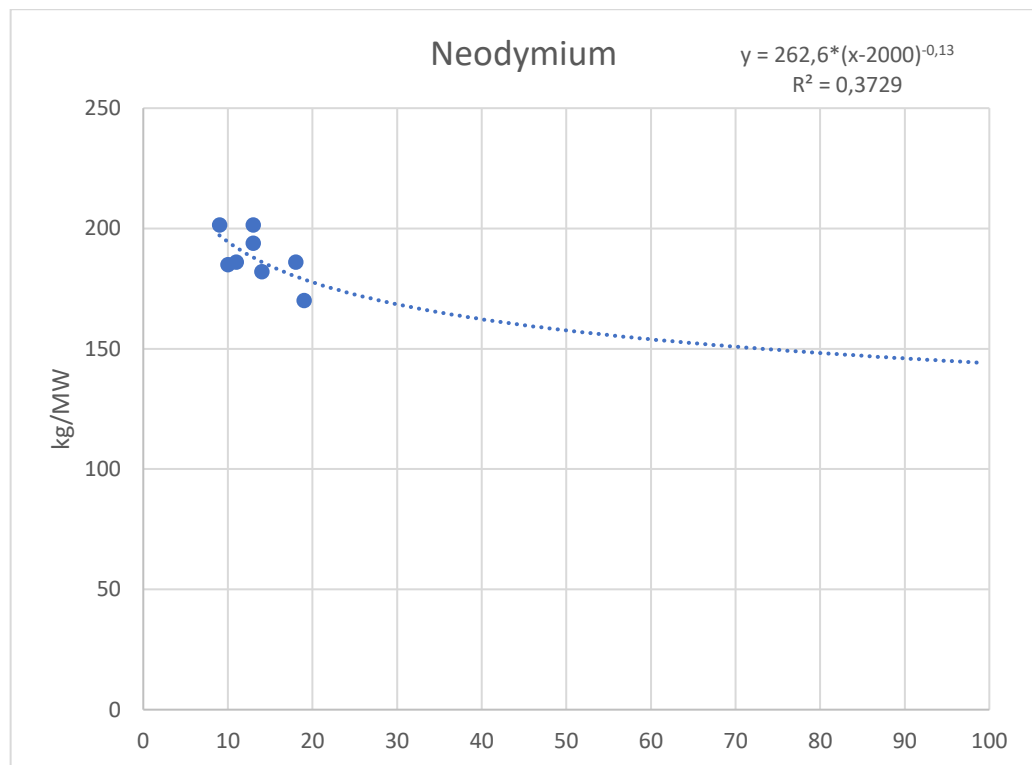


Ilustración 29.- Regresión del Neodimio en SG-PM-DD sin previsiones

Sin embargo, en el caso de Disproσιο (Ilustración 27), se observan valores de intensidades materiales sin una tendencia apreciable. Esto puede ser explicado si observamos la composición de los imanes permanentes reflejada en la Ilustración 25. En ella podemos observar cómo la composición de neodimio de diferentes imanes permanentes permanece relativamente constante (en torno a un 30% del total del imán), mientras que la composición en disprosio varía desde un escaso 1% hasta un 6%, lo cual es probable que cause estas enormes discrepancias entre las intensidades materiales de disprosio en molinos eólicos.

Debido a estas discrepancias en la composición, en este caso es necesario considerar qué porcentaje del total del imán se ha considerado como Disproσιο en cada uno de los estudios utilizados, siendo lo más común de en torno a un 3%, pero pudiendo llegar hasta un 4,5%, para ser muy rebajado en las previsiones hasta un 1,8%. El valor de un 1% en 2030 (Lacal-Aránategui, 2015) es considerado incluso por él mismo como demasiado optimista, por lo que no voy a tener en cuenta esa dato concreto para realizar las regresiones.

Los puntos amarillos se tratan de estimaciones según los estudios de (Viebahn et al., 2015) y (Lacal-Aránategui, 2015), para los cuales los autores coinciden en suponer una intensidad material de un 1,8% del total de la masa del imán como estimación a futuro.

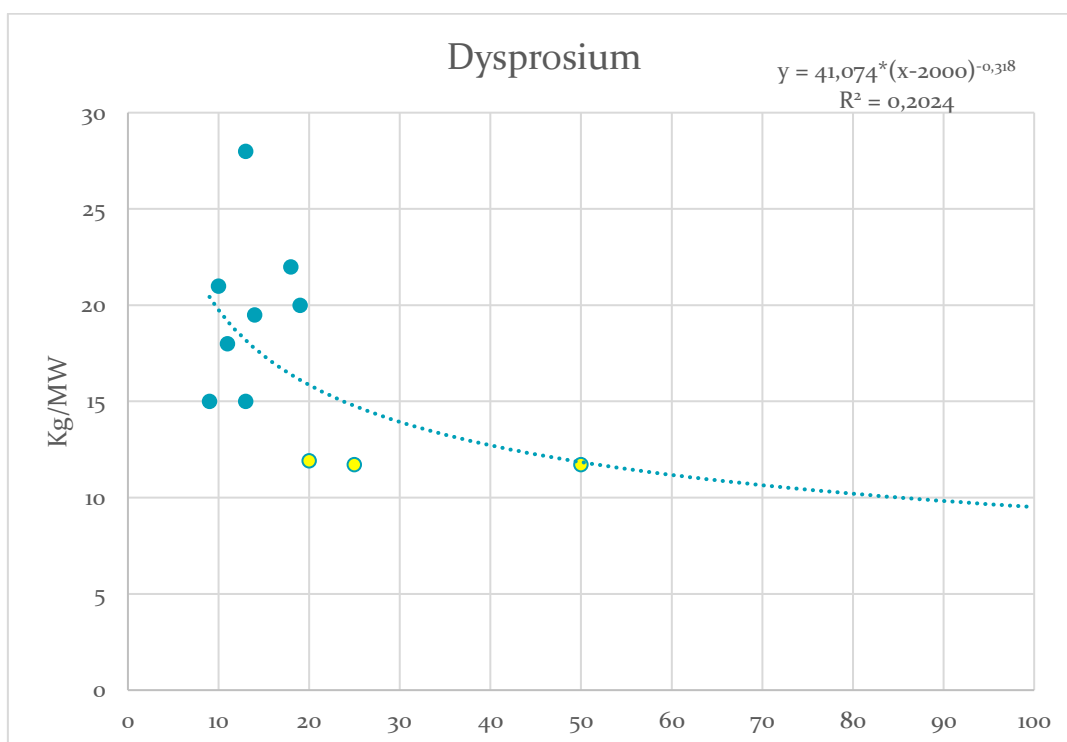


Ilustración 30.- Regresión del Disproσιο en SG-PM-DD

Apenas tiene sentido realizar una regresión sobre estos datos. Si intentamos realizar una regresión similar a la anterior, la ecuación que podría modelar la intensidad material del Disproσιο sería $y = 41,074 * (x - 2000)^{-0,318}$, aunque al contrario que en el caso del Neodimio, donde se apreciaba una tendencia clara, en este caso no parece para nada fiable.

Si miramos, por ejemplo, el dato atípico más elevado, de 28 Kg/MW, y analizamos por qué se produce, vemos que en dicho estudio se han considerado imanes permanentes con composiciones de Disproσιο del 4,5%, muy diferente a los habituales porcentajes de entre el 2,3 y el 3%, mucho más habituales en el resto de estudios. Lo que sí que parece claro en este caso, es que todas las previsiones coinciden en asignar un futuro valor de 1,8% para la composición de los futuros imanes de Disproσιο.

La realidad es que los valores dependen casi exclusivamente del porcentaje de Disproσιο en la composición del imán, por lo que, aunque no hay datos sobre los aerogeneradores concretos de los que se han extraído los datos, esto sería lo realmente relevante, para poder apostar por dichos modelos si no ven reducida su eficiencia al utilizar imanes distintos. Actualmente los valores más comunes son de en torno a un 3% del peso del imán, e imanes de unos 650 Kg/MW, por lo que el valor de 19,5 Kg/MW parece el más razonable actualmente.

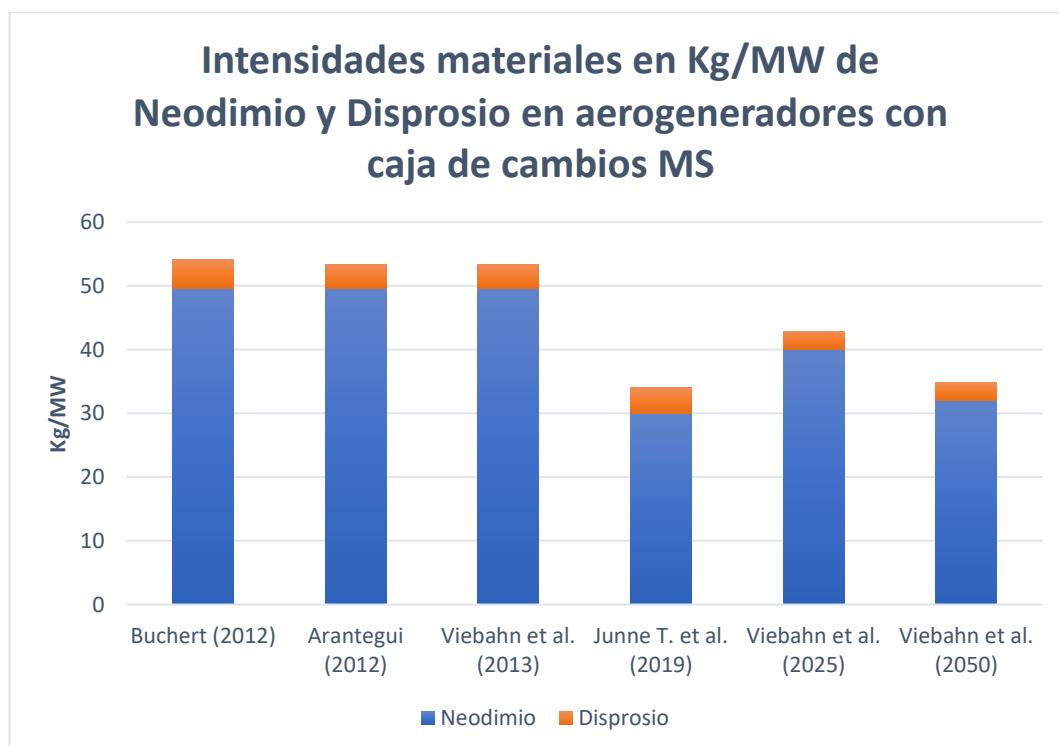


Ilustración 3.1.- Intensidades materiales de Neodimio y Disproσιο en aerogeneradores SG-PM-MS

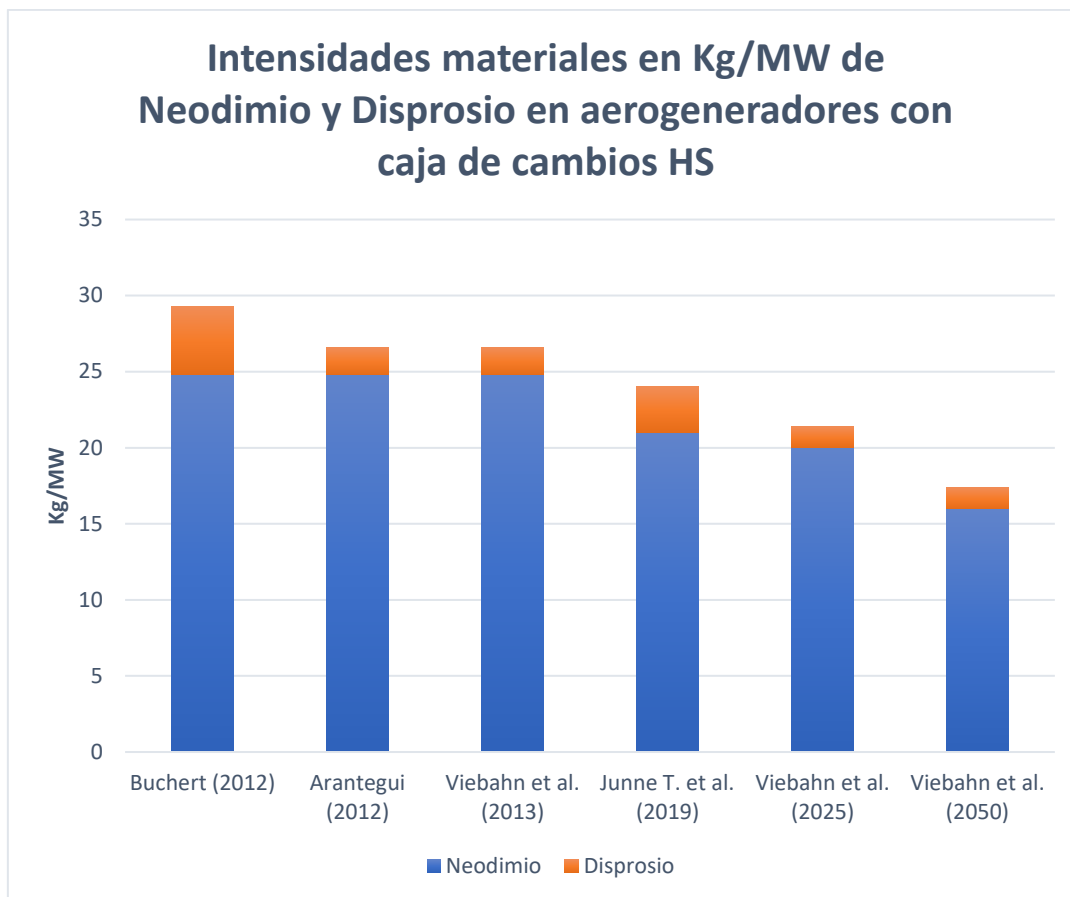


Ilustración 32.- Intensidades materiales de Neodimio y Disproso en aerogeneradores SG-PM-HS

Queda claro que los molinos eólicos Direct Drive (sin caja de cambios) suponen un consumo mucho más elevado de Neodimio y Disproso que los modelos con caja de cambios. Reduciéndose desde los aproximadamente 190 kg/MW actuales de los modelos SG-PM-DD, hasta los apenas 50 de los modelos SG-PM-MS, y los 25 kg/MW de los SG-PM-HS.

Si nos detenemos ahora en comparar estos datos con las previsiones de share del mercado reflejadas en la Ilustración 19, observamos que los modelos con más proyección futura son, en el caso de las zonas terrestres los de tipo SG-PM-HS, y en el caso de las zonas marinas, los SG-PM-MS, lo cual es bastante razonable, al ser los modelos que aúnan una relativamente baja utilización de materiales críticos con una elevada eficiencia en la generación de energía.

También se espera un enorme crecimiento de los modelos SG-PM-DD, probablemente debido a que en determinados contextos sea más rentable apostar por el modelo más eficiente de todos, aunque a costa de un consumo elevado de materiales críticos en su imán.

Si nos centramos ahora en la Ilustración 31, (Junne et al., 2020) rebaja enormemente los requisitos de intensidades materiales de Neodimio, muy por debajo de las calculadas por estudios homólogos, incluso por debajo de las que ya hemos demostrado como tan fiables predicciones de (Viebahn et al., 2015) para 2050. Sin embargo, si profundizamos en su estudio, la realidad es que dicho valor tiene una enorme incertidumbre (entre 13,5 y 42,3 kg/MW), y al estar tan alejado de otros valores de la literatura, muy similares entre sí, no le voy a considerar un valor de referencia.

No es así en los modelos SG-PM-HS de la Ilustración 32, que presentan una gran estabilidad en los datos de la literatura, con un descenso leve pero apreciable que continúa para las previsiones futuras para 2025 y 2050.

Los imanes permanentes no sólo se utilizan como parte del generador, existen diseños de cajas de cambios magnéticas, con el fin de evitar las molestas pérdidas por fricción entre los componentes mecánicos internos, como describen (K. Li et al., 2019) y (Belkhir & Khenfer, 2013). Sin embargo, no existe información acerca de los modelos concretos que utilizan este tipo de cajas de cambios, o su penetración en el mercado, por lo que no vamos a tener esto en cuenta para nuestro estudio.

3.5.5.- Recopilación de datos

Los datos y regresiones presentadas en el anterior apartado provienen de una base de datos realizada con toda la información que ha sido posible encontrar en la literatura existente acerca de intensidades materiales. He detallado las referentes a Neodimio y Disproso, al ser los elementos más críticos, no sólo por estar considerados así por la propia Unión Europea, sino también ya que aparecen en el imán permanente, es decir, en el elemento más importante de las tecnologías con más futuro.

Sin embargo, esto es sólo una pequeña parte del trabajo realizado, ya que se han recopilado datos sobre todos los posibles elementos que conforman un aerogenerador, que varían enormemente, desde las tierras raras utilizadas en el generador, hasta los materiales comunes como acero u hormigón usados en la cimentación o en la torre.

Se ha recogido información sobre los siguientes materiales:

- Adhesivo
- Aluminio
- Fibra de carbono
- Cromo
- Cobre
- Diesel
- Disprobio
- Componentes electrónicos
- Fibra de vidrio
- Galio
- Plástico reforzado con vidrio
- Grava
- Indio
- Lubricante
- Magnesio
- Maquinaria pesada (depreciación)
- Hormigón
- Neodimio
- Níquel
- Pintura
- Plásticos
- Arena
- Plata
- Preparación del terreno
- Acero
- Telurio
- Cableado

La totalidad de las fuentes no han sido completamente referenciado en el desarrollo de este informe, ya que no todos ellos han sido interesantes para explicar los puntos aquí desarrollados, por lo que a continuación, se incluye una lista completa de las referencias utilizadas en la base de datos, y cuyos datos han sido analizados para obtener los valores de la Tabla 1.

- (Kim et al., 2015)
- (Viebahn et al., 2015)
- (Junne et al., 2020)
- (Buchert & Dittrich, 2012)

- (Arantegui, 2012)
- (Chu, 2011)
- (Habib et al., 2016)
- (Hoenderdaal et al., 2013)
- (I. Capellán-Pérez et al., 2019)
- (de Castro & Capellán-Pérez, 2020)
- (Elshkaki & Graedel, 2014)
- (Kis et al., 2018)
- (Leader et al., 2019)
- (Tokimatsu et al., 2018)
- (Guezuraga et al., 2012)
- (Lacal-Arántegui, 2015)
- (Martínez et al., 2009)
- (Wilburn, 2011)
- (Zimmermann, 2013)
- (Ensam, 2004)
- (Yang et al., 2017)
- (Dupont et al., 2018)

Se han revisado multitud de artículos adicionales, aunque finalmente no hayan sido incluidos en esta relación al no contener información considerada relevante.

Dicha relación, al contener demasiados valores distintos, y referenciados de muy diferentes maneras, ha sido analizada para obtener valores concretos para cada una de las ocho subtecnologías que vamos a tomar en cuenta, las que discernimos en el apartado 1.3.- Principios físicos de aprovechamiento de la energía eólica. Se han eliminado del análisis los valores más atípicos de entre los analizados, y se han escogido los más consistentes y calculado un valor final a partir de ellos.

El resumen ha sido dividido en dos partes:

La primera de ellas tiene en cuenta las intensidades materiales actuales, también las necesarias en un escenario continuista a futuro (hasta 2050), que llamaremos “CONT”, y están representadas en la Tabla 1.

	Onshore SG-PM-DD	Onshore SG-PM-MS/HS	Onshore SG-E-DD	Onshore AG	Offshore SG-PM-DD	Offshore SG-PM-MS/HS	Offshore SG-E-DD	Offshore AG
Adhesive	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Aluminium (Al)	2095	2200	830	830	9400	9400	9400	9400
Aluminium mirrors	0	0	0	0	0	0	0	0
Cadmium (Cd)	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbon fiber	1500	1500	1500	1500	3800	3800	3800	3800
Cement	0	0	0	0	0	0	0	0
Chromium (Cr)	4085	4085	4085	4085	12960	12960	12960	12960
Copper (Cu)	3400	2200	1714	22200	3400	2200	1714	22200
Diesel	15600	15600	15600	15600	49485	49485	49485	49485
Dysprosium (Dy)	18,67	3,2	4,86	0	18,67	3,2	4,86	0
Electric / electronic components	450	450	450	450	450	450	450	450
Evacuation lines (KM)	0	0	0	0	0	0	0	0
Fiberglass	5052	16266	16266	16266	3800	3800	3800	3800
Foam glass	0	0	0	0	0	0	0	0
Galium (Ga)	0,000664	0,000664	0,000664	0,000664	0,000858	0,000858	0,000858	0,000858
Glass	0	0	0	0	0	0	0	0
Glass reinforcing plastic (GRP)	950	950	950	950	950	950	950	950
Gravel (roads, protection...)	11900	11900	11900	11900	900000	900000	900000	900000
Indium (In)	1,51	1,51	1,51	1,51	1,47	1,47	1,47	1,47
Iron (Fe)	0	0	0	0	0	0	0	0
KNO3 mined	0	0	0	0	0	0	0	0
Asphalt	0	0	0	0	0	0	0	0
Lime	0	0	0	0	0	0	0	0
Limestone	0	0	0	0	0	0	0	0
Lithium (Li)	0	0	0	0	0	0	0	0
Lubricant	640	640	640	640	640	640	640	640
Magnesium (Mg)	1,89	1,89	1,89	1,89	2,49	2,49	2,49	2,49
Manganese (Mn)	0	0	0	0	0	0	0	0

Heavy machinery (depreciation and reposition)	36,5	36,5	36,5	36,5	115,9	115,9	115,9	115,9
Concrete	470800	470800	470800	470800	7800	7800	7800	7800
Molybdenum (Mo)	0	0	0	0	0	0	0	0
NaNO3 mined	0	0	0	0	0	0	0	0
NaNO3 synthetic	0	0	0	0	0	0	0	0
Neodymium (Nd)	178	35	52,1	0	178	35	52,1	0
Nickel (Ni)	111	111	111	111	111	111	111	111
Over grid (15%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Over grid (5%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Paint	670	670	670	670	670	670	670	670
Lead (Pb)	0	0	0	0	0	0	0	0
Plastics	1653	1366	1366	1366	9200	9200	9200	9200
Polypropylene	0	0	0	0	0	0	0	0
Rock	0	0	0	0	0	0	0	0
Rock wool	0	0	0	0	0	0	0	0
Sand	16560	16560	16560	16560	16560	16560	16560	16560
Silicon sand	0	0	0	0	0	0	0	0
Silicon wafer modules	0	0	0	0	0	0	0	0
Silver (Ag)	1,87	1,87	1,87	1,87	2,93	2,93	2,93	2,93
Site preparation (soil works) etc.	2250000	2250000	2250000	2250000	12000000	12000000	12000000	12000000
Tin (Sn)	0	0	0	0	0	0	0	0
Soda ash	0	0	0	0	0	0	0	0
Steel	120000	133300	118920	118920	259000	259000	259000	259000
Syntethic oil	0	0	0	0	0	0	0	0
Tellurium (Te)	0,0923	0,0923	0,0923	0,0923	0,143	0,143	0,143	0,143
Titanium (Ti)	0	0	0	0	0	0	0	0
Titanium dioxide	0	0	0	0	0	0	0	0
Vanadium (V)	0	0	0	0	0	0	0	0
Wires	640	640	640	640	640	640	640	640
Zinc	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1.- Intensidades materiales actuales y del escenario "CONT"

Adicionalmente, hemos recopilado datos para 8 materiales adicionales que no se encuentran en la lista de materiales considerada por el modelo MEDEAS, por lo que no se tendrán en cuenta para el modelado.

	Onshore	Offshore
Fluorspar	181	260
Cobalt	0,245	0,447
Gold	0,643	1,01
Palladium	0,0927	0,146
Platinum	0,0103	0,014
Rhodium	0,00296	0,00435
Rhenium	0,000682	0,00111
Tantalum	0,0669	1,04

Tabla 2.- Intensidades materiales no consideradas en MEDEAS

Los valores de la Tabla 1 para ciertos materiales menos relevantes, sobre los que apenas existe literatura acerca de su uso en aerogeneradores, como adhesivos, componentes electrónicos, plástico reforzado, grava, lubricantes, arena, o la preparación general del terreno han sido obtenidos de los datos existentes en el modelo MEDEAS-W.

La segunda se trata de un escenario de mejora tecnológica, en la que se utilizan datos, principalmente de previsiones y regresiones como las realizadas con el Neodimio y Disproso en anteriores apartados. En este escenario que llamaremos "TC", al igual que lo hace (Junne et al., 2020), la mayoría de las intensidades materiales, se quedan estáticas, ya que gran parte de ellas corresponden a elementos estáticos del aerogenerador. Esto es, ya que incluso en un escenario de mejora tecnológica, no vas a poder reducir, por ejemplo, la cantidad de acero necesaria para la torre, la cantidad de hormigón necesaria para la cimentación, o la cantidad de aluminio necesaria para la carcasa de la góndola. Sin embargo, sí que se podrá reducir, mediante la investigación y la inversión, la cantidad de materiales críticos necesarios para mantener o mejorar los rendimientos de un generador.

A efectos prácticos, los únicos valores que cambian, y por lo tanto, para los que se espera una mejora en su consumo son el Neodimio y el Disproso. Por ello, para evitar la reiteración innecesaria del resto de valores, tan sólo vamos a representar las ecuaciones que modelan el cambio de los valores que varían. Valores que, para este escenario, irán descendiendo paulatinamente desde el

valor original que toman actualmente en la Tabla 1, según las siguientes ecuaciones:

- Neodimio:
 - SG-PM-DD: $538.57 * (\text{Time} - 1994)^{-0,36}$
 - SG-PM-MS/HS: $35 - RAMP((35 - 23)/(2050 - 2015), 2015, 2050)$
 - SG-E-DD: $52.1 - RAMP((52.1 - 35.7)/(2050 - 2015), 2015, 2050)$
- Disproseo:
 - SG-PM-DD: $41,74 * (\text{Time} - 1994)^{-0,318}$
 - SG-PM-MS/HS: $3,2 - RAMP((3,2 - 2,15)/(2050 - 2010), 2010, 2050)$
 - SG-E-DD: $4,86 - RAMP((4,86 - 3,2)/(2050 - 2010), 2010, 2050)$

Para el caso del Cobre, probablemente el siguiente material en orden de importancia, los resultados finales han sido obtenidos a partir de diversas fuentes, como son (I. Capellán-Pérez et al., 2019), (Yang et al., 2017) o (Elshkaki & Graedel, 2014). En concreto el valor más elevado, de la tecnología AG, ha sido tomado de los valores utilizados en el modelo MEDEAS para eólica marina, ya que es la tecnología que estaba siendo considerada.

Todos los valores de la Tabla 1 y la Tabla 2 están expresados en kg/MW, por lo que el uso real de estos materiales en un escenario dependerá de la potencia instalada total.

Con respecto al uso de las diferentes torres de contención, los valores aportados representan principalmente los valores de hormigón y de acero medios para el mercado. Los anclajes al lecho marino no se han tenido en cuenta al no haber literatura que desarrolle en profundidad sus requerimientos materiales, y podría ser un punto de partida para futuras investigaciones que detallen aún más este aspecto.

Continuando con lo iniciado en el apartado 1.3.- Principios físicos de aprovechamiento de la energía eólica., y ya que tenemos ya definidas las seis divisiones de las subtecnologías que vamos a utilizar en el modelado, podemos definir la siguiente tabla de eficiencias:

	Eficiencia aerodinámica	Eficiencia mecánica	Eficiencia eléctrica	Ajuste terreno	Eficiencia global
windon_PM_DD	59%	90,7%	91,6%	70%	34,31%
windon_PM_MS/HS	59%	83,4%	90%	70%	31%
windon_E_DD	54%	80,9%	85%	70%	25,99%
windon_AG	54%	78,4%	80%	70%	23,71%
windoff_PM_DD	59%	90,7%	91,6%	100%	49,02%
windoff_PM_MS/HS	59%	83,4%	90%	100%	44,29%
windoff_E_DD	54%	80,9%	85%	100%	37,13%
windoff_AG	54%	78,4%	80%	100%	33,87%
Referencias	Estimación propia a partir de (BETZ, 1920)	Estimado a partir de (H. Li & Chen, 2008)	Estimado a partir de (H. Li & Chen, 2008)	Estimación propia	Producto de las anteriores

Tabla 3.- Eficiencia global de las diferentes subtecnologías eólicas

Además de las ya mencionadas eficiencias aerodinámicas, mecánicas, y eléctricas, hemos añadido un cuarto parámetro, al que hemos llamado, “ajuste terreno”. Esto es debido a que las condiciones a las que está sometido un mismo aerogenerador colocado en lugares distintos, no es constante.

Para el caso de un aerogenerador marino, no tiene ningún obstáculo que pueda producir, por ejemplo, pérdidas en la velocidad del viento, sino todo lo contrario, mar adentro es donde mejores resultados se consiguen, y es por esto que hemos otorgado un 100%, excepto en el caso de la tercera subtecnología marina, que hemos otorgado un 90% ya que, al ser más antigua, estos supuestos no se tenían tanto en cuenta como en la actualidad, por lo que es algo más baja.

En el caso de los terrestres hemos otorgado un 70% ya que es el valor que mejor ajustaba al factor de capacidad real estudiado por la unión europea, siguiendo el mismo razonamiento para la rebaja del 10% a la tercera subtecnología que en el caso de las marinas.

3.6.- El Modelo MEDEAS

La base sobre la que vamos a realizar nuestro análisis sobre la generación de energía eólica es el modelo MEDEAS, concretamente en su versión MEDEAS-W 2.0, es decir, la versión global, ya que existe también una versión a menor escala de la Unión Europea, desarrollado por el grupo GEEDS (Investigación en Energía, Economía y Dinámica de Sistemas) de la Universidad de Valladolid (Í. Capellán-Pérez et al., 2020)

El objetivo final de este modelo es servir como herramienta para la futura toma de decisiones políticas en la UE que ayuden a la sociedad a realizar la transición hacia un modelo más sostenible de forma gradual pero efectiva.

Dicho modelo está subdividido en 7 módulos:

- **Economía:** modelada siguiendo un enfoque post-Keynesiano, y en la que se asumen los desequilibrios naturales del mercado, los crecimientos esperados de la demanda, y las limitaciones existentes en la oferta, a través del análisis de 35 sectores industriales.
- **Energía:** sobre esta parte vamos a trabajar en este trabajo. Incluye las fuentes de energía tanto renovables como no renovables, a través del estado en el que se encuentran, diferenciando la energía eléctrica, y la almacenada en forma de calor, y en forma sólida, líquida o gaseosa.
- **Infraestructuras:** representan las infraestructuras energéticas necesarias para generar la electricidad generada en forma de electricidad y calor. También será objeto de este trabajo.
- **Materiales:** requeridos para la construcción de las infraestructuras energéticas, teniendo en cuenta la demanda existente, y las reservas y la extracción.
- **Uso del suelo:** representa los requerimientos de suelo de las diferentes infraestructuras energéticas.
- **Cambio climático:** modela la emisión de gases de efecto invernadero y su impacto en las sociedades humanas.
- **Impacto social y medioambiental:** traslada los resultados de las simulaciones en valores concretos para valorar el impacto en la sociedad y el medio ambiente. Pretende dar un contexto general del impacto sobre la humanidad.

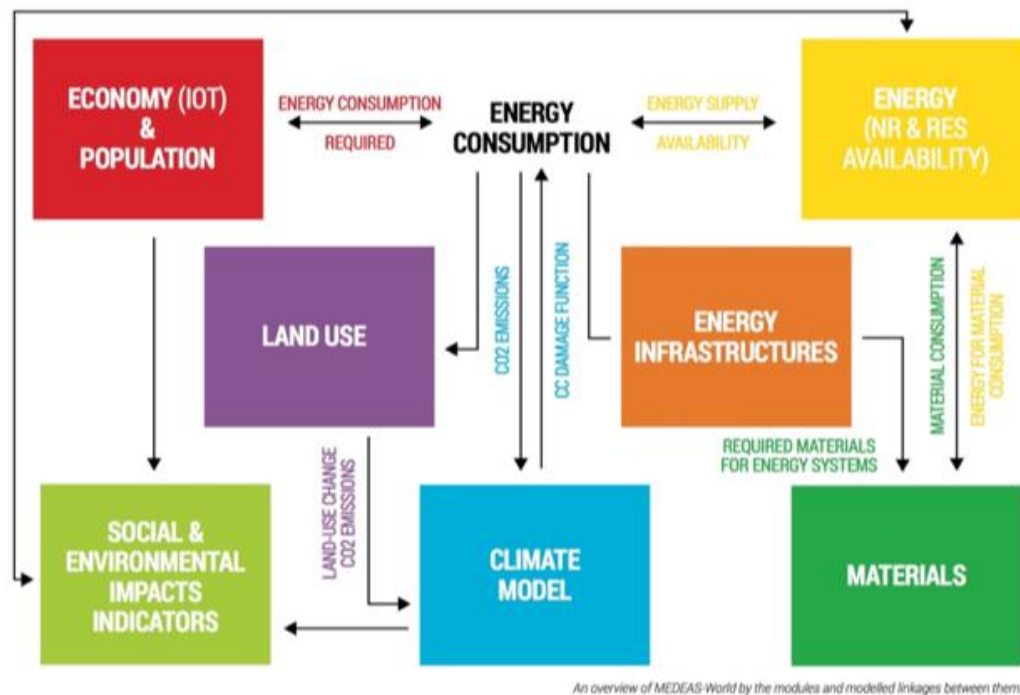


Ilustración 33.- Módulos del modelo MEDEAS (Solé et al., 2020)

Como cualquier buen modelo de dinámica de sistemas, MEDEAS no está pensado como una herramienta de predicción de un posible futuro, sino más bien como una guía que ayude a tomar las mejores decisiones para conseguir llegar al objetivo final de una sociedad lo más descarbonizada posible, a través de la adopción de las políticas que tengan un mayor impacto a la vez que afecten lo menos posible al funcionamiento actual de la sociedad.

A través de más de 150 pestañas programadas en VenSim, MEDEAS modela con un enorme grado de detalle todos los elementos que aparecen en la Ilustración 33. La gran mayoría de dicha programación no es relevante para el trabajo que vamos a realizar, aunque el hecho de que el modelo sea tan completo va a ayudar enormemente a conseguir unos resultados fiables en la parte cuya modificación consiste en este trabajo, ya que el modelo ya va a otorgarnos los inputs necesarios, principalmente sobre el resto de formas de generación de energía, para que nuestros resultados se acoplen de manera adecuada con el resto.

Como ejemplo, en la Ilustración 34 está representada la programación de una de estas pestañas, una de interés para este trabajo ya que en ella están representadas las infraestructuras de generación de energía eléctrica renovable.

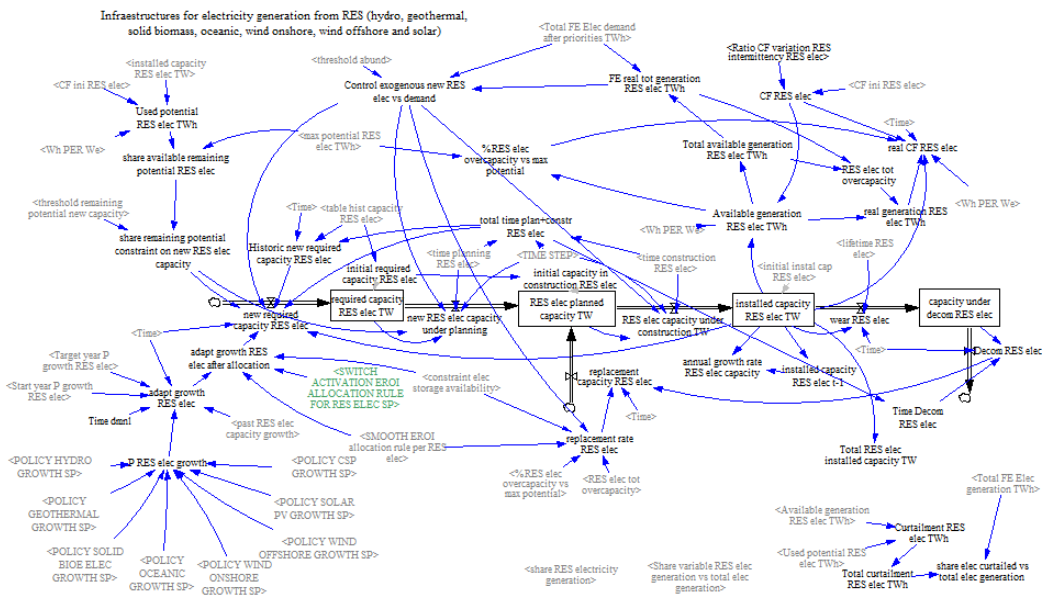


Ilustración 34.- Pestaña "energy|electricity|ELEC RES.generation" del modelo MEDEAS

La disponibilidad de minerales también se contempla en el marco. La demanda para minerales en tecnologías RES y baterías de vehículos eléctricos es calculada para cada aspecto clave, eligiendo una tecnología representativa, y evitando las más afectadas por los minerales más escasos. Se estima el consumo de minerales llevado a cabo por el resto de la economía, dada la estrecha relación entre la actividad económica y consumo de minerales en el actual sistema socioeconómico industrial. MEDEAS-W compara la demanda primaria total de minerales que debe ser extraído de las minas (después de tener en cuenta las tasas de reciclaje RC, en contenido reciclado) con el nivel estimado de su disponibilidad geológica (reservas y recursos). De esta forma se obtiene una estimación de la escasez de minerales, pero no se restringen las actividades económicas (al contrario que en el caso de escasez de energía), debido a una menor robustez de la demanda estimada, así como sobre los datos sobre la disponibilidad de minerales (I. Capellán-Pérez et al., 2019; Í. Capellán-Pérez et al., 2020).

3.7.- Modelado

El modelo actual de MEDEAS contempla diversos tipos de tecnologías de generación de energía renovable, como son:

- Hidroeléctrica.
- Geotérmica.
- Biomasa sólida.
- Oceánica.
- Eólica terrestre.
- Eólica marina.
- Solar.

Nuestro trabajo va a ser desagregar la generación eólica en las distintas subtecnologías existentes. Para esto es para lo que hemos realizado la división en 8 subtecnologías, de las cuales, cuatro son subtecnologías de la eólica terrestre, y otras cuatro lo son de la eólica marina.

Para ello, un parámetro importante que ya está programado en el modelo, y que vamos a asumir es la vida media de un aerogenerador, que será de 20 años. Esto coincide perfectamente con los valores que he encontrado a lo largo de mi búsqueda de datos, ya que todos los autores afirmaban un valor similar.

3.7.1.- Esquema de modelado

Nuestro modelo será capaz, a partir de los datos que MEDEAS es capaz de calcular acerca de la construcción de nuevos megavatios de potencia eólica, tanto offshore como onshore, de subdividirlos en cada una de las cuatro subtecnologías para las dos formas de generación eólica, siguiendo un esquema similar al representado en la Ilustración 35.

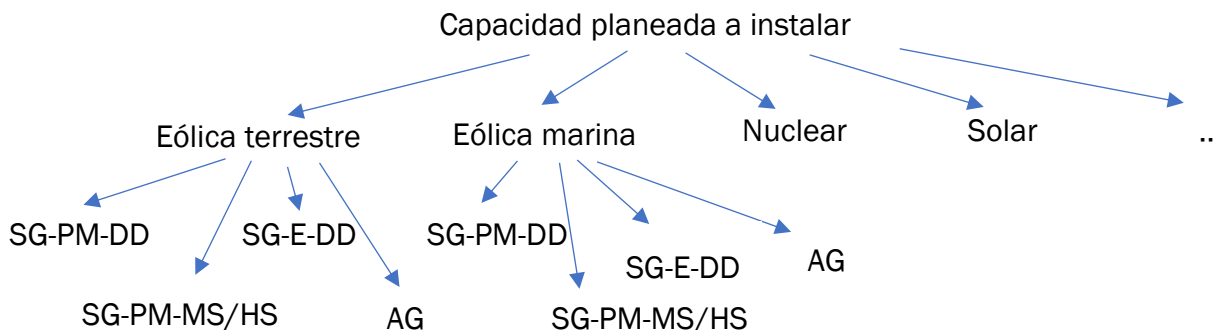


Ilustración 35.- Esquema del objetivo de nuestro modelo

A partir de las nuevas capacidades instaladas (inversiones) y del stock de capacidad existente de cada subtecnología, se computarán los requerimientos materiales de cada subtecnología eólica para inversión inicial, la operación, y el mantenimiento. Cuando finalice su tiempo de vida, si la demanda eléctrica sigue aumentando los aerogeneradores serán reemplazados.

3.7.2.- Modelado independiente a MEDEAS

Al ser MEDEAS un modelo de un gran calibre, con más de 150 ventanas con diferentes elementos, resulta mucho más eficiente modelar nuestra parte independientemente del modelo global, para luego introducirla en él.

El modelo a realizar va a constar de dos ventanas de VenSim, una de ellas para la generación eólica terrestre, y la otra para la generación eólica marina. Ambas van a ser muy similares en su apariencia externa, ya que la lógica de ambas partes del modelo es la misma. Las diferencias entre ambas vistas provienen de cuestiones internas del modelo, como la intensidad de materiales necesaria para cada una de ellas, o las subtecnologías consideradas.

El modelo para el caso terrestre es el representado en la Ilustración 36.- Modelo "Onshore" y para el caso marino en la Ilustración 37.- Modelo "Offshore".

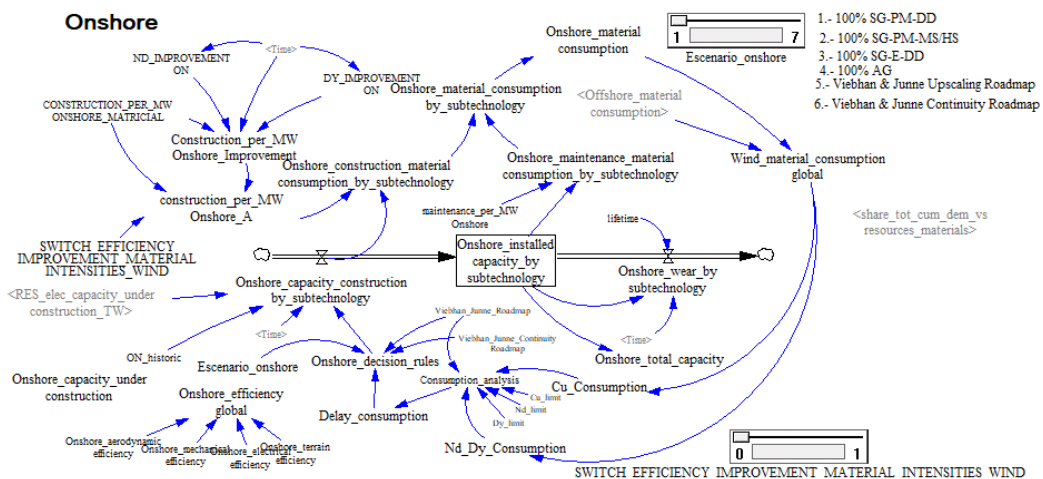


Ilustración 36.- Modelo "Onshore"

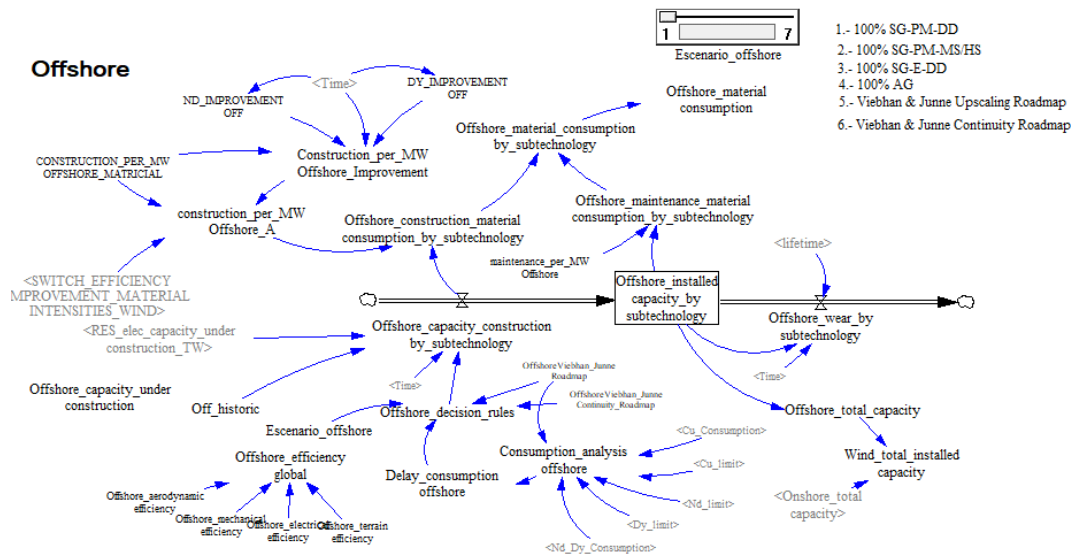


Ilustración 37.- Modelo "Offshore"

Para la creación de este modelo, el primer paso ha sido la creación de los subscript necesarios para poder trabajar sobre el modelo con más comodidad. Esto es, en lugar de realizar una vista para cada una de las 7 subtecnologías que consideramos, agruparlas en nuestro caso según la localización del modelo, lo cual nos permite emplear tan sólo dos vistas, una para los aerogeneradores terrestres (“Onshore”) y otra para los marinos (“Offshore”).

Los mencionados subscript de VenSim son una herramienta que posteriormente nos permite subdividir cada uno de estos elementos en las subtecnologías que lo componen.

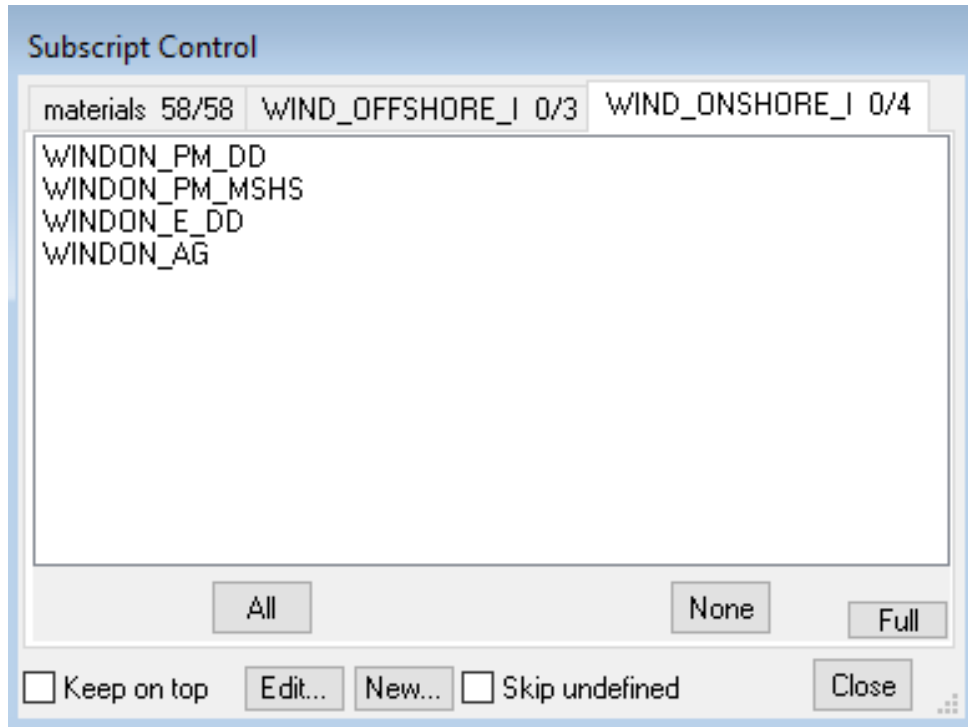


Ilustración 38.- Subscript en VenSim

En el caso de la Ilustración 38, observamos la nomenclatura de dichos subscript. Para el caso terrestre hemos utilizado un subscript llamado “WIND_ONSHORE_I” para mantener la coherencia con la nomenclatura que el grupo de investigación lleva utilizando en MEDEAS durante años. Dicho subscript está dividido en las subtecnologías que he identificado en etapas anteriores de este trabajo, como son “WINDON_PM_DD”, “WINDON_PM_MSHS”, “WINDON_E_DD” Y “WINDON_AG”.

También tenemos el que subdivide la eólica marina en sus tres tecnologías correspondientes, que son “WINDOFF_PM_DD”, “WINDOFF_PM_MSHS”, Y “WINDOFF_AG”.

Finalmente, utilizamos un subscript, denominado “materials” para almacenar el listado de materiales que vamos a tener en cuenta para el modelado, algunos de los cuales no van a ser utilizados específicamente para la generación eólica de electricidad, pero es importante mantener la coherencia dentro de MEDEAS, por lo que serán añadidos en el mismo orden con un valor de 0.

En la Ilustración 39 observamos la manera en la que los subscript con programados en VenSim.

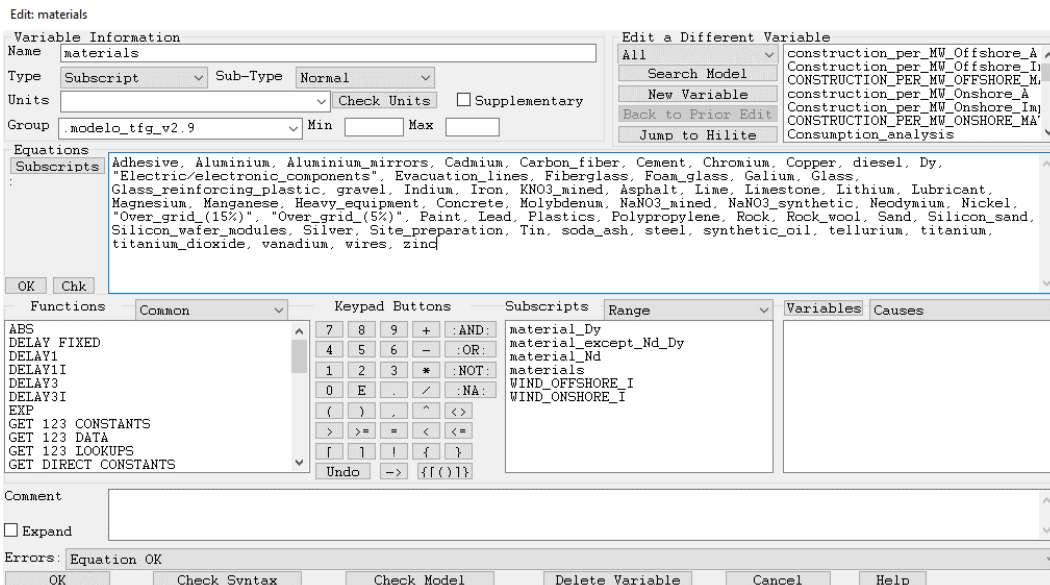


Ilustración 39.- Nomenclatura de los subscript

Una vez completado este paso previo, comienza el modelado en sí.

En el centro del modelo tenemos una variable “Stock” (Level en VenSim) llamada “Onshore installed capacity by subtechnology”, que se encargará de almacenar la cantidad de megavatios instalados totales, y acumulativos, por lo que representará en tiempo real la capacidad de generación eólica terrestre del sistema, subdividido en cada una de las subtecnologías correspondientes. Análogamente en la otra vista tendremos su equivalente “Offshore installed capacity by subtechnology” que realizará la misma función, pero en el caso de la eólica marina.

Por simplicidad desarrollaré la parte terrestre, y se sobreentiende que, salvo que se indique lo contrario, la parte marina será equivalente.

Dicha variable Stock dispone de dos flujos, uno de entrada, y otro de salida.

El flujo de entrada, “Onshore capacity construction by subtechnology” representa la cantidad de megavatios de cada subtecnología que se construyen cada año, y es acumulado en el stock.

Proviene de los datos de salida de capacidad necesaria calculados por el modelo MEDEAS para cada año.

El flujo de salida, “Onshore wear by subtechnology” representa la cantidad de megavatios de cada subtecnología que anualmente llegan al fin de su vida útil y son desmantelados. Consideramos que el desmantelamiento se produce a

los 20 años de su puesta en marcha, ya que es el valor más estable de vida media encontrado en la literatura, y también es el utilizado por MEDEAS. Dicho flujo es extraído anualmente del stock total de megavatios eólicos instalados.

El siguiente punto en el modelado es la introducción de los datos de intensidades materiales que hemos recopilado de la literatura. Para ello lo primero que tenemos que hacer es conseguir que VenSim lea los datos de la hoja Excel en la que los tenemos almacenados. La variable “CONSTRUCTION PER MW ONSHORE MATRICIAL” es la que realiza este proceso.

Para ello hemos utilizado la función de VenSim “Get Direct Constants”. Dicha lectura se podría realizar de varias formas, por ejemplo, indicando la casilla en la que VenSim debe leer los datos. Sin embargo, esto a la larga es inviable, y podría servir si se utilizan pocos datos, pero en nuestro caso debemos importar una matriz de 58x4. Para ello hemos creado los subscript, y podemos indicar que almacene los datos de las 58 filas de materiales, y les asigne a las 4 subtecnologías empleadas.

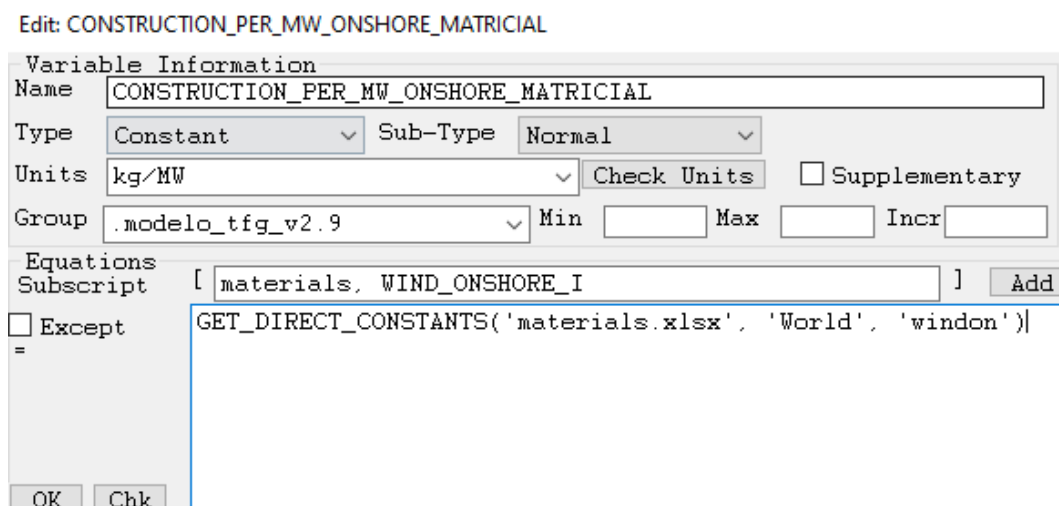


Ilustración 40.- Lectura de datos

Como se aprecia en la Ilustración 40, estamos indicando a VenSim que lea los datos del archivo Excel llamado “materials.xlsx”, en la pestaña “World”, y para una mayor facilidad de comprensión, hemos dado un nombre en Excel a la matriz que queremos importar, que se llamará “windon”. Esto es para no tener que buscar la casilla concreta en la que se encuentre ese dato, sino buscar la matriz con el nombre asignado.

De esta forma importamos los datos de intensidades de materiales actuales, pero en nuestro caso, vamos a necesitar que el modelo tenga en cuenta un probable escenario de mejora tecnológica en el que las intensidades para dos de los 58 materiales (Neodimio y Disproso) se reduzcan con el tiempo. Para eso hemos creado las variables “ND IMPROVEMENT ON” Y “DY IMPROVEMENT ON”, en las cuales vamos a definir la fórmula que regulará la bajada de materiales necesarios.

Para el caso del Neodimio, las fórmulas finalmente empleadas son $538,57 * (Time - 1994)^{-0,36}$ para la subtecnología “WINDON_PM_DD”, $35 - RAMP\left(\frac{35-23}{2050-2015}, 2015, 2050\right)$ para la subtecnología “WINDON_PM_MSHS”, y $52.1 - RAMP\left(\frac{52,1-35,7}{2050-2015}\right), 2015, 2050)$ para “WINDON_E_DD”.

En el caso del disproso siguen la regla $63,784 * (Time - 2000)^{-0,425}$ para “WINDON_PM_DD”, $3,2 - RAMP\left(\frac{3,2-2,15}{2050-2010}, 2010, 2050\right)$ para “WINDON_PM_MSHS”, y $4,86 - RAMP\left(\frac{4,863,2}{2050-2010}, 2010, 2050\right)$ para “WINDON_E_DD”.

La subtecnología “WINDON_AG” no utiliza estos elementos, por lo que el consumo de ambos siempre será 0.

Las regresiones tanto del Neodimio como del Disproso para la tecnología SG-PM-DD han cambiado con respecto a las indicadas anteriormente debido a que han tenido que ser ajustadas para evitar problemas a la hora de simular en MEDEAS. Esto es debido a que MEDEAS está programado de tal forma que su simulación comienza en 1995, y las regresiones potenciales utilizabas estaban realizadas tomando el año 2000 como punto de origen, lo que ocasionaba problemas de cálculo. Para ello se han vuelto a realizar las regresiones a partir de 1994.

Todas ellas proceden de las regresiones y cálculos realizados a partir de los valores de la literatura, recogidos en la sección 3.5.5.- Recopilación de datos.

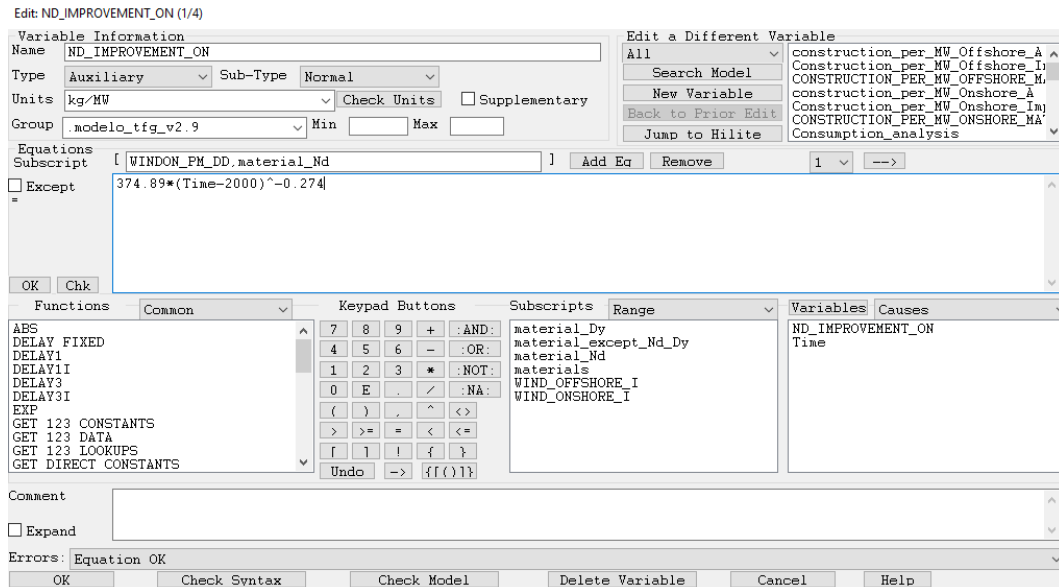


Ilustración 41.- Mejora en la intensidad de materiales

En la Ilustración 41 se aprecia la fórmula para la primera de ellas, y mediante la flecha hacia la derecha se puede pasar por las demás que irán referenciadas a su propio elemento del subscript.

Estos valores serán introducidos en una variable auxiliar, “Construction per MW Onshore Improvement” que se encargará de unir los 56 elementos estáticos del subscript de materiales, con los dos dinámicos que hemos introducido, y que representará la intensidad de materiales en el escenario de mejora tecnológica de manera dinámica.

Para seleccionar cuál de los dos escenarios queremos simular, hemos introducido lo que sería el equivalente a un interruptor, la variable “SWITCH EFFICIENCY IMPROVEMENT MATERIAL INTENSITIES WIND”. Por defecto tomará un valor de 0, pero mediante el deslizador que se puede apreciar en la parte inferior derecha del modelo Ilustración 36, se podrá cambiar a 1 mediante una simulación dinámica. Esto será recogido por la variable final que determinará la intensidad de materiales utilizada, “construction per MW Onshore A”, que mediante una sentencia condicional tomará uno u otro valor en función del valor del interruptor (Ilustración 42).

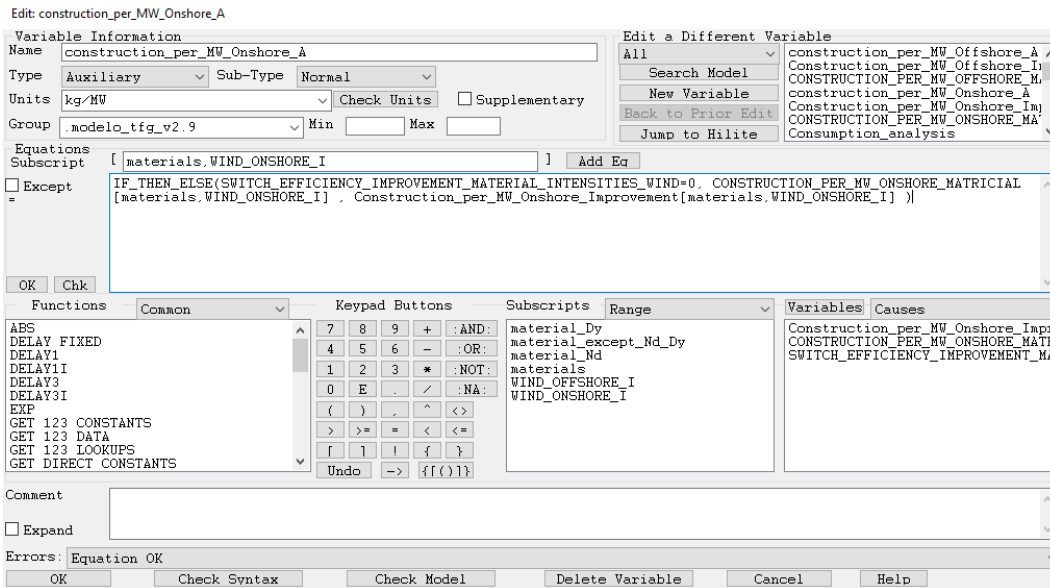


Ilustración 42.- Selección de escenario de continuidad o mejora tecnológica

El producto de estos valores por los de la variable “Onshore capacity construction by subtechnology” nos da el valor total de materiales consumidos cada año en la construcción de nuevos aerogeneradores terrestres.

También se debe tener en cuenta el consumo de materiales para el mantenimiento de los generadores existentes, valores obtenidos de los utilizados en el modelo MEDEAS, que de forma análoga a lo expresado anteriormente se obtienen de la hoja Excel correspondiente en la variable “maintenance per MW Onshore”, y que tras multiplicarlos por el total de megavatios instalados, obtenemos el resultado en la variable “Onshore maintenance material consumption by subtechnology”. Dichos valores están obtenidos en función de los valores de construcción originales de MEDEAS. Tras analizar la procedencia de los valores, y principalmente, al no tratarse de ningún material crítico, se han decidido mantener como estaban originalmente como forma de simplificación.

Tras esto sumamos los dos valores para obtener el total de cada subtecnología en la variable “Onshore material consumption by subtechnology”, manteniendo aún la diferenciación entre subtecnologías por si es necesaria en un futuro y posteriormente les agrupamos en “Onshore material consumption”.

Como este proceso se ha realizado de igual manera para el caso de las subtecnologías marinas, finalmente volvemos a agrupar ambas en la variable “Wind material consumption global”, que ahora sí, recoge el total de materiales consumidos por toda la eólica.

Antes de realizar la integración con el modelo MEDEAS, y para poder realizar pruebas de simulación y comprobar el funcionamiento del modelo creado, he creado una variable provisional, “Onshore capacity under construction”, en la que he colocado unos valores de prueba para que mi modelo pudiera funcionar. Estos valores son los que van a ser sustituidos por los datos de salida de MEDEAS que mencioné anteriormente, y que servirán de punto de partida a la simulación.

Por último, la variable “ON historic” introduce en el modelo los datos históricos de share entre 2009 y 2012, y que se tomarán como fijos para todos los escenarios, al ser datos históricos.

Pasamos ahora a la parte inferior del modelo, donde principalmente encontramos aspectos relacionados con las reglas de decisión que nos permitirán simular diferentes escenarios.

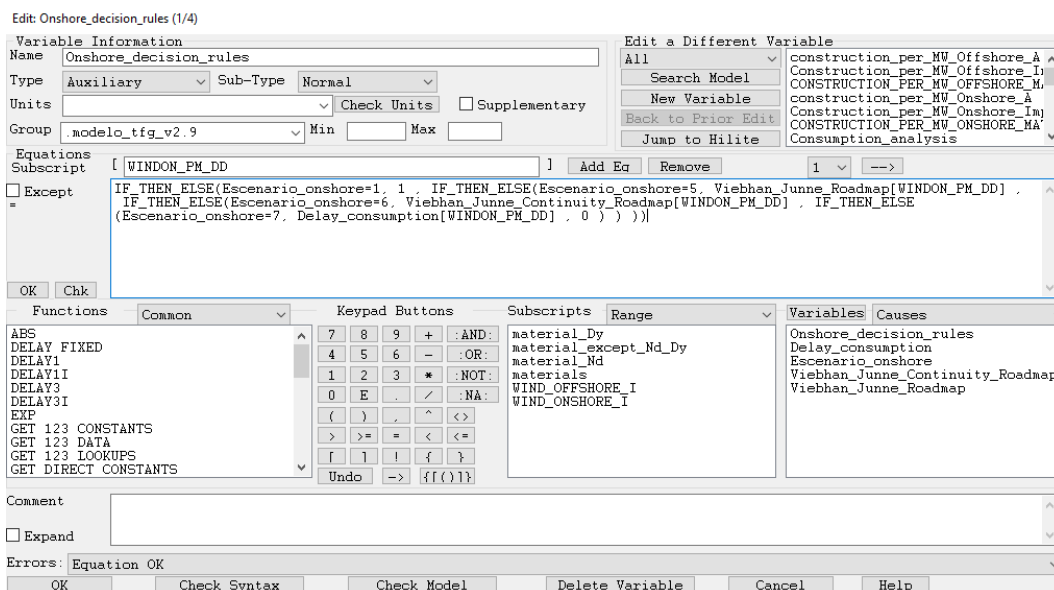


Ilustración 43.- Interruptor para los diferentes escenarios

La variable “Onshore decisión rules” (Ilustración 43) es un interruptor que nos permitirá cambiar cómodamente de un escenario a otro, para el caso de ese modelo preliminar, desde el escenario 1 hasta el 7, valor que vendrá introducido por el deslizador que encontramos en la parte superior derecha del modelo “Escenario onshore”.

Por ahora contamos con cuatro escenarios extremos para los cuales se considera que a partir de 2012 se utiliza exclusivamente una de las tecnologías

existentes, escenarios altamente improbables, pero que pueden dar una visión general de las diferencias en las intensidades materiales para cada una de las subtecnologías.

También contamos con dos escenarios con las previsiones encontradas en la literatura (Viebahn et al., 2015) y (Junne et al., 2020), tanto para un escenario continuista en el que se apuestan por tecnologías más antiguas, como para un escenario de mejora tecnológica en el que se apuestan por tecnologías no tan extendidas actualmente, pero con gran proyección a futuro.

Por último, el séptimo escenario comienza con el share del escenario 6, de mejora tecnológica, pero en el caso de que el consumo de materiales críticos (Neodimio y Disproseo) o muy relevantes para otros sectores y para la subtecnología AG en concreto (el Cobre) aumente del umbral que consideremos adecuado, se dejará de emplear dicha subtecnología.

Para ello, las variables “Cu Consumption” y “Nd Dy Consumption” extraen el valor global de consumo de estos tres materiales, y tras compararlo con los límites que hemos introducido en las variables “Cu limit”, “Nd limit” y “Dy limit” se toma la decisión explicada anteriormente.

La lógica de este escenario es provisional, ya que cuando esté realizada la integración con el modelo MEDEAS, los límites se compararán con las necesidades de todo el modelo, no sólo con el gasto en eólica. Es por esto que para evitar los problemas que supondría un cálculo cíclico en este modelo provisional, se ha introducido un pequeño delay igual al tiempo de paso de 0.03125 años que evita que se produzca este error.

3.7.3.- Integración con el modelo MEDEAS

El siguiente paso consiste en la integración en el modelo MEDEAS de las dos vistas que he creado, incluyendo los subscript que subdividen la eólica marina y la eólica terrestre.

Para esto el principal cambio que se ha realizado en el modelo ha sido el cambio de los datos de entrada de la construcción en MW de nuevos aerogeneradores. En el modelo sin integrar se utilizaba una variable de prueba “Onshore capacity under construction”, con unos datos provisionales con el único fin de comprobar el buen funcionamiento del modelo.

En la integración, se la ha sustituido por la variable de MEDEAS “RES elec capacity under construction TW”, que proviene de la pestaña “energy|electricity|ELEC RES.generation” (Ilustración 44), que en la práctica representa lo mismo que nuestra variable auxiliar, es decir, la cantidad de MW que se instalan cada año para las tecnologías renovables, pero en este caso los datos son los calculados por el modelo teniendo en cuenta todo el resto de factores que son considerados, explicados en el apartado 3.6.- El Modelo MEDEAS.

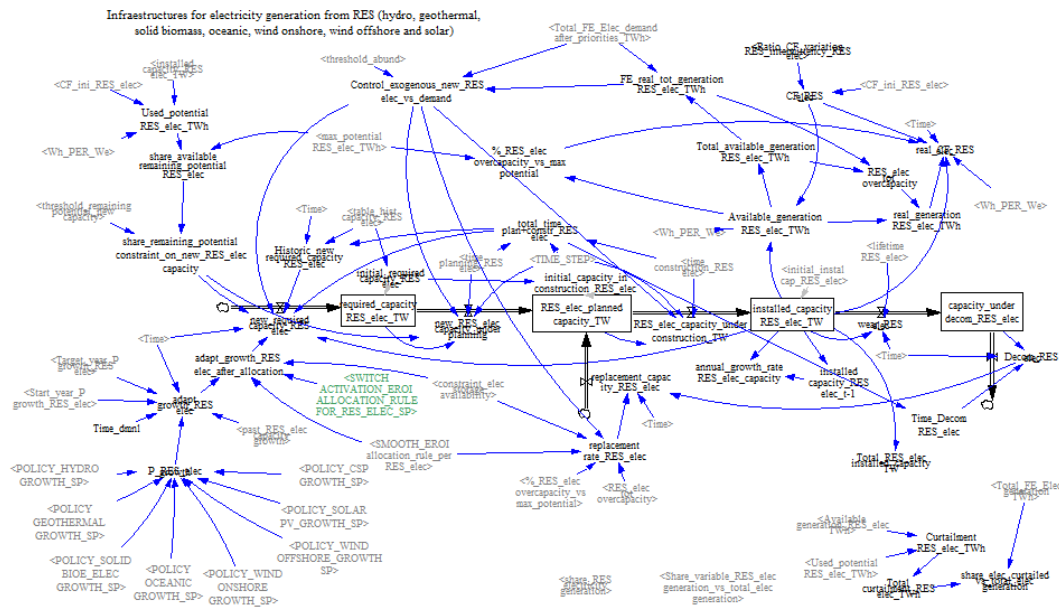


Ilustración 44.- Origen de la variable "RES elec capacity under construction TW"

La principal diferencia que encontramos en esta variable es que no sólo nos aporta los datos acerca de la eólica terrestre y la eólica marina, sino que al formar parte del modelo global, tiene en cuenta los resultados para los ocho tipos de tecnologías de generación de electricidad renovable que se han considerado, que son:

- Hidráulica
- Geotérmica
- Biomasa
- Oceánica
- Eólica terrestre
- Eólica marina
- Solar fotovoltaica
- Termosolar de concentración

Tan sólo extraeremos los datos de las dos que nos interesan para nuestro modelado.

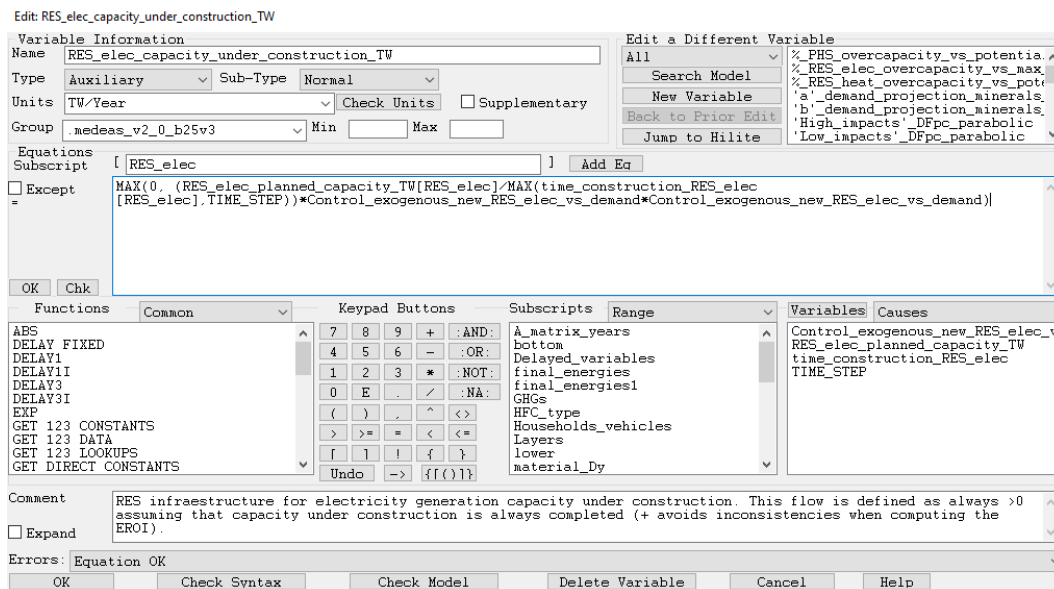


Ilustración 45.- Variable "RES elec capacity under construction TW"

El otro paso importante de la integración es realimentar al modelo MEDEAS con los resultados obtenidos por mi modelo. De esta forma, MEDEAS tiene en cuenta los nuevos datos de intensidad de materiales obtenidos por mi modelo año a año para realizar sus cálculos gracias a esta realimentación. De lo contrario, mi modelo estaría decidiendo las subtecnologías a utilizar sobre los datos antiguos de MEDEAS, y no sobre los datos realimentados y por lo tanto más fiables.

Esta realimentación se coloca en la pestaña "materials.demand for RES elec", y en ella deberemos sustituir la ya existente por nuestros datos actualizados.

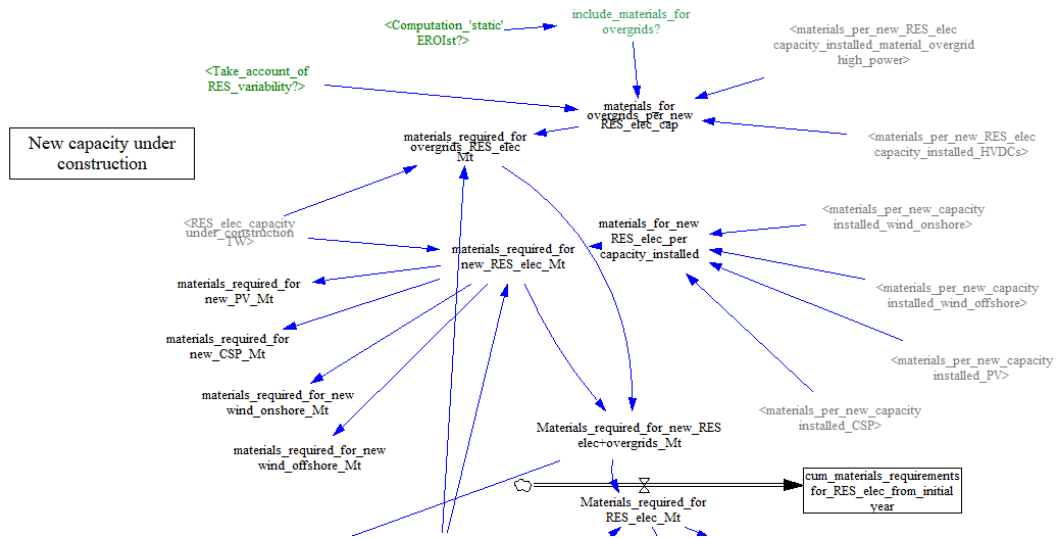


Ilustración 46.- "materials.demand for RES elec" del modelo original

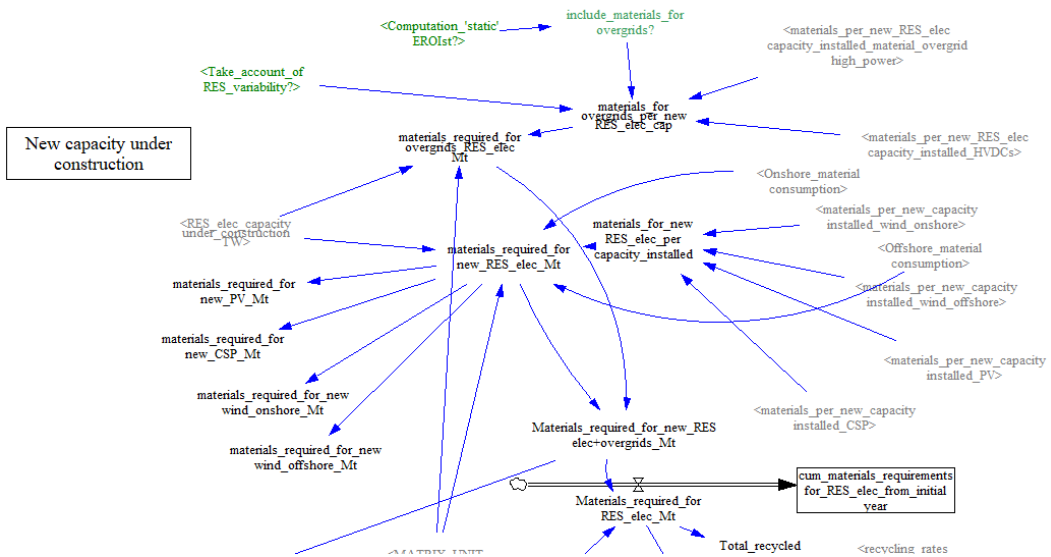


Ilustración 47.- "materials.demand for RES elec" del modelo realimentado

La variable “materials for new RES elec per capacity installed” almacena los datos de intensidades materiales por MW para las ocho formas de generación de energía, y sería la equivalente a nuestra variable “construction per MW onshore A” y “construction per MW offshore A”.

Sin embargo, no es esa la que vamos a modificar, ya que tenemos unos datos distintos, más depurados. Modificaremos la variable “materials required for new RES elec Mt”, que es la que representa la intensidad de materiales total necesaria. En ella introduciremos los valores obtenidos en las variables “Onshore material consumption” y “Offshore material consumption”, sustituyendo a los anteriores valores del vector de tecnologías renovables.

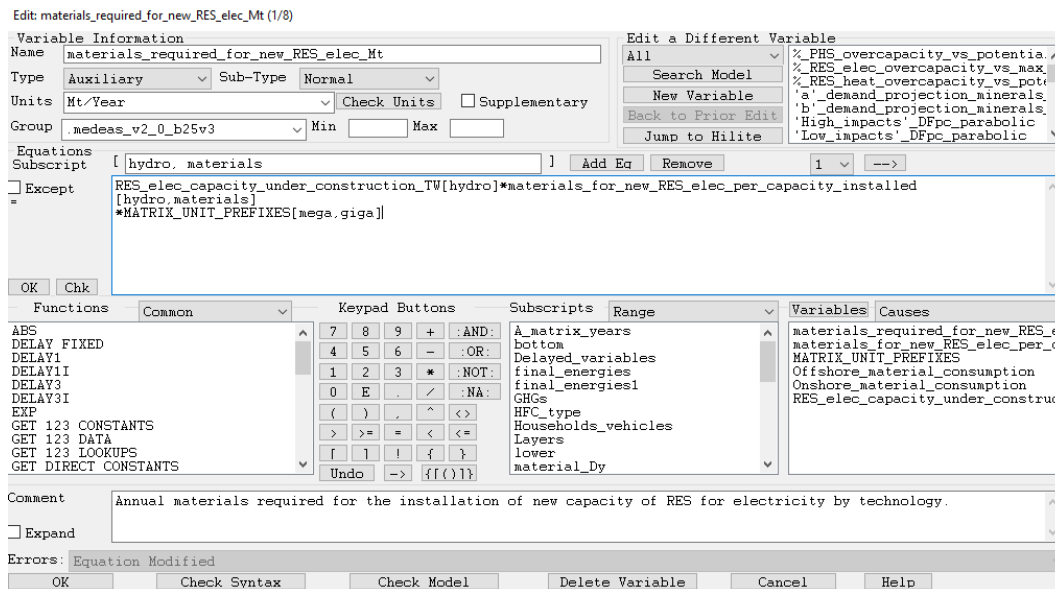


Ilustración 48.- "materials required for new RES elec Mt" para tecnología ya existente (hidrológica)

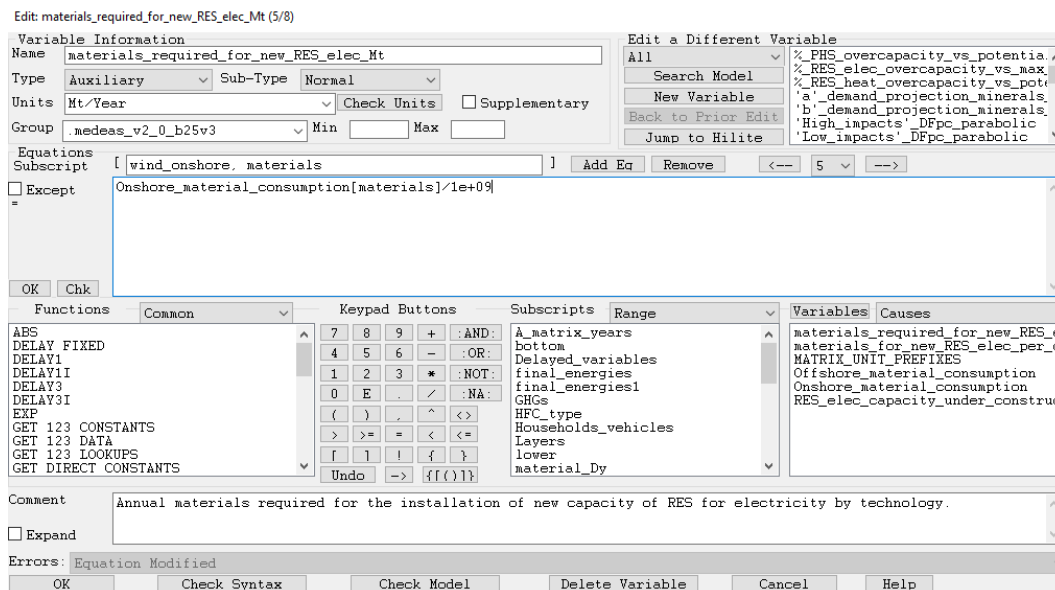


Ilustración 49.- "materials required for new RES elec Mt" para eólica terrestre

En nuestro caso (Ilustración 49), al llegar los datos ya procesados podemos introducir directamente nuestro valor, tan sólo realizando el cambio de unidades de kilogramos a megatoneladas, que es el utilizado en esta variable de MEDEAS.

También ha sido necesario el ajuste del origen de los datos utilizados para la simulación, por ejemplo, los datos de intensidades materiales que son introducidos en el modelo, que han sido colocados en el archivo Excel “materials” incluido en el modelo para mayor simplicidad.

3.8.- Escenarios

El grupo que ha desarrollado el modelo MEDEAS ha implementado en él 3 escenarios principales. El primero de ellos considera que las tendencias actuales se van a mantener, y para ello las variables continúan las tendencias históricas que han seguido hasta ese momento, con crecimientos de un 8,7% y un 25% respectivamente para la generación eólica terrestre y marina con respecto a los datos anteriores.

El segundo, “Green Growth”, tomado como referencia, considera un ligero aumento en la utilización de la energía renovable, y por tanto de sus fuentes, con unos aumentos anuales del 17,4% y 25% para la eólica terrestre y marina, además de aumentos mayores para el resto de formas de generación renovable.

El tercero modela una reducción drástica de la emisión de gases de efecto invernadero a partir de 2020, con crecimientos del 80% anual para ambas formas de generación.

Sobre este segundo escenario es sobre el que vamos a realizar los seis casos principales a considerar. Comenzaremos con cuatro escenarios extremos, que modelarán los supuestos en los que tan sólo se utilice una de las cuatro subtecnologías identificadas

- El caso 1 modelará un uso del 100% de la subtecnología SG-PM-DD.
- El caso 2 un uso del 100% de la subtecnología SG-PM-MS/HS.
- El caso 3 un 100% de la subtecnología SG-E-DD.
- Finalmente, el caso 4 supondrá un uso del 100% de la tecnología AG.

Los dos siguientes casos serán los correspondientes a las proyecciones realizadas por (Junne et al., 2020) y (Viebahn et al., 2015) explicadas en el apartado 3.4.- Cuotas de mercado y previsiones.

El caso 5 representará la proyección para un escenario de mejora tecnológica en el que las tecnologías que, a pesar de no haber alcanzado aún su madurez en el mercado, se prevé que alcancen unos elevados niveles de penetración en el mercado.

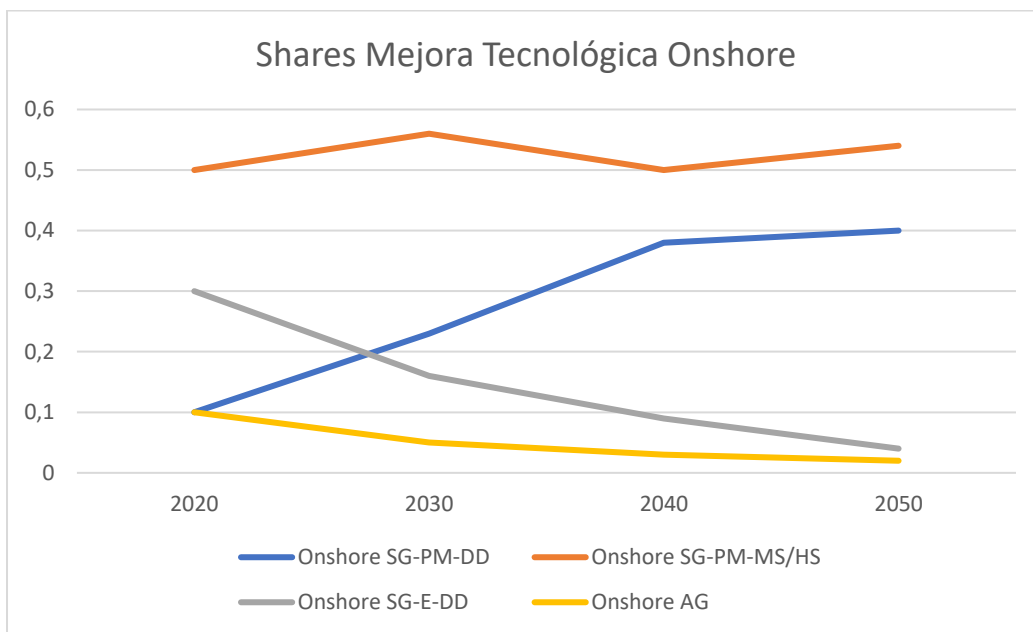


Ilustración 50.- Shares Mejora tecnológica Onshore

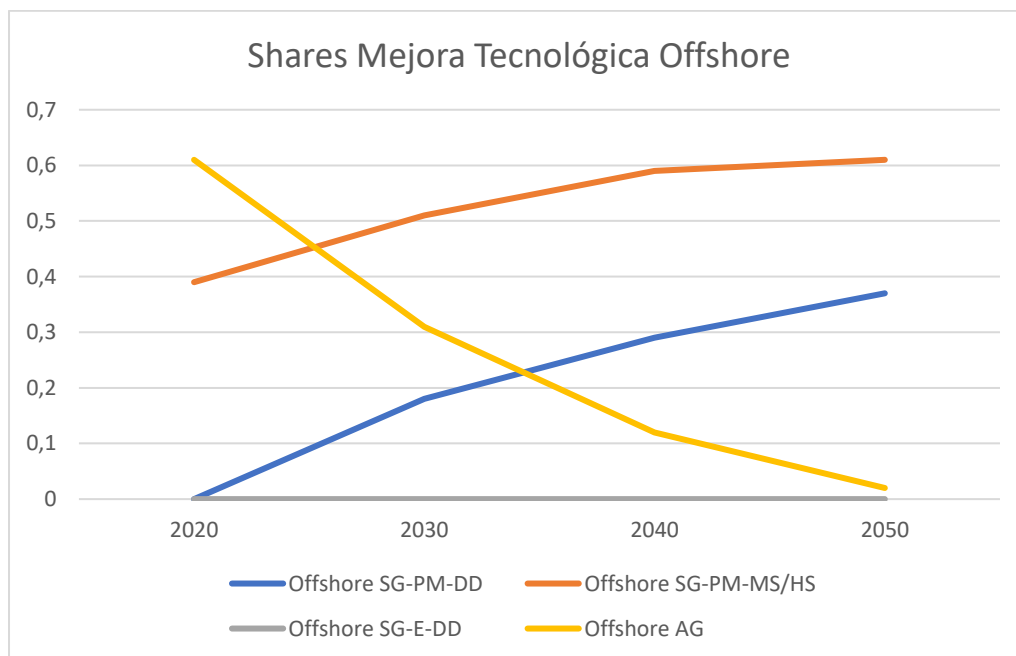


Ilustración 51.- Shares Mejora tecnológica Offshore

El caso 6 representará un escenario mucho más continuista, que extrapola las tendencias actuales del mercado y asume que se utilizarán principalmente las subtecnologías que actualmente se pueden instalar a gran escala.

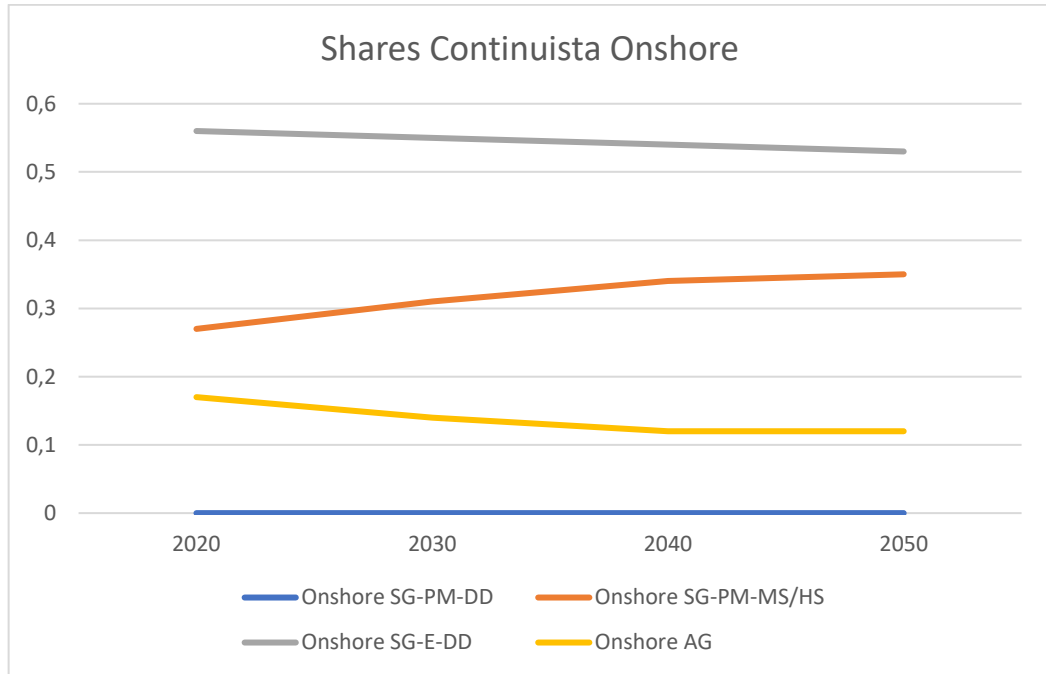


Ilustración 52.- Shares Continuista Onshore

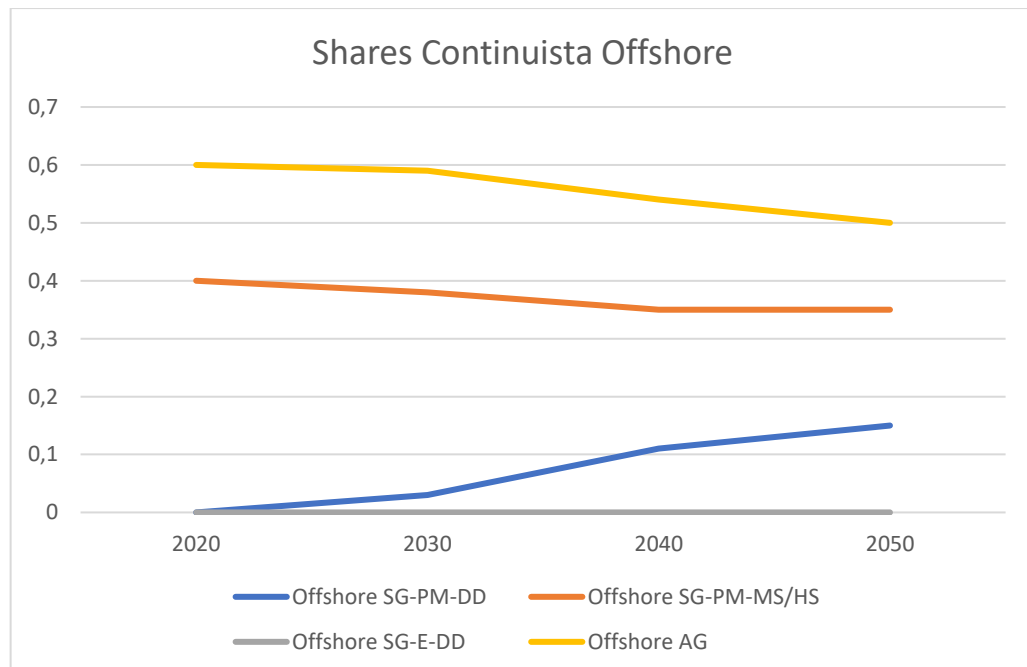


Ilustración 53.- Shares Continuista Offshore

3.9.- Resultados de la simulación

3.9.1.- Escenarios extremos

Comenzaremos a simular por los cuatro escenarios extremos que hemos considerado. En ellos se considera que tanto para la generación eólica terrestre como marina se realiza utilizando tan sólo un tipo de tecnología. Son escenarios que en la práctica no parecen para nada realistas, pero nos pueden dar una buena perspectiva sobre las diferencias en intensidades materiales de las diferentes subtecnologías en sus casos más extremos.

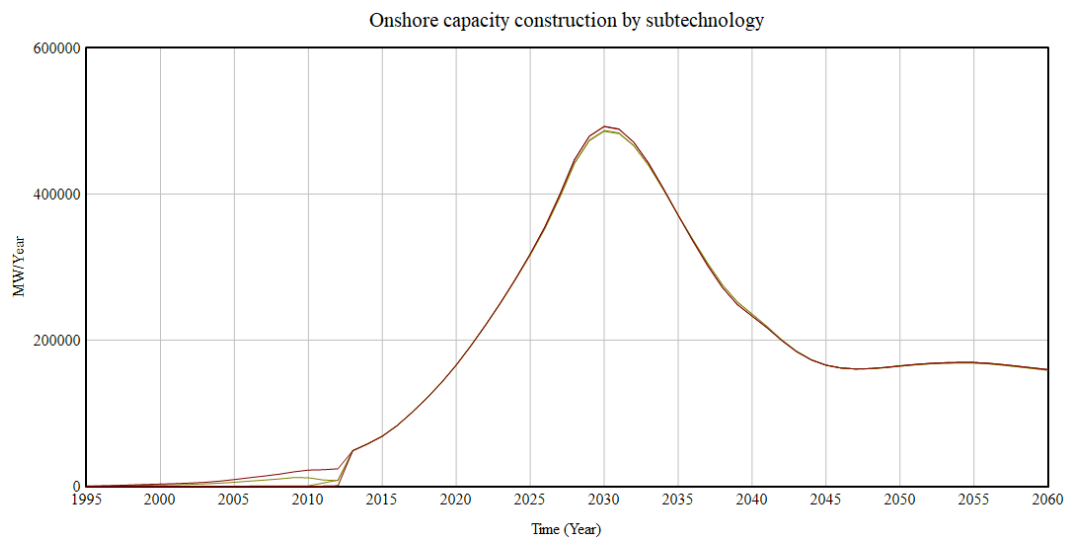


Ilustración 54.- Construcción de MW onshore en los casos extremos

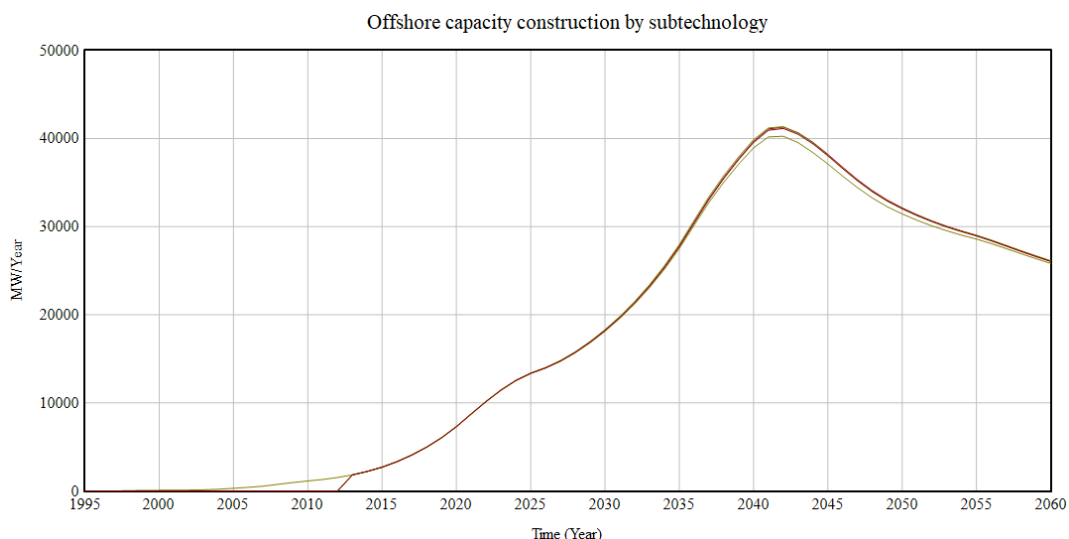


Ilustración 55.- Construcción de MW offshore en los casos extremos

En la Ilustración 54 y la Ilustración 55 podemos ver la cantidad de MW de nueva construcción que según MEDEAS serán instalados en cada uno de los casos extremos (caso 1 al caso 4) en los que se considera que se usan exclusivamente generadores del tipo SG-PM-DD, SG-PM-MS/HS, SG-E-DD y AG. Hasta el año 2012 se toman los datos históricos anteriormente mencionados, y a partir de ahí se simulan los casos extremos.

Como la demanda de capacidad instalada es la misma, no se aprecian apenas diferencias en la cantidad de MW instalados entre una subtecnología y la otra. La línea inferior representa la capacidad instalada en el escenario 4 (100% AG), y los tres escenarios restantes presentan diferencias inapreciables. Para estos casos lo interesante es analizar el consumo de materiales en casos extremos.

Consideremos el caso, por ejemplo, del Cobre, considerado crítico por ciertos autores, pero no por la Unión Europea. En la Ilustración 56 y la Ilustración 57 podemos observar los cuatro escenarios descritos (marcados como 1, 2, 3 y 4) más el escenario original de MEDEAS en azul claro.

Observamos que la subtecnología AG supone un consumo de cobre increíblemente elevado con respecto al resto, tanto en aerogeneradores terrestres como en marinos. Esto es debido a los componentes de su generador, que utilizan bobinados de cobre en lugar de imanes permanentes, como está descrito en la Tabla 1.

Sin embargo, debido a las consideraciones anteriores de MEDEAS, vemos cómo en el caso onshore los resultados originales del modelo antes de dividir en subtecnologías son similares a los casos con menor consumo de cobre, mientras que en el caso offshore son similares al caso con mayor consumo de cobre, por lo que vemos cómo se habían considerado principalmente tecnologías más modernas, con menor consumo de cobre para la eólica terrestre, y tecnologías más antiguas, y por lo tanto, con mayor consumo de cobre para el caso de la eólica marina.

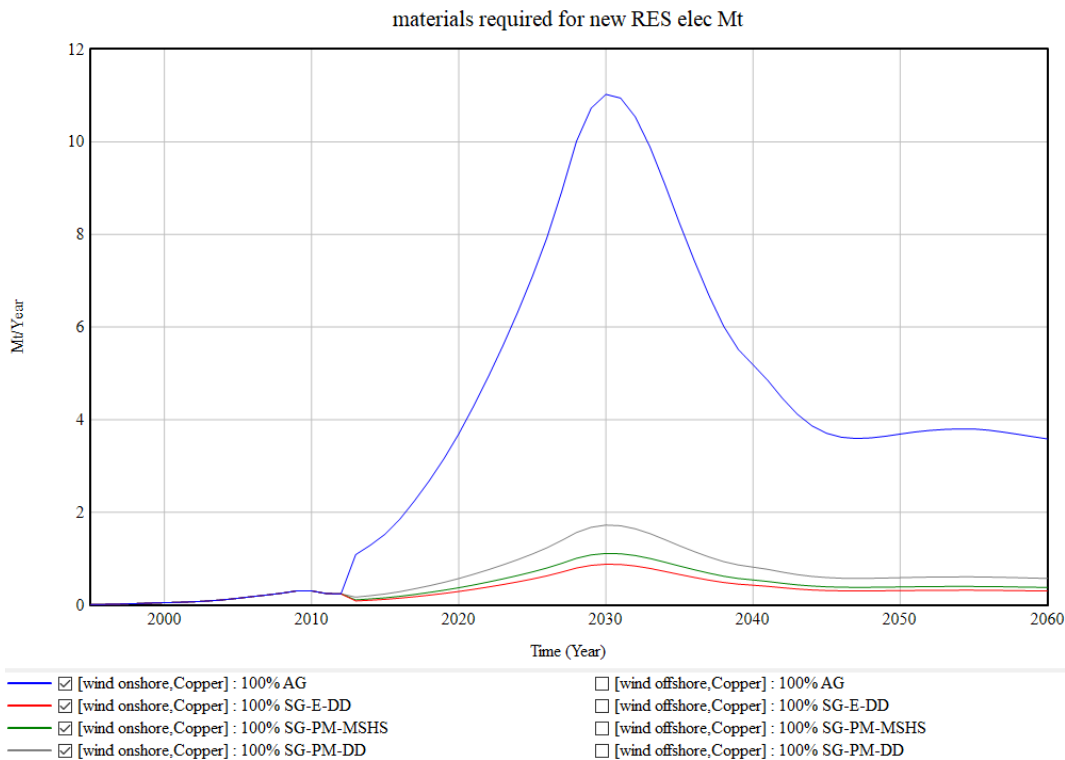


Ilustración 56.- Consumo de cobre onshore en escenarios extremos

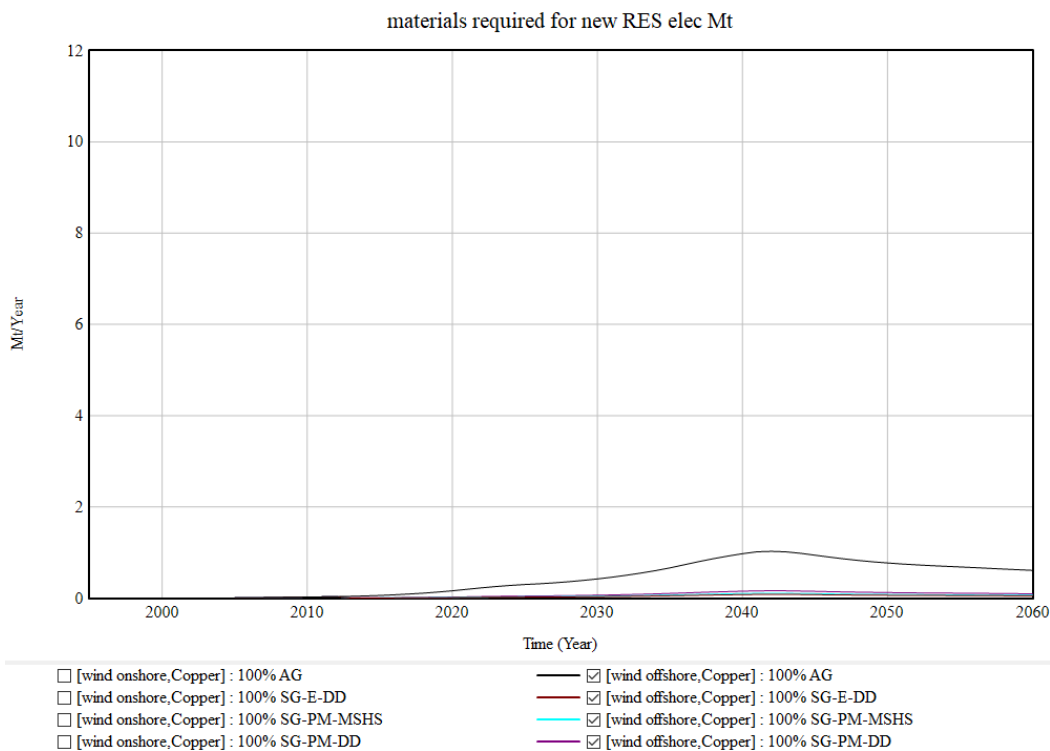


Ilustración 57.- Consumo de cobre offshore en escenarios extremos

Podemos por lo tanto comenzar a observar cómo la subdivisión va a aportar más posibilidades al modelo, aumentando la capacidad de decisión en cuanto a los consumos de materiales requeridos.

Sin embargo, el hecho de observar un pico de aproximadamente 11 Mt de cobre en el consumo si se utilizan generadores del tipo AG, aproximadamente 10 veces más que en el resto de tecnologías, por sí mismo no es un dato que nos aporte demasiado, si no sabemos de cuántos recursos disponemos.

Para ello, en la Ilustración 58 vamos a representar la demanda de Cobre necesaria con respecto a las reservas totales existentes.

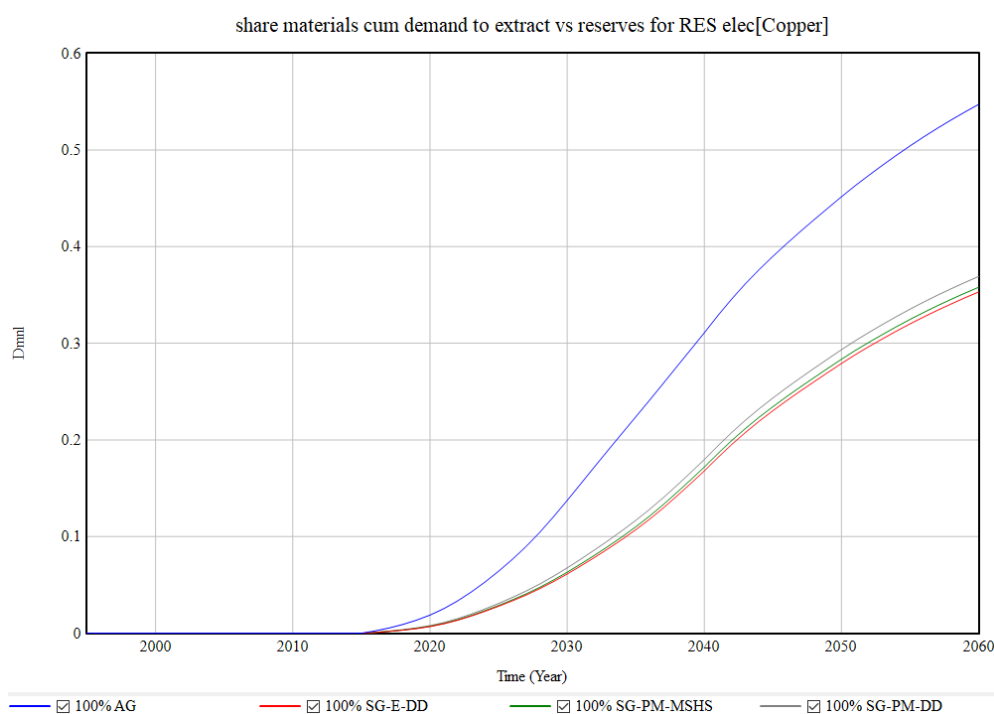


Ilustración 58.- Consumo acumulado de Cobre en casos extremos frente a reservas

Aquí las diferencias entre el escenario 4 y el resto de escenarios no son tan grandes como en las anteriores ilustraciones. Esto es porque en esta gráfica se están considerando también los consumos del resto de formas de generación de energía eólica renovable, por lo que las diferencias son amortiguadas al mantenerse constantes el resto de formas de generación.

Incluso así, pasar de un rango de valores del 35 al 37,5%, hasta casi un 55% del total de las reservas utilizadas para 2060 no es algo que se deba tomar a la ligera. Por suerte, al ser un escenario extremo, es altamente improbable que suceda, pero ilustra muy bien lo que podría haber sido un escenario realista si no se hubieran desarrollado nuevas tecnologías como son las otras 3 consideradas, aunque estas con sus problemas de consumo de tierras raras que analizaremos más adelante.

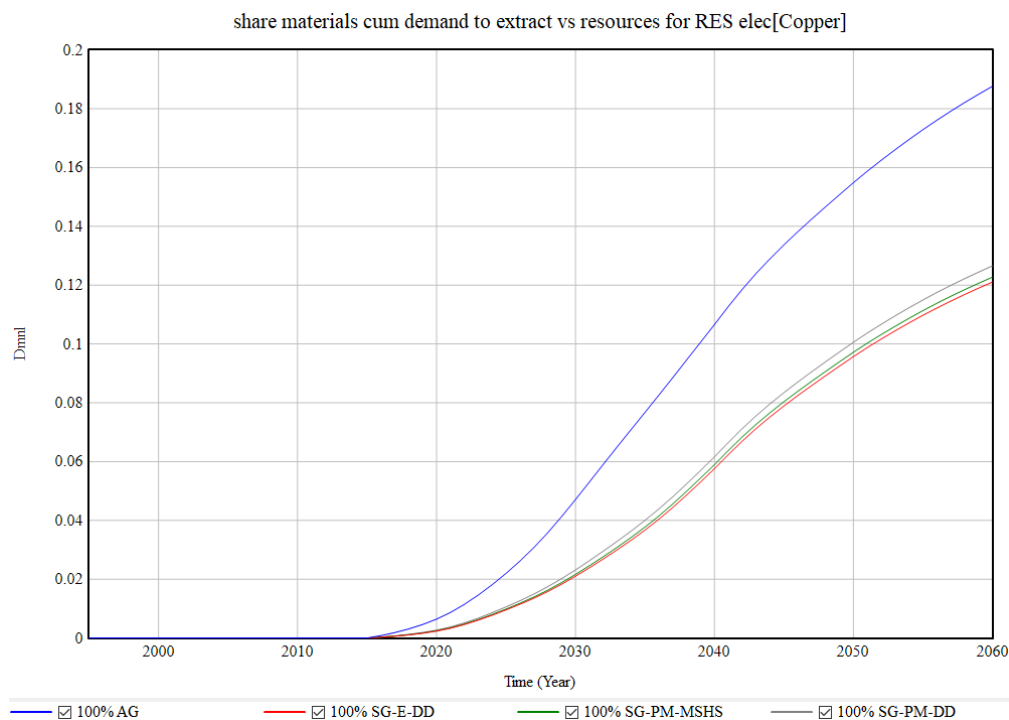


Ilustración 59.- Consumo acumulado de Cobre en casos extremos frente a recursos

La comparación frente a los recursos existentes de la Ilustración 59 es proporcional, aunque menos preocupante a priori, al no llegar al 20% de consumo para 2060.

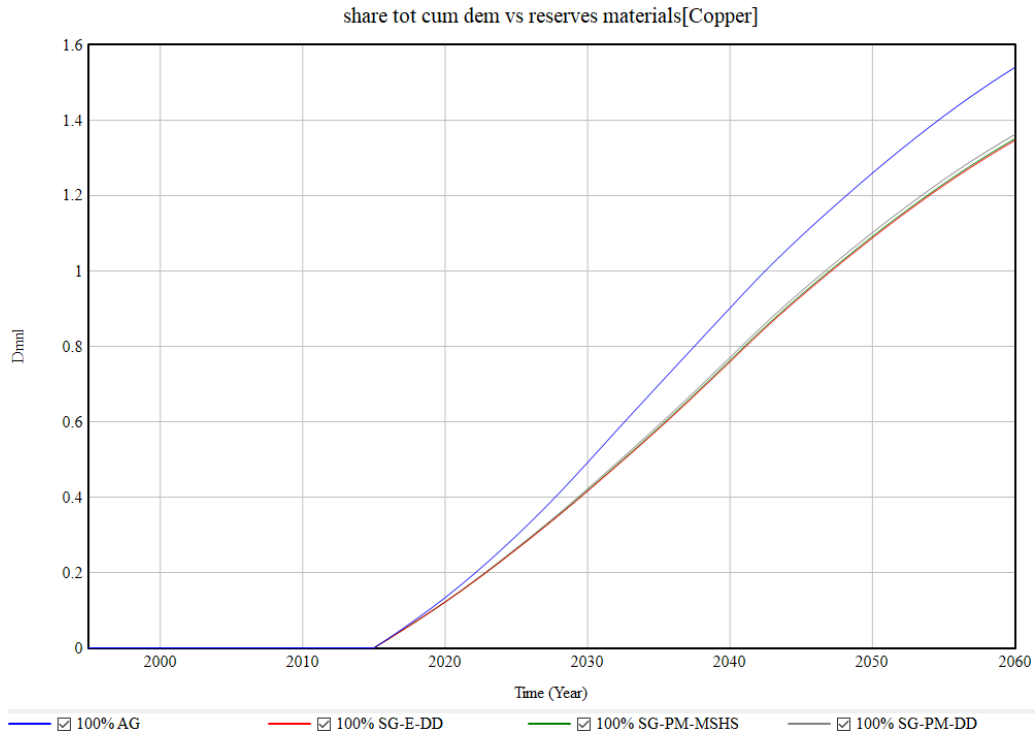


Ilustración 60.- Consumo de Cobre total en casos extremos frente a recursos

En la Ilustración 60 queda representado el consumo de cobre frente a los recursos actuales. Ya en el modelo MEDEAS original, sin introducir mis subdivisiones eólicas, en el año 2047 el consumo de cobre superaba a los recursos actuales de este elemento. Si tomamos el caso extremo en el que tan sólo se emplea la tecnología AG (muy improbable), este suceso se adelanta 4 años, hasta 2043, mientras que con el resto de escenarios extremos permanece casi constante. Ahora bien, la extracción de Cobre no se detiene, y si los recursos actuales se estiman en 720 megatoneladas, los recursos totales estimados por MEDEAS son de 2100 megatoneladas, casi triplicándose, por lo que para el año 2047 habríamos consumido un 35% de las reservas totales en el caso más desfavorable.

Consideremos ahora el caso de los dos materiales más relevantes en las previsiones, el Neodimio y el Disproseo. Sobre ellos se unen dos factores esenciales. El hecho de ser de vital importancia para la fabricación de los imanes permanentes, parte esencial de las subtecnologías, a priori, más prometedoras a futuro, y el hecho de ser tierras raras con un alto nivel de criticidad según la Unión Europea.

En la Ilustración 61 y la Ilustración 62, tanto en onshore como en offshore el escenario 1 es, con diferencia el que más Neodimio consume, el correspondiente a la subtecnología SG-PM-DD, con un pico de 0,877 megatoneladas en el año 2030, triplicándose con respecto a la simulación

inicial de MEDEAS para el caso onshore, pero manteniéndose constante en el caso offshore.

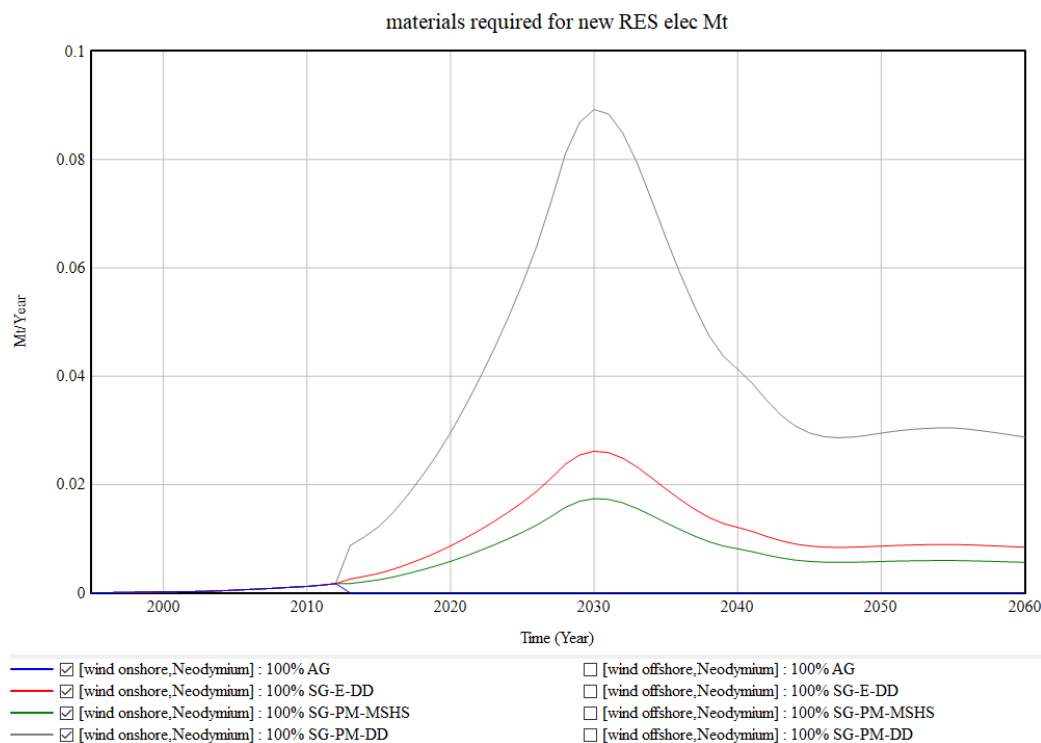


Ilustración 61.- Consumo de Neodimio onshore en escenarios extremos

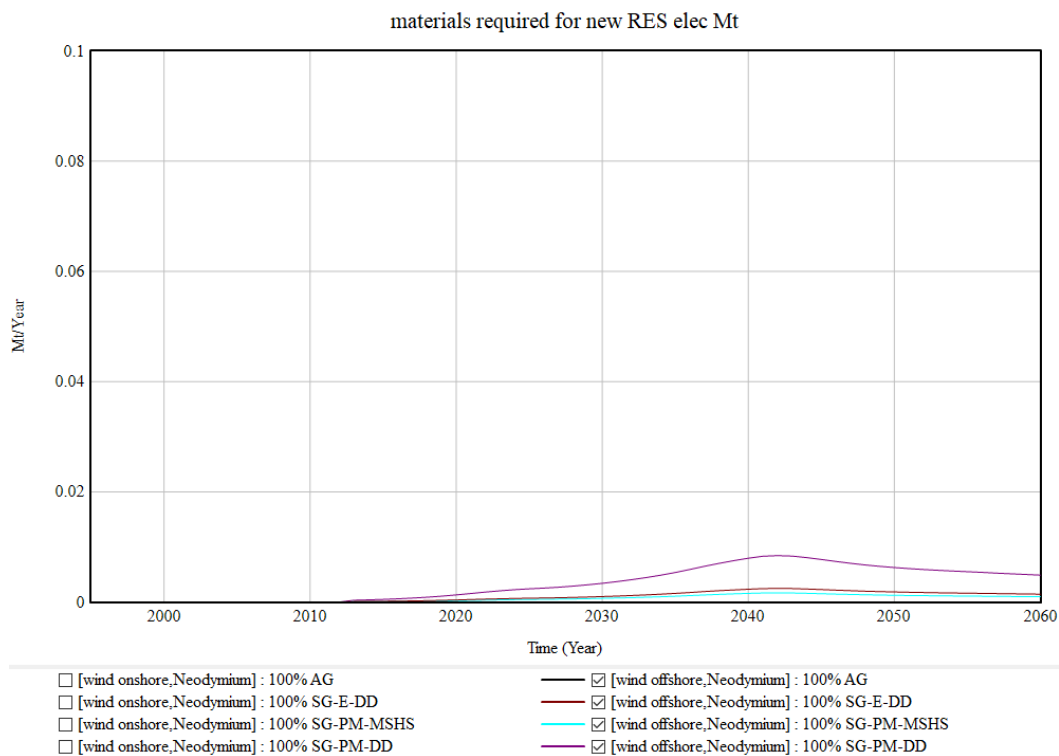


Ilustración 62.- Consumo de Neodimio offshore en escenarios extremos

El modelo MEDEAS no incluía datos acerca de las reservas de Neodimio, por lo que utilizaremos los datos de (Junne et al., 2020), estableciendo unas reservas de 16 Megatoneladas, y unos recursos previstos de 46 Megatoneladas.

En la Ilustración 63 podemos ver que a priori, no parece que vaya a haber problemas de escasez de Neodimio, ya que apenas se llega a un 11% del consumo de las reservas para 2060. Sin embargo, esto podría variar si se introdujeran nuevas tecnologías en otros sectores que empleen Neodimio en grandes cantidades, o si se produjeran cortes de suministro por parte de China, que ocupa prácticamente el monopolio mundial en la extracción y exportación de este elemento. Sin duda el factor más relevante que explica esta aparente falta de criticidad del Neodimio es el hecho de que MEDEAS no tiene en cuenta otras aplicaciones de este elemento, tanto actuales como futuras, como hemos descrito en el apartado 3.9.4.- Caso de menores reservas.

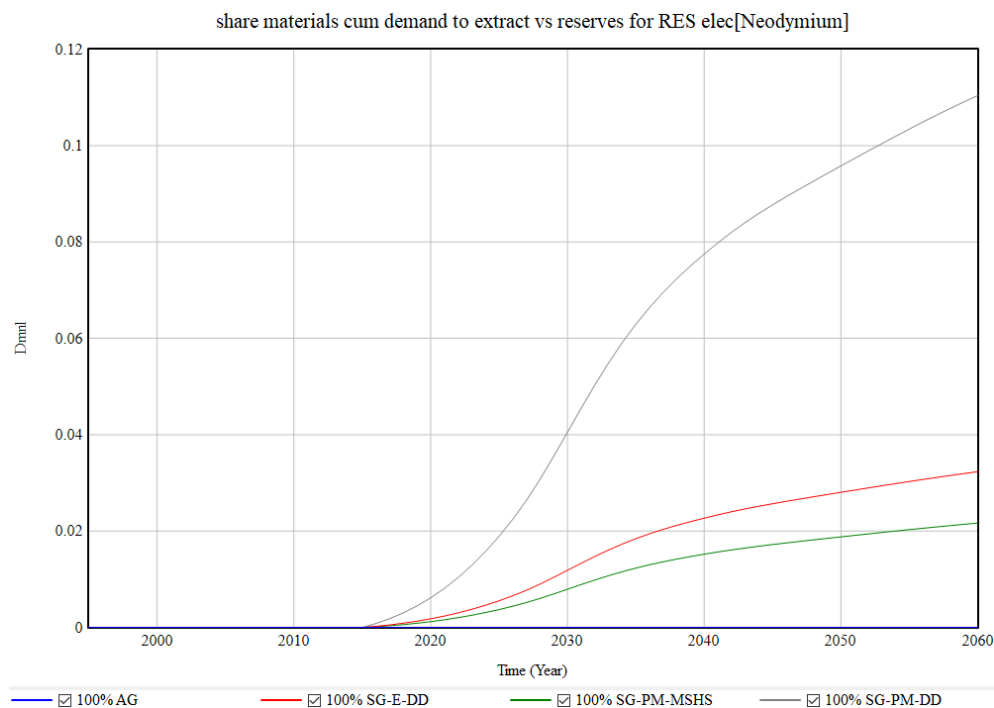


Ilustración 63.- Consumo de Neodimio en casos extremos frente a reservas

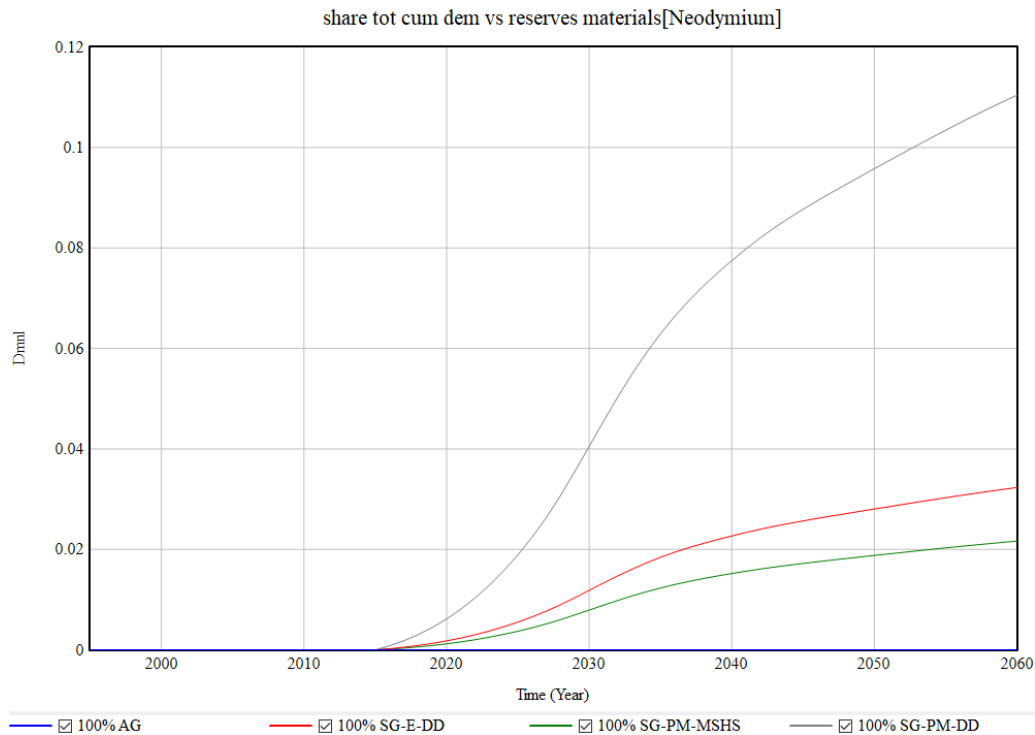


Ilustración 64.- Consumo de Neodimio total en casos extremos frente a reservas

Finalmente, la Ilustración 64 representa el consumo total del modelo, no sólo de las energías renovables, frente a las reservas. Los valores son idénticos a los de la Ilustración 63, por lo que con esto deducimos que el modelo MEDEAS no tiene en cuenta el Neodimio para ningún otro uso más allá del de imanes permanentes en aerogeneradores.

En el caso del Disprosio, el pico apenas llega a las 0,01 Megatoneladas anuales (Ilustración 65 e Ilustración 66)

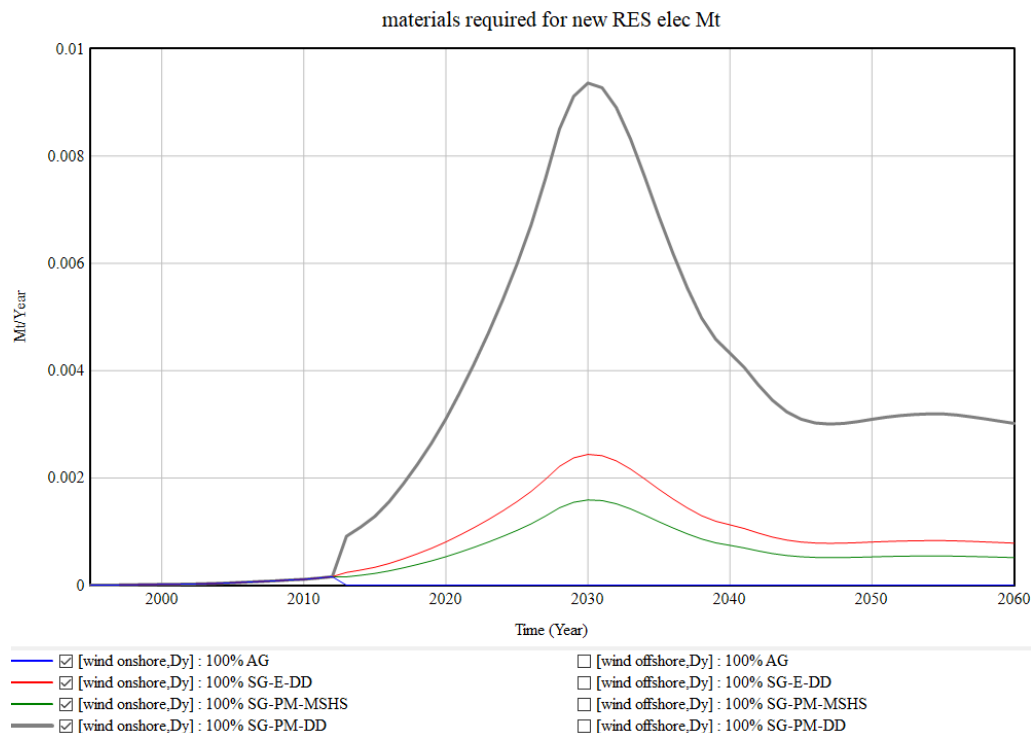


Ilustración 65.- Consumo de Disproso onshore en escenarios extremos

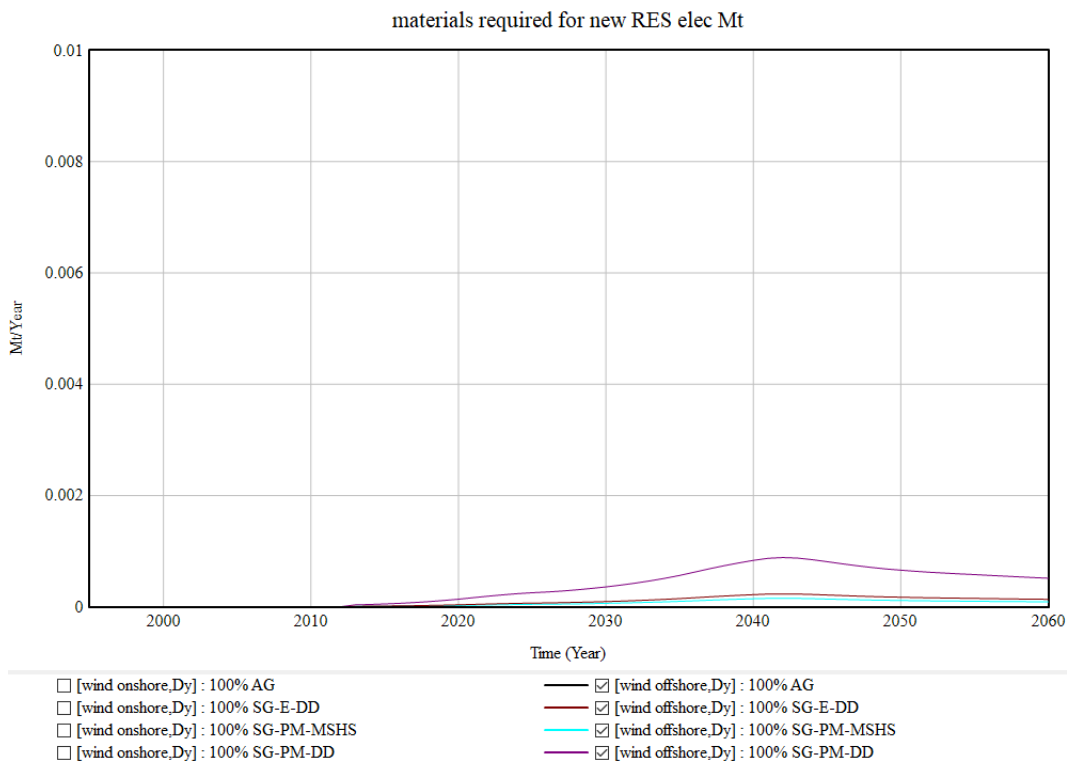


Ilustración 66.- Consumo de Disproso offshore en escenarios extremos

Además de esto, al igual que ocurría con el Neodimio, el Disproso no es empleado para ninguna actividad a excepción de las tecnologías eólicas, y para el año 2060 en el caso más desfavorable se habrán consumido casi un 22% de las reservas actuales.

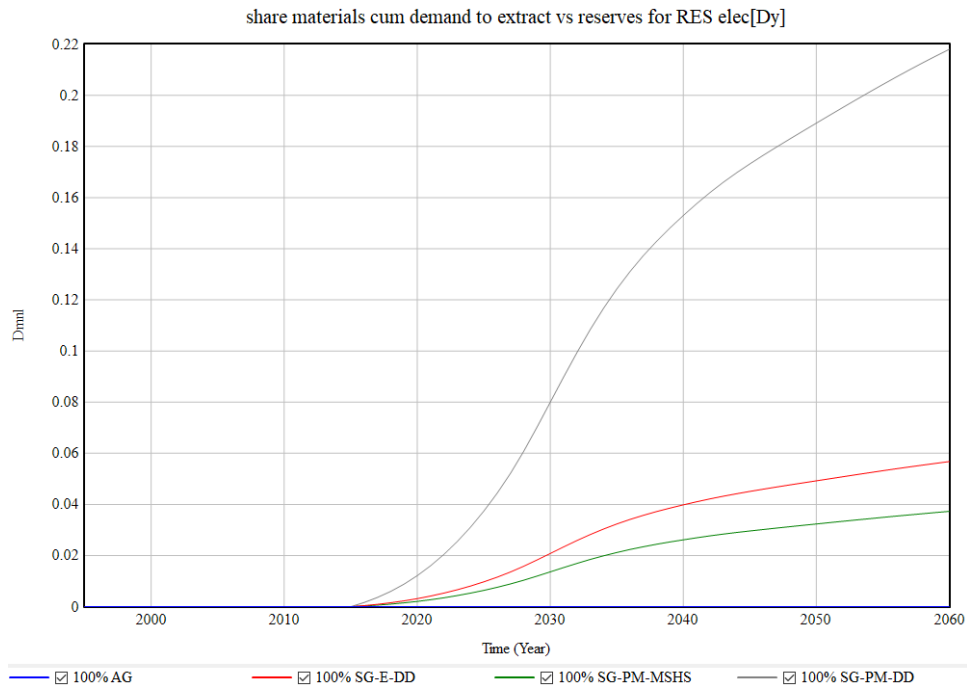


Ilustración 67.- Consumo de Disproso en casos extremos frente a reservas

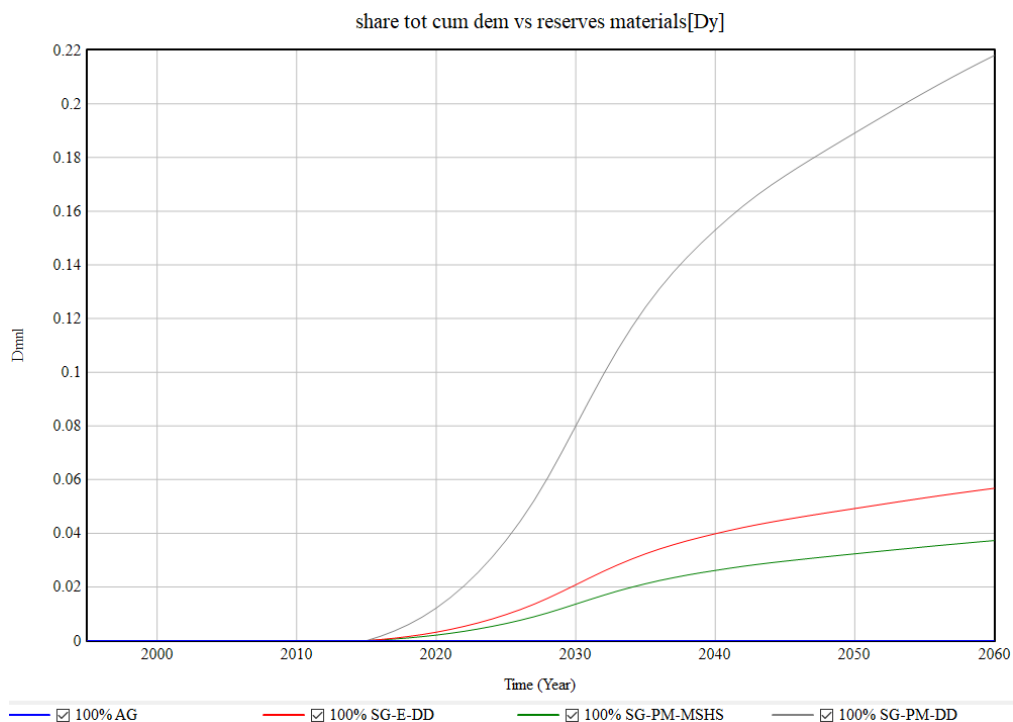


Ilustración 68.- Consumo de Disproso total en casos extremos frente a reservas

3.9.2.- Escenarios de mejora tecnológica y continuidad

Ahora vamos a simular los dos escenarios con proyecciones a futuro, junto con el original sin subdivisiones del modelo anterior de MEDEAS. Estos escenarios ya sí que nos van a permitir valorar un comportamiento racional del mercado de la generación eólica, al contrario que los cuatro escenarios anteriores, que, al ser escenarios extremos, tenían la función de marcar unos límites que podemos considerar como máximos y mínimos para el consumo de materiales.

Como hemos descrito en el apartado 3.8.- Escenarios, se trata de los escenarios 5 y 6, y en la Ilustración 50, la Ilustración 51, la Ilustración 52 y la Ilustración 53 se describen los shares de cada tipo de subtecnología.

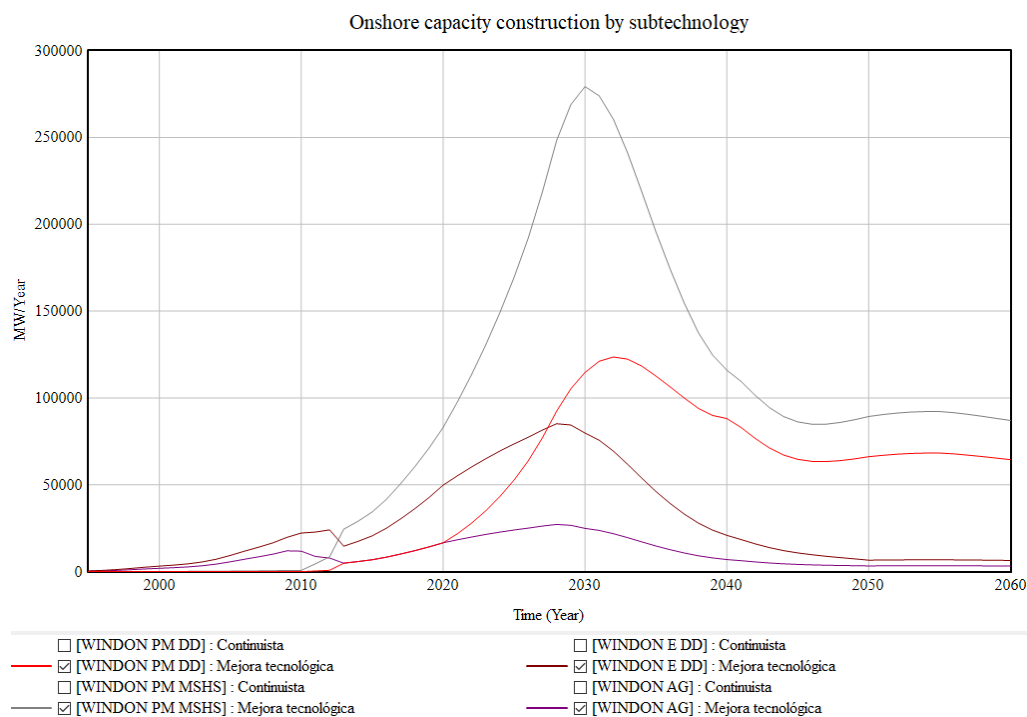


Ilustración 69.- Construcción de nuevos MW onshore para el escenario de mejora tecnológica

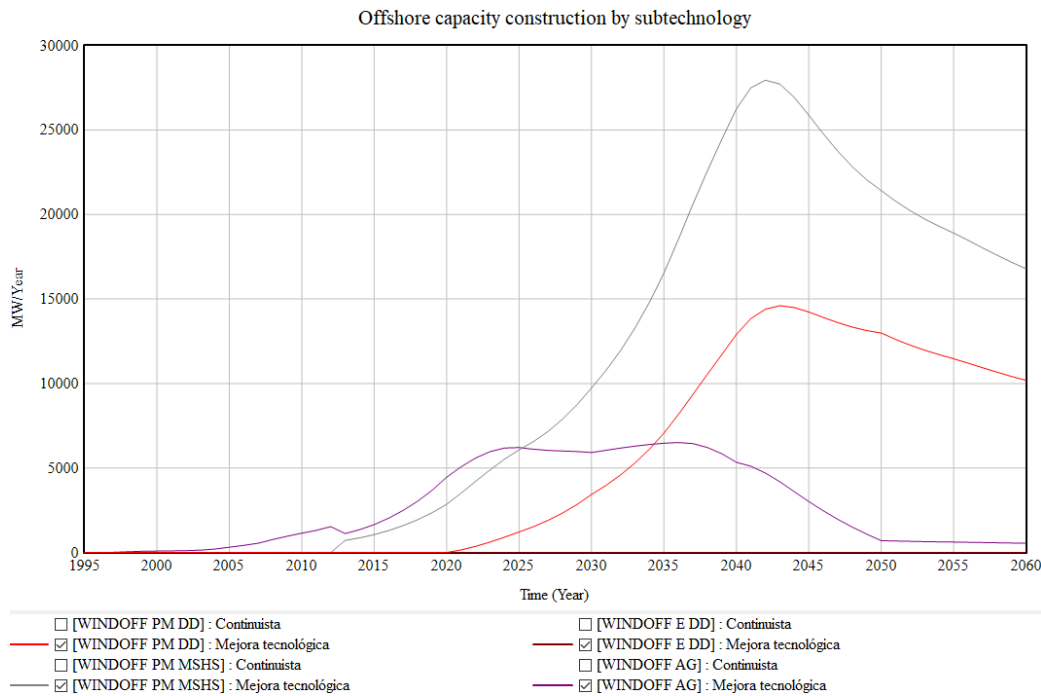


Ilustración 70.- Construcción de nuevos MW offshore para el escenario de mejora tecnológica

La Ilustración 69 y la Ilustración 70 representan la instalación de nuevos MW onshore y offshore respectivamente, divididos por subtecnologías. En el caso de los aerogeneradores tanto terrestres como marinos, la tecnología dominante sería SG-PM-MH/HS, es decir, la compuesta por aerogeneradores de síncronos, de imán permanente, y con caja de cambios, al ser esta una tecnología moderna, sin las desventajas de un generador tradicional con mayores pérdidas tanto mecánicas como eléctricas en el generador, pero todavía con un consumo de materiales críticos comedido, lejos de los elevados valores de la tecnología que la sigue en el segundo puesto, la SG-PM-DD, los aerogeneradores síncronos, de imanes permanentes, y sin caja de cambios.

Sin embargo, el tercer puesto en share varía, siendo para aerogeneradores excitados eléctricamente en el caso onshore, aunque van poco a poco cayendo en desuso hasta casi desaparecer para 2060, y para generadores asíncronos en el caso offshore, con un destino similar.

El parque de estos últimos aerogeneradores, sin embargo, sigue siendo considerable en el año 2060, como se aprecia en la Ilustración 71 y la Ilustración 72, ya que al tener una vida media elevada, 20 años considerados en el modelo, buena parte de ellos siguen en uso al final de la simulación.

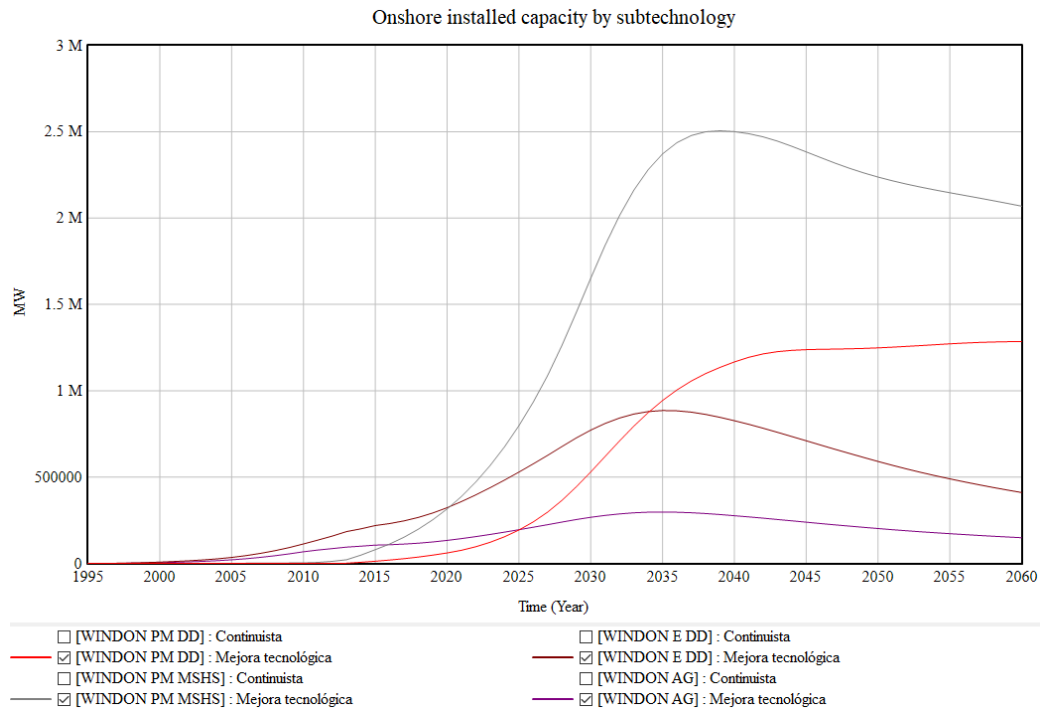


Ilustración 71.- Capacidad instalada onshore en el escenario de mejora tecnológica

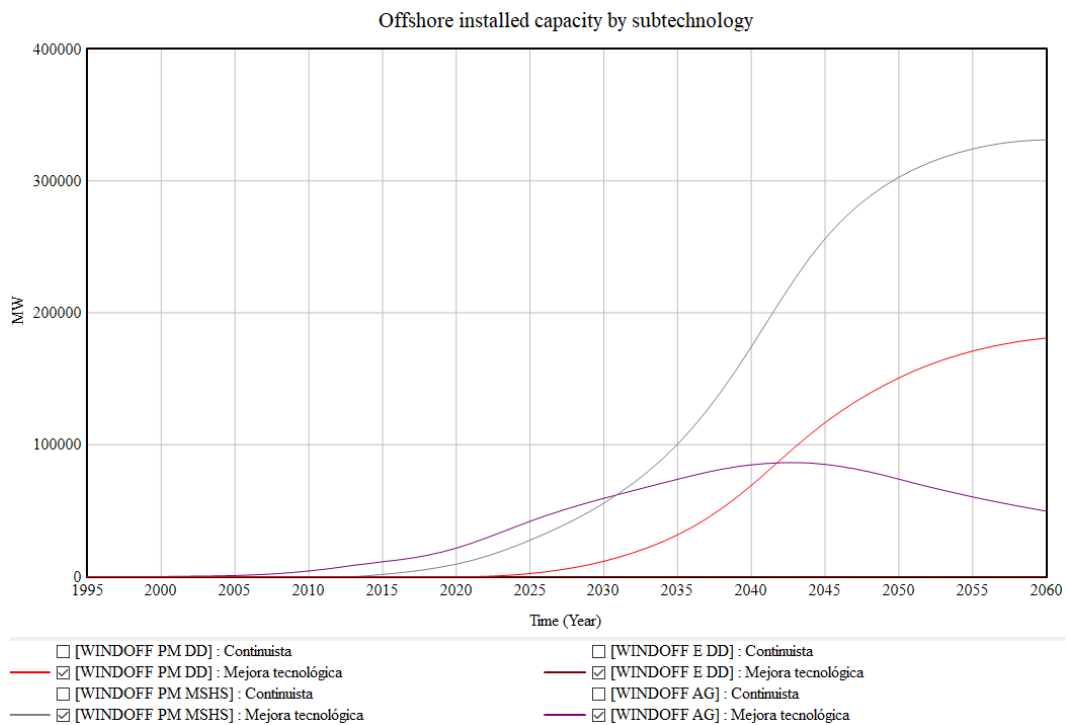


Ilustración 72.- Capacidad instalada offshore en el escenario de mejora tecnológica

En el escenario de continuidad tecnológica (Ilustración 73 e Ilustración 74), los resultados cambian totalmente, pasando a ser dominante para la generación onshore la subtecnología SG-E-DD, y para la generación offshore la AG.

Podríamos decir que se trata del caso complementario, ya que las subtecnologías más antiguas, que en el anterior caso iban abocadas a la desaparición, en este caso aparecen como las grandes dominadoras, al considerar que el mercado no invierte en nuevos sistemas que son los que más proliferan en el escenario de mejora tecnológica.

Esto trae también algunos efectos positivos, como por ejemplo el bajísimo consumo de tierras raras que podremos observar más adelante, debido a que la tecnología que más consume estos elementos (SG-PM-DD) ha desaparecido totalmente en la generación onshore que es la que supone la práctica totalidad de los MW construidos. El por qué esta tecnología no desaparece completamente en la generación offshore, se deberá probablemente a factores como la pequeña cantidad de mantenimiento requerido, vital en el caso de aerogeneradores situados en mar abierto por la dificultad de acceso, pero no demasiado crítica en el caso de los aerogeneradores terrestres, enormemente más fáciles de acceder.

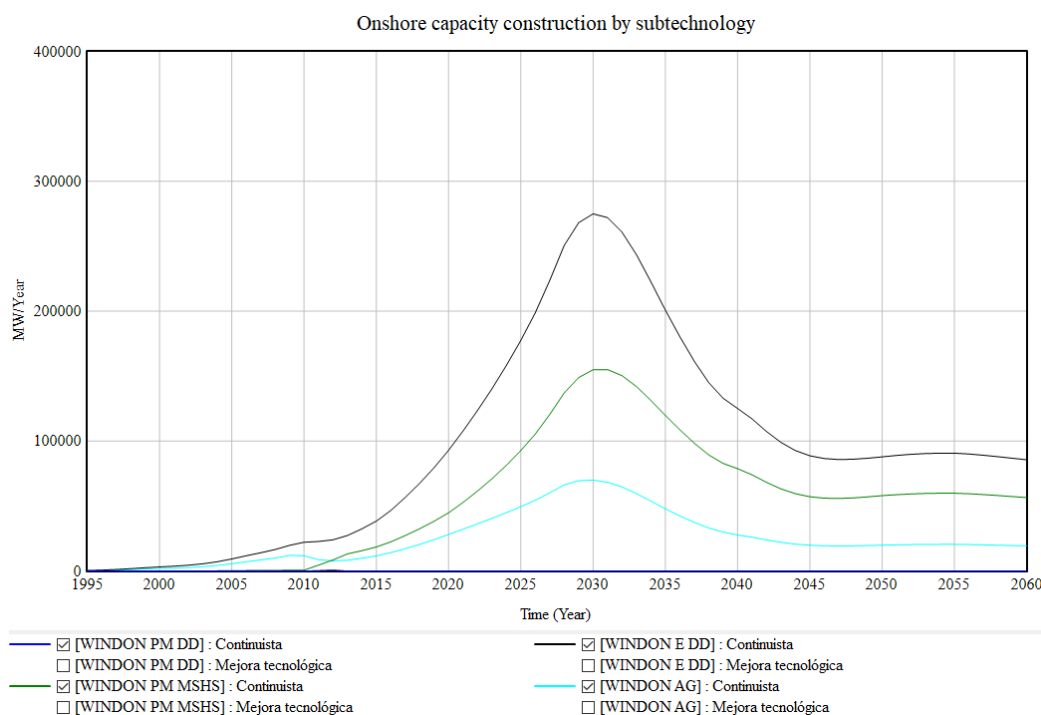


Ilustración 73.- Construcción de nuevos MW onshore para el escenario de continuidad

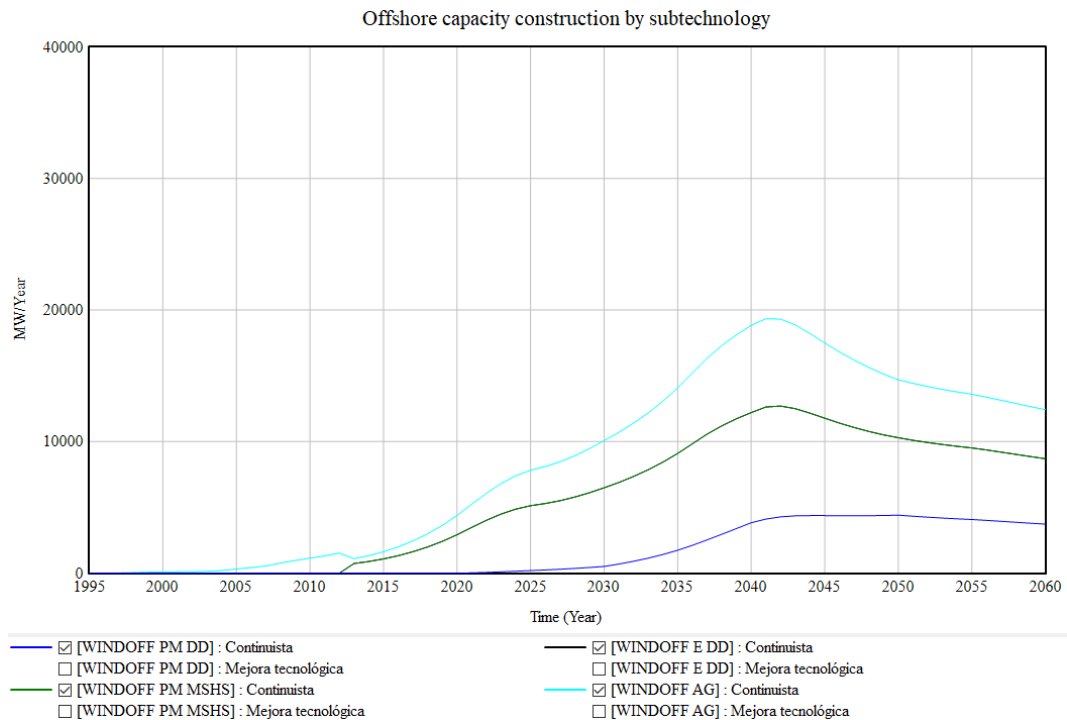


Ilustración 74.- Construcción de nuevos MW offshore para el escenario de continuidad

La capacidad instalada en este escenario, tanto onshore (Ilustración 75) como offshore (Ilustración 76) es muy similar a la anterior, aunque con los cambios en el share propios del empleo de diferentes subtecnologías.

En este caso no hay tecnologías que tiendan a la extinción, como en el anterior, ya que las que no aparecen, no lo hacen desde el principio, y las que sí aparecen se mantienen de forma relativamente estable en su posición.

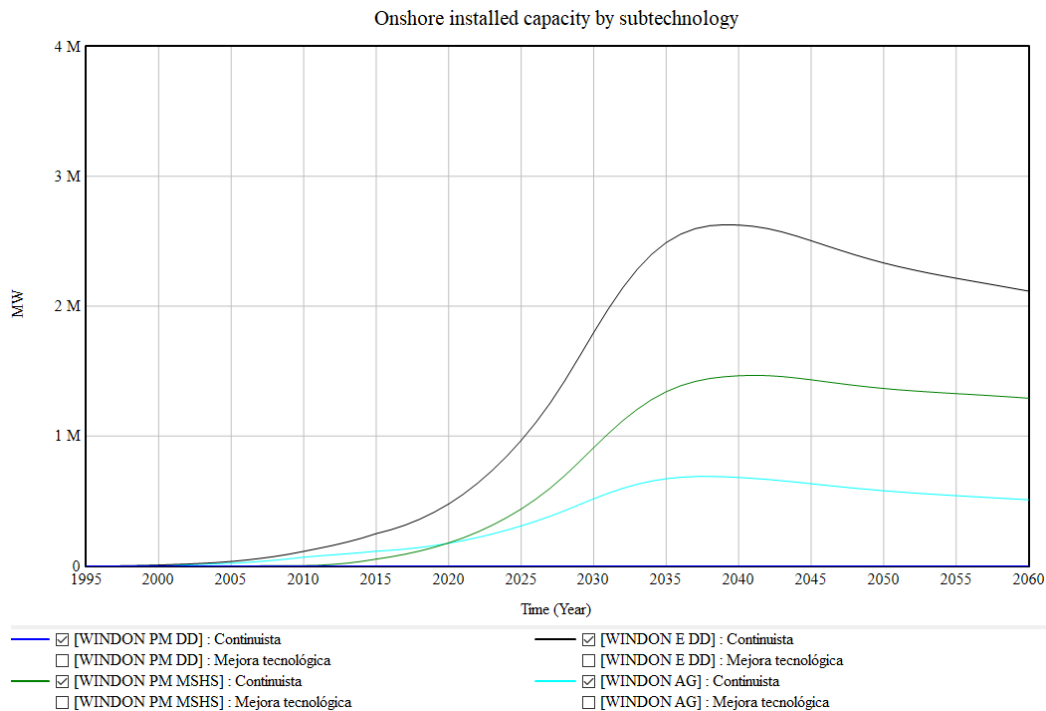


Ilustración 75.- Capacidad instalada onshore en el escenario de continuidad

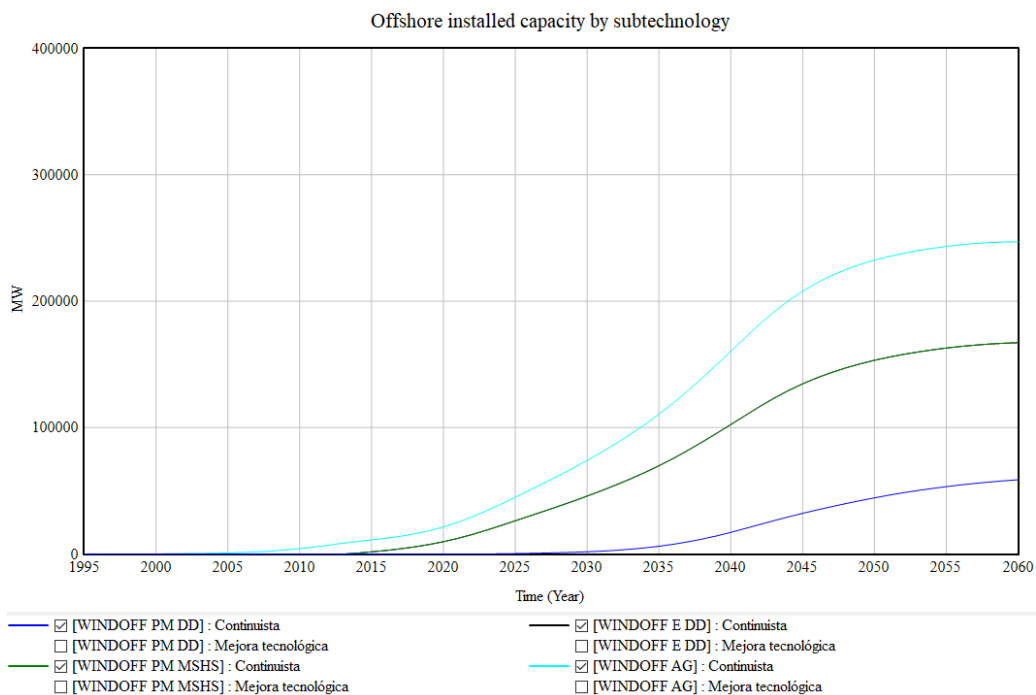


Ilustración 76.- Capacidad instalada offshore en el escenario de continuidad

Resulta interesante observar cómo en los dos escenarios, y aproximadamente a partir de los años 40, se produce un cambio de tendencia en la eólica terrestre, que no sólo deja de crecer, sino que disminuye poco a poco. Esto parece ser compensado con el aumento constante de la generación marina.

Para comprobarlo vamos a crear una nueva variable que agrupe toda la generación onshore, y toda la offshore, y que nos permita comparar ambas en un mismo gráfico.

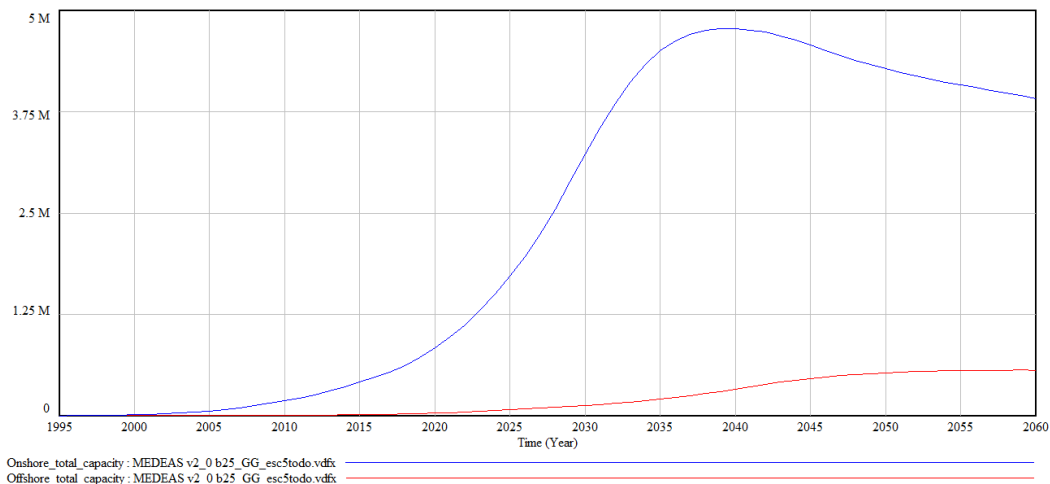


Ilustración 77.- Capacidad onshore y offshore para el escenario de mejora tecnológica

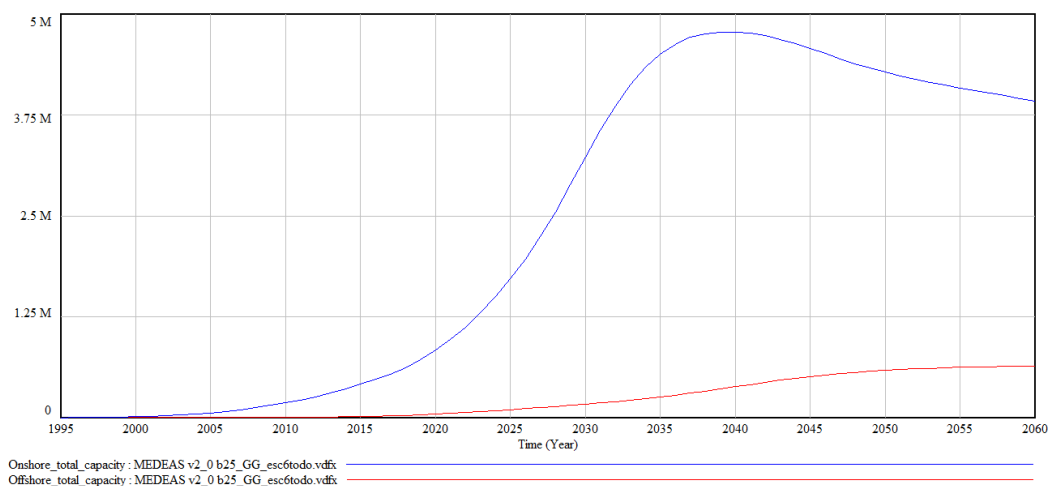


Ilustración 78.- Capacidad onshore y offshore para el escenario de continuidad tecnológica

La Ilustración 77 y la Ilustración 78 para ambos escenarios parecen casi idénticas, sin embargo, existen leves diferencias entre ellas, tan sólo apreciables si se comparan los valores exactos que aporta el modelo, y que podremos ver en la Ilustración 79, en la que se aprecia que en el escenario continuista existe una demanda ligeramente superior de energía renovable eólica, de aproximadamente 0,8 millones de MW para 2060, pasando de 4,48 a 5,56 millones de MW.

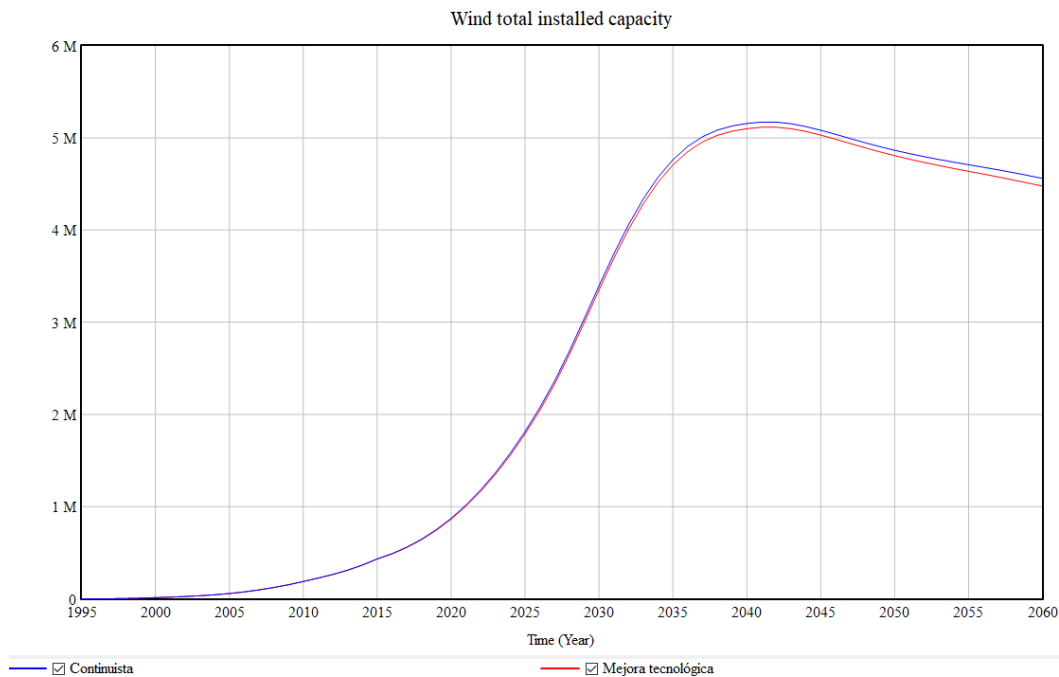


Ilustración 79.- Capacidad total comparada de ambos escenarios

También observamos que la subida constante de las subtecnologías offshore no compensa la caída sufrida por los modelos terrestres, por lo que a partir de 2042 comienza a producirse un leve pero continuo descenso en la demanda de este tipo de energía.

Pasemos ahora a comparar los consumos de materiales, sabiendo siempre que se encontrarán entre los valores más extremos de las simulaciones extremas anteriores.

Comenzando por el cobre, en la Ilustración 80 claramente vemos cómo el escenario continuista (suma de rojo y gris) supone consumos mucho más elevados de este elemento que el escenario de mejora tecnológica (suma de azul y verde). En la Ilustración 81 vamos que una vez incluimos el consumo de cobre del resto de formas de generación renovable, la diferencia es amortiguada, y supone el consumo de casi un 40% de las reservas actuales para 2060.

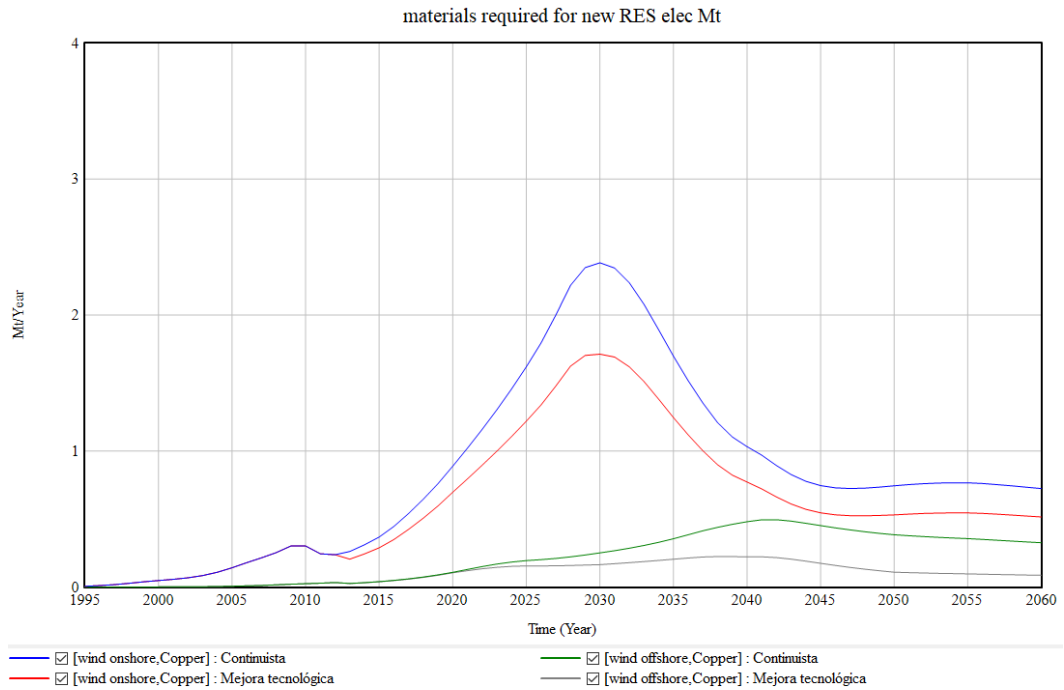


Ilustración 80.- Consumo de Cobre en los escenarios de mejora tecnológica y de continuidad

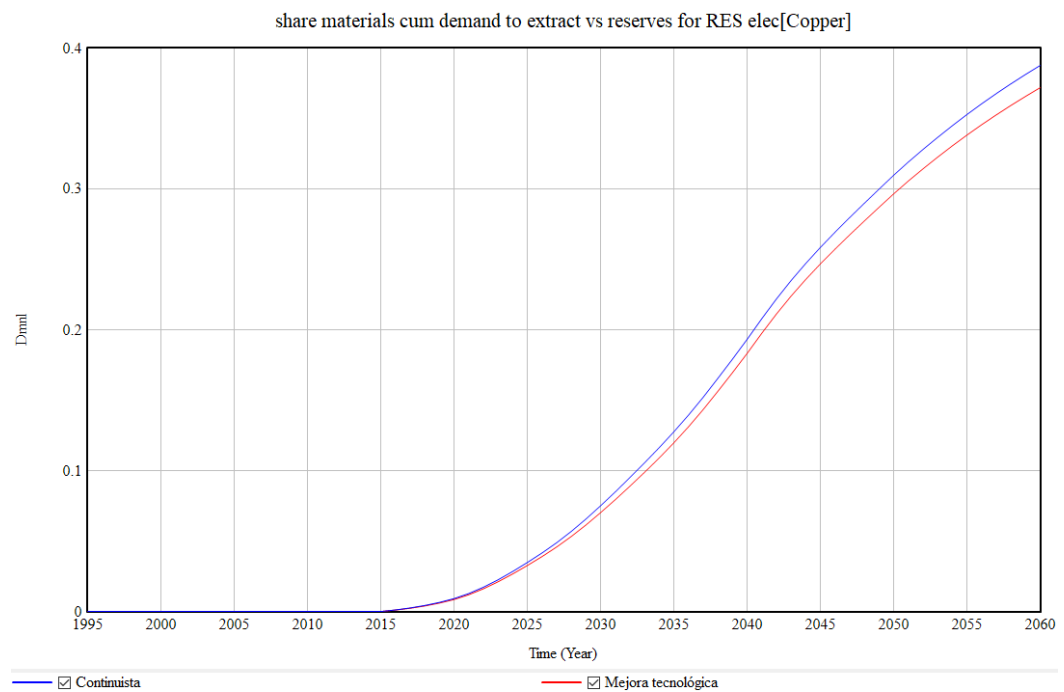


Ilustración 81.- Consumo de cobre para renovables sobre reservas



Ilustración 82.- Consumo de Cobre para otros usos

Añadiendo todos los aspectos del modelo, y no sólo los concernientes a generación de energía renovable, vemos cómo a mediados de 2046 serán consumidas la totalidad de las reservas actuales de Cobre en cualquiera de los dos escenarios. Ahora bien, teniendo en cuenta el total de los recursos existentes todavía no extraídos de este elemento (Ilustración 84), para 2060 se llegaría a un 46,8% consumido para el escenario de mejora tecnológica, y un 47,4% para el escenario de continuidad tecnológica.

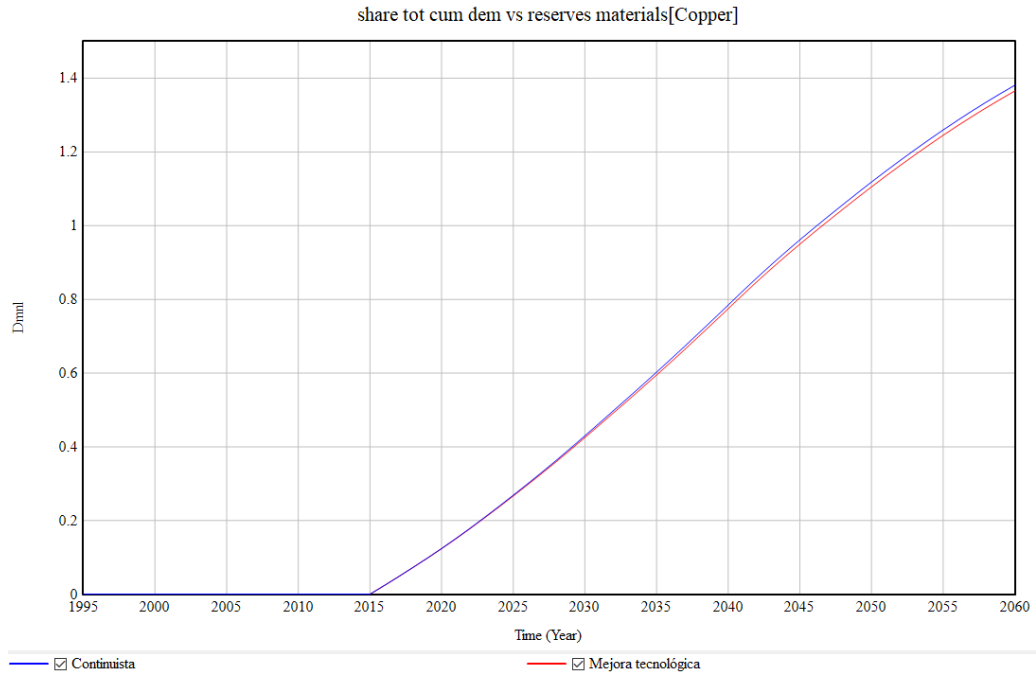


Ilustración 83.- Consumo total de Cobre sobre reservas

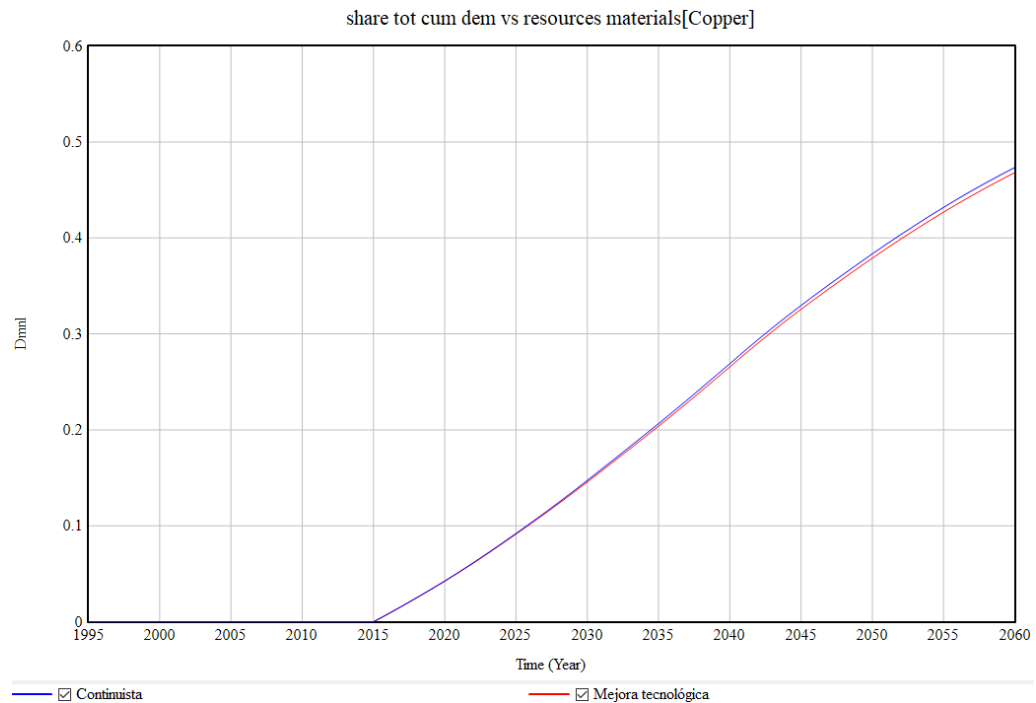


Ilustración 84.- Consumo total de Cobre sobre recursos

Analizando ahora el Neodimio, que probablemente sea el material más crítico para la generación eólica de los considerados, en la Ilustración 85 aparecen el consumo de este material para el escenario de mejora tecnológica (azul + verde) y para el escenario de continuidad (rojo + gris). Las diferencias son considerablemente más grandes que en el caso del Cobre, llegando incluso a duplicarse en consumo en el escenario de mejora tecnológica.

Por suerte cuando se produce la estabilización en la demanda de energía eólica, dicho consumo disminuye al exclusivamente necesario para la fabricación de imanes permanentes para aerogeneradores de nueva construcción.

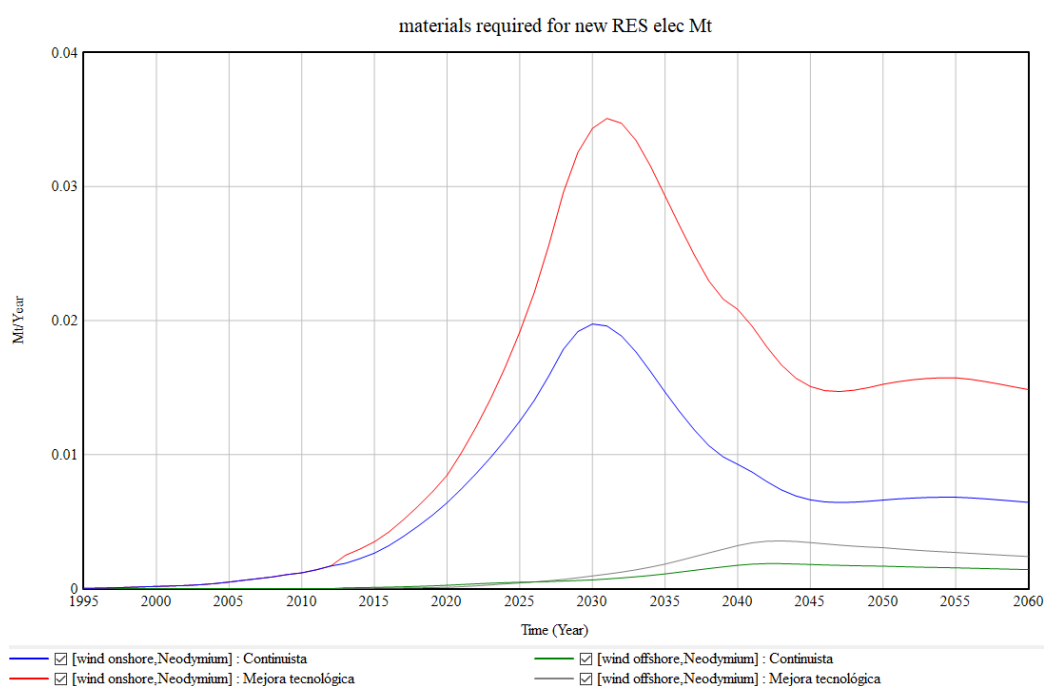


Ilustración 85.- Consumo de Neodimio en los escenarios de mejora tecnológica y de continuidad

Al no ser necesario Neodimio para la fabricación de ninguna otra renovable, ni estar considerado en ningún otro aspecto del modelo, la Ilustración 86 representa a la vez el consumo de Neodimio sobre las reservas actuales de la generación eólica, de la generación global por renovables, y de la generación de energía global.

Vemos que, en el escenario de mayor consumo, el de mejora tecnológica, apenas consume para 2060 un 4,6% de las reservas actuales, mientras que en el escenario de mejora tecnológica dicha cantidad se reduce aún más, hasta un 2,5%.

Siendo los recursos existentes sin extraer aún mayores, sobre este valor se arroja un consumo del 1,6% y 0,9% respectivamente, por lo que no parece que haya problemas de escasez material. El elemento que podría provocar esta escasez, vistos estos resultados, serían hipotéticas políticas de no exportación por parte de China, principal extractora de este elemento, o la subida de los precios que pudieran influir en las subtecnologías a construir.

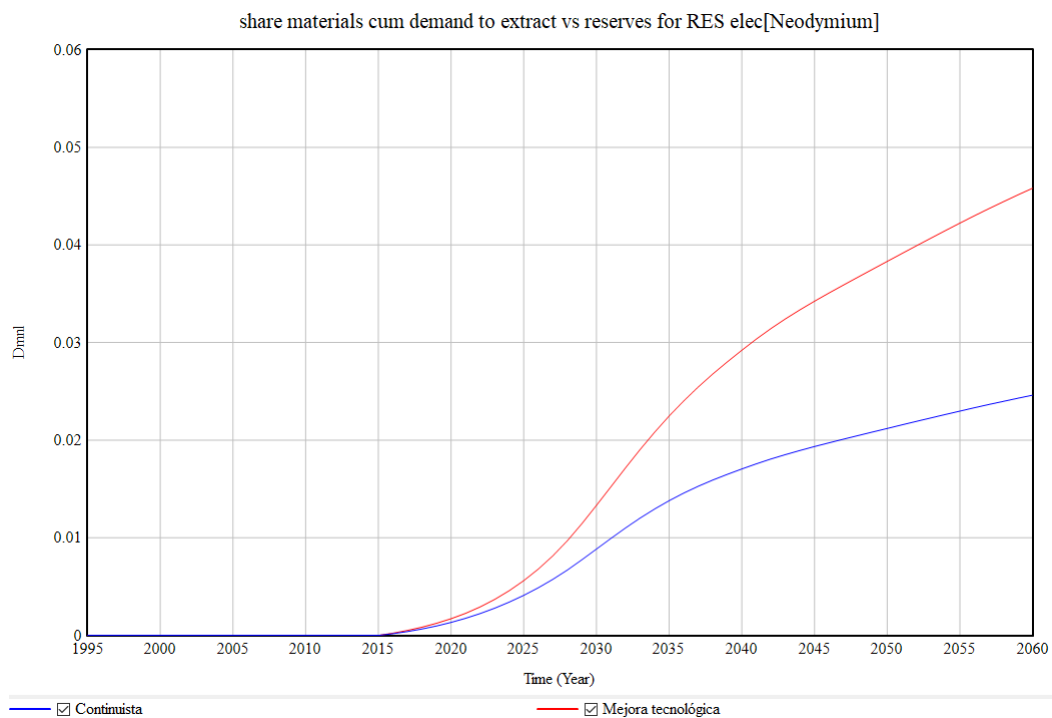


Ilustración 86.- Consumo de Neodimio en renovables sobre reservas

El caso del Disprosio (Ilustración 87 e Ilustración 88) es bastante similar al del Neodimio, con la diferencia de que en este caso las proporciones de consumo llegan hasta el 8,7% en el escenario de mejora tecnológica, y al 4,3% en el escenario continuista.

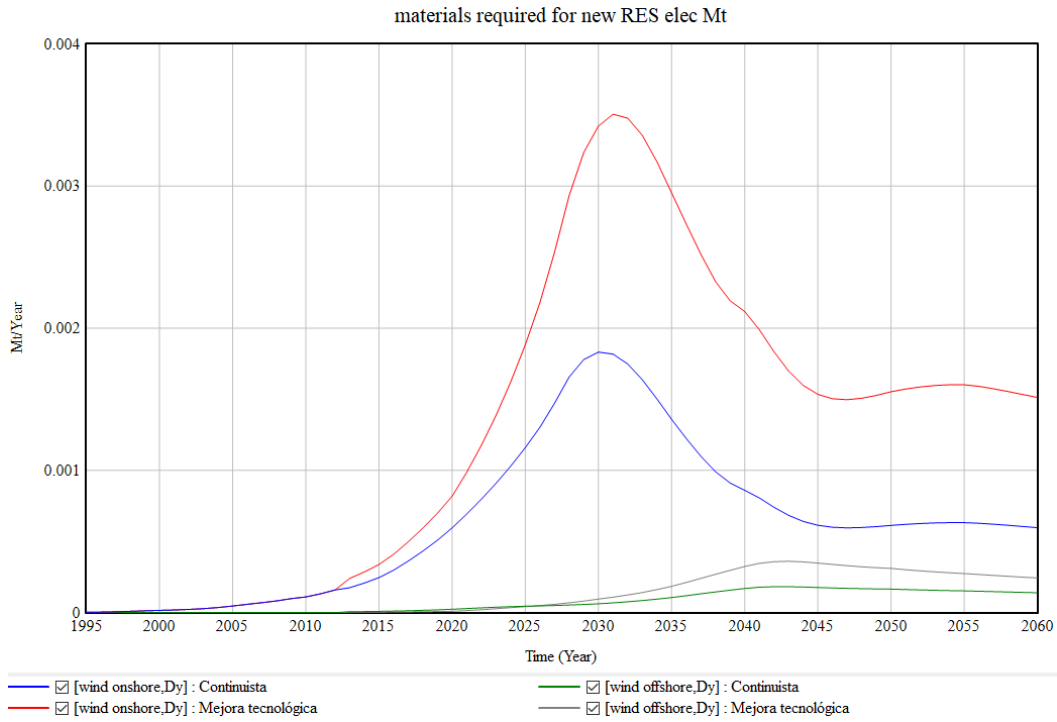


Ilustración 87.- Consumo de Disproso en los escenarios de mejora tecnológica y de continuidad

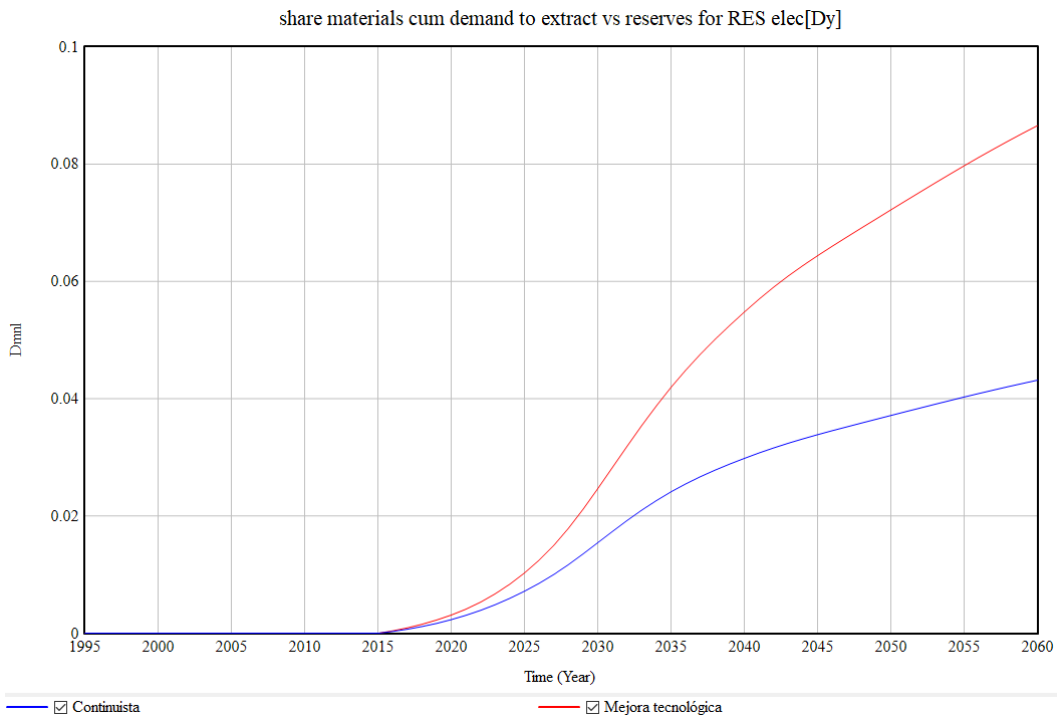


Ilustración 88.- Consumo de Disproso en renovables sobre reservas

3.9.3.- Disminución en la intensidad material de Neodimio y Disproseo

Ahora vamos a variar ligeramente estos escenarios, activando el interruptor que programamos anteriormente, para calcular los resultados que se obtendrían en los escenarios continuista, y de mejora tecnológica, si se produjera la reducción en las intensidades materiales de Neodimio y Disproseo pronosticada debido a las esperadas mejoras en los procesos de fabricación de imanes permanentes, debido a la generalización de las subtecnologías en las que son más utilizados.

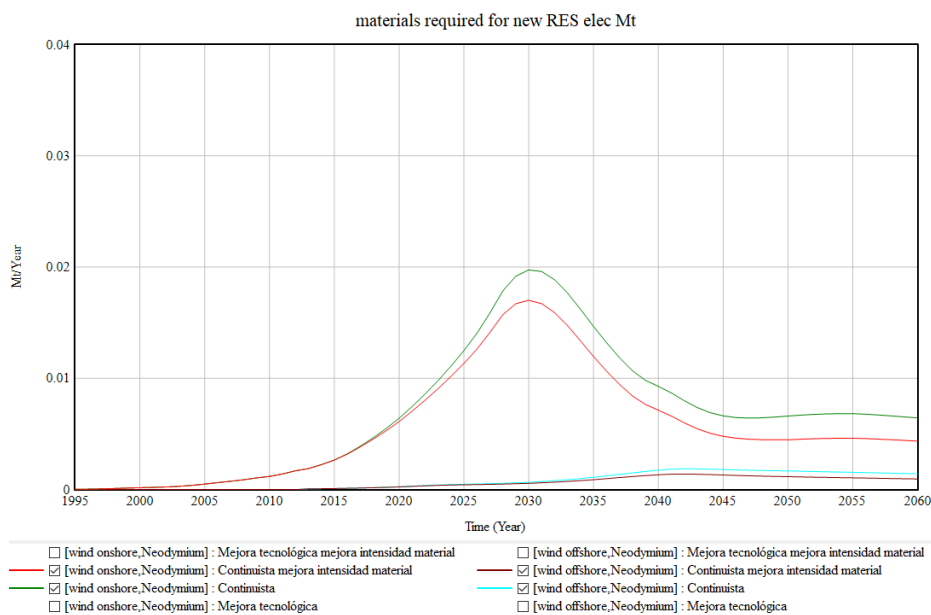


Ilustración 89.- Reducción de Neodimio en el escenario continuista

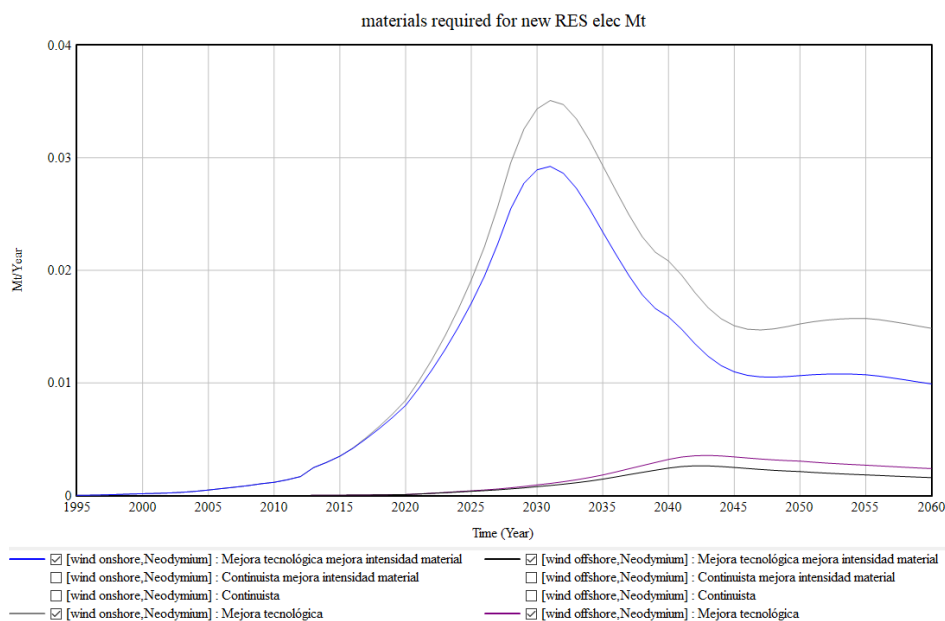


Ilustración 90.- Reducción de Neodimio en el escenario de mejora tecnológica

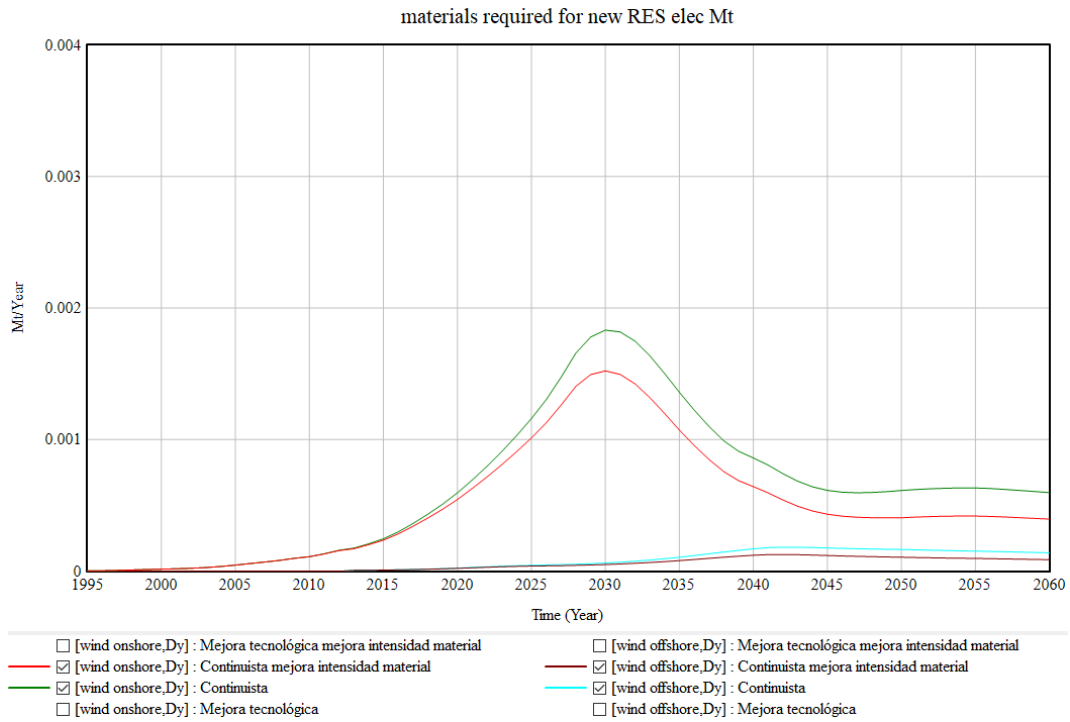


Ilustración 91.- Reducción de Disprosió en el escenario continuista

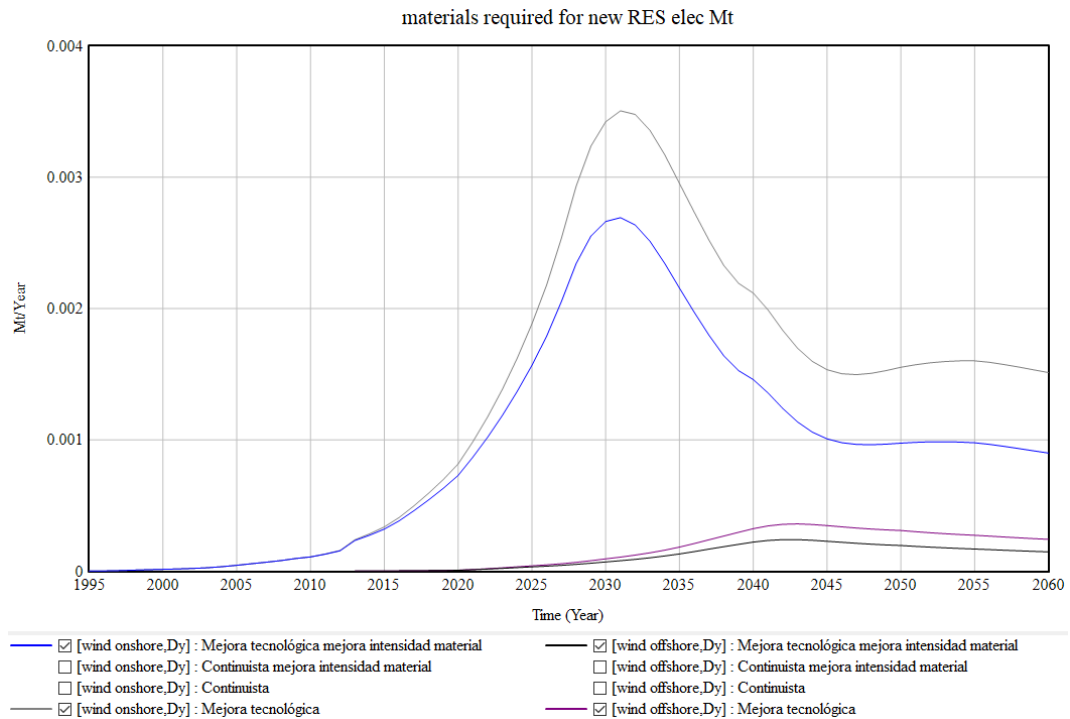


Ilustración 92.- Reducción de Disprosió en el escenario de mejora tecnológica

Dicha reducción aparece representada en la Ilustración 89, la Ilustración 90, la Ilustración 91 y la Ilustración 92. Es muy elevada, de aproximadamente un tercio del total (entre un 32 y un 34%) a partir de aproximadamente 2040.

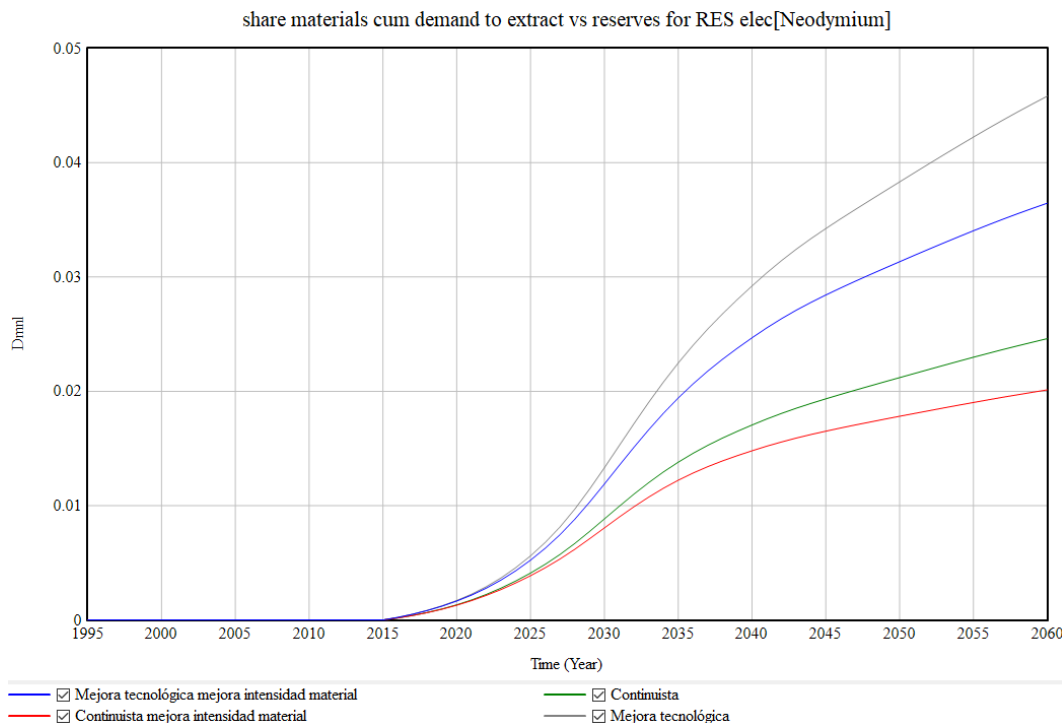


Ilustración 93.- Consumo de Neodimio sobre reservas con mejora

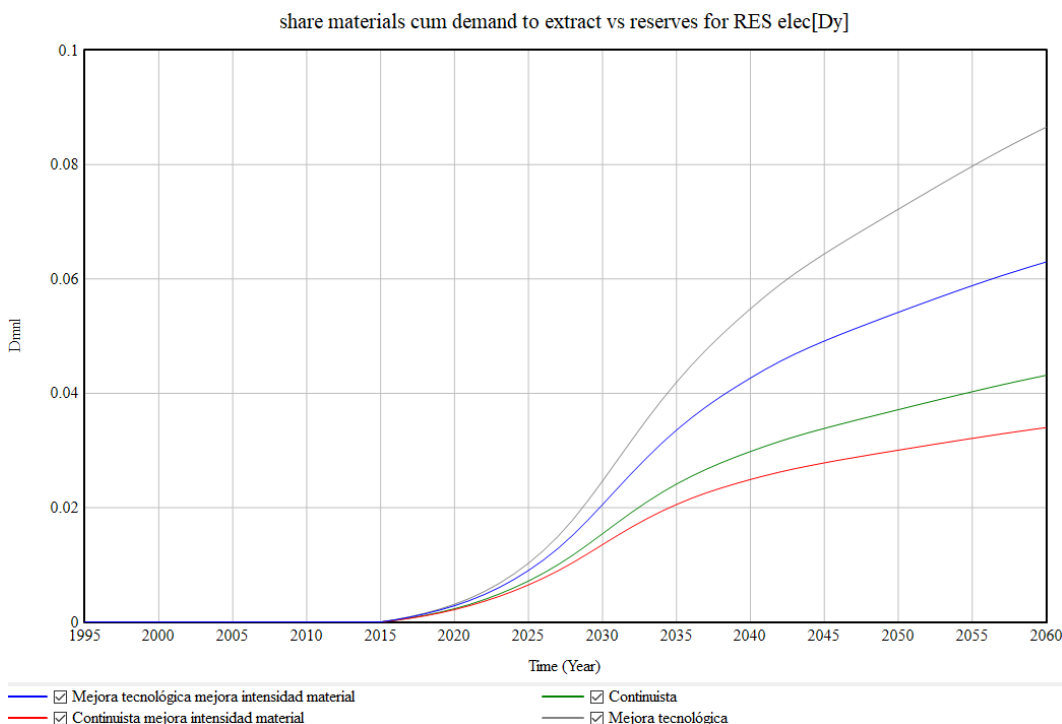


Ilustración 94.- Consumo de Disprosio sobre reservas con mejora

3.9.4.- Caso de menores reservas

Si tomamos en cuenta estos escenarios, y de nuevo con los valores medios de reservas estudiados por (Junne et al., 2020), las reservas de Neodimio (Ilustración 93) y de Disproσιο (Ilustración 94) corren aún menos peligro que en el anterior caso. Esto no concuerda con la habitual atención a la que están sometidos estos elementos por su consideración de críticos, y (Junne et al., 2020) nos propone un rango de valores por lo que vamos a hacer una prueba más con ellos.

Dichos valores son los siguientes:

	Neodimio	Disproσιο
Reservas	10 Mt	46 Mt
Recursos	0,85 Mt	3 Mt

Tabla 4.- Reservas y Recursos medios de Neodimio y Disproσιο según (Junne et al., 2020)

Para comprobar de una forma más firme que no parece haber problemas de falta de suministro con estos elementos, vamos a volver a simular, teniendo en este caso en cuenta los valores mínimos propuestos, que son:

	Neodimio	Disproσιο
Reservas	10 Mt	46 Mt
Recursos	0,85 Mt	3 Mt

Tabla 5.- Reservas y Recursos mínimos de Neodimio y Disproσιο según (Junne et al., 2020)

Además de esto, (Valero et al., 2018) considera que tan sólo el 14,91% de Neodimio utilizado globalmente será demandado por el mercado de la energía eólica, así como el 17,68% del Disproσιο, proviniendo el resto del consumo principalmente de la fabricación de vehículos eléctricos, y también de otros sectores productivos menores. La implicación de este hecho en los resultados es discutida en el final de este apartado.

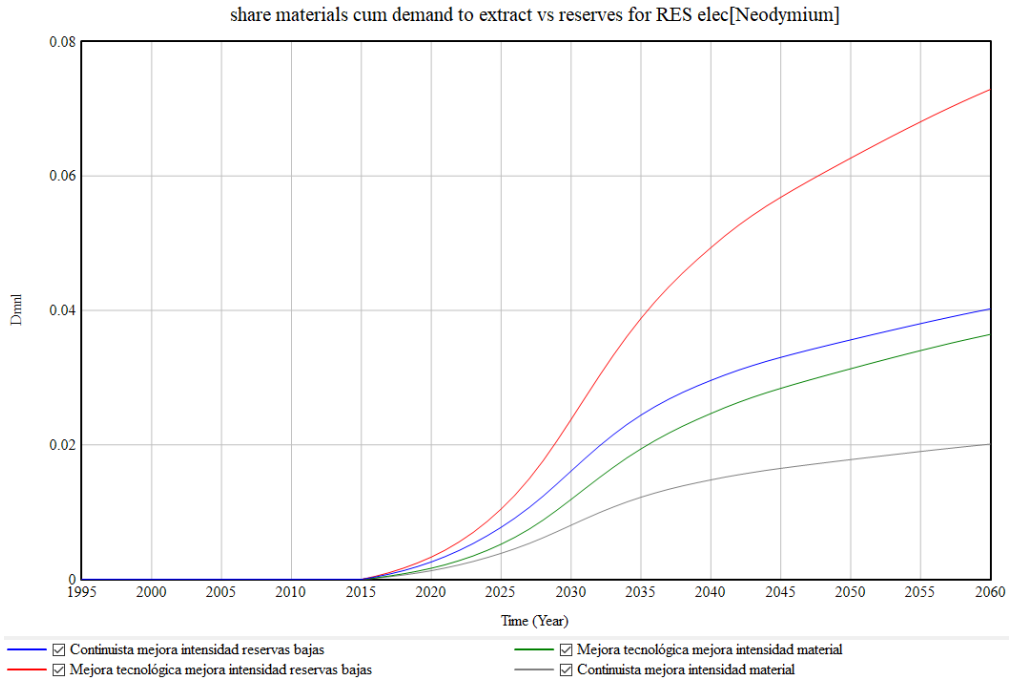


Ilustración 95.- Consumo de Neodimio sobre reservas mínimas (Tabla 5)

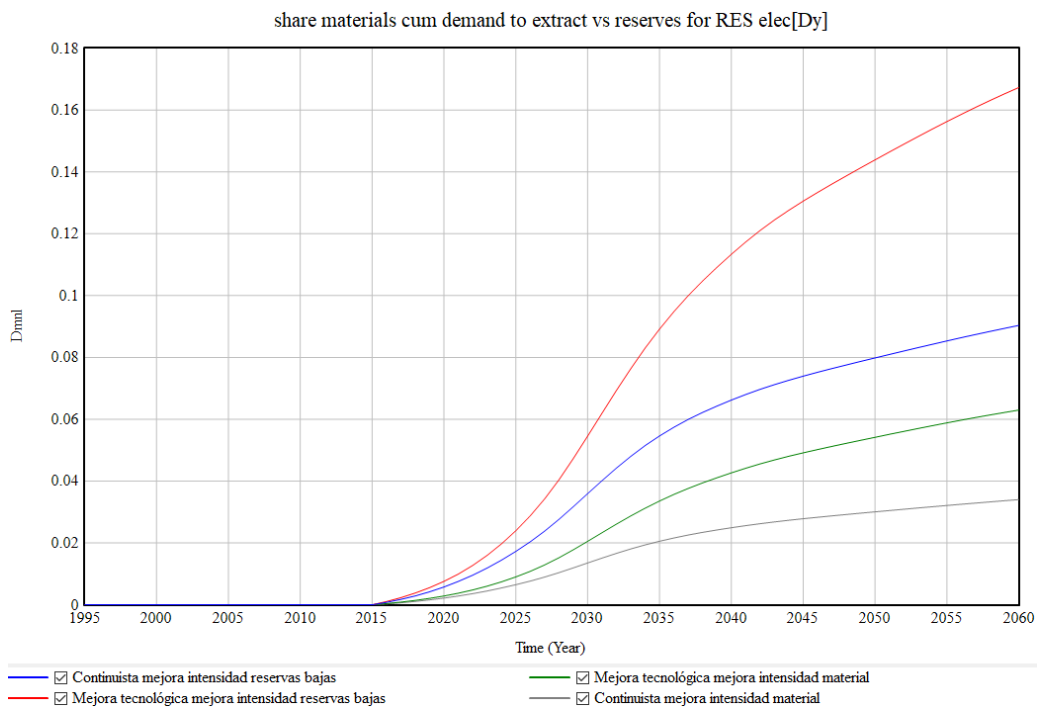


Ilustración 96.- Consumo de Disprosio sobre reservas mínimas (Tabla 5)

En la Ilustración 95 y la Ilustración 96 se aprecia cómo a pesar de tener en cuenta las reservas mínimas propuestas por Junne, apenas se llega a un 7% de consumo de Neodimio y un 17% de Disprosio para 2060 en el caso más desfavorable para este consumo, el de mejora tecnológica.

Es importante recalcar que los valores aquí mostrados sobre consumos de Neodimio y Disproso tan sólo tienen en cuenta su uso en imanes permanentes de aerogeneradores, que es el tema que ocupa a este trabajo. Sin embargo, también son utilizados, por ejemplo, para la fabricación de motores eléctricos o híbridos de medios de transporte (Valero et al., 2018), un sector que ya actualmente supone una parte importante del mercado de la automoción y que crece año tras año. Además de esto también tiene otros usos a menor escala, como son por ejemplo los auriculares o las pastillas de las guitarras eléctricas.

Al contrario que el resto de elementos del modelo MEDEAS (como por ejemplo el Cobre, que es el otro analizado en este trabajo), dichas aplicaciones adicionales del Neodimio y Disproso no son tenidas en cuenta por MEDEAS, por lo que los valores de consumo obtenidos provienen íntegramente de la generación eólica. Esto puede hacer que, aunque los valores de consumo en generación eólica sean fiables, los valores de consumo global no resulten realistas al dejarse de lado el resto de aplicaciones, y provoquen una aparente falta de criticidad que no se corresponde con la realidad.

3.9.5.- EROI

El EROI, siglas de “Dynamic Energy Return on Energy Investment”, o “Tasa de Retorno Energético” en castellano (I. Capellán-Pérez et al., 2019), (Hall et al., 2014), es una medida que representa la cantidad de energía extraída de un medio de generación, como puede ser en nuestro caso, la energía eólica, con respecto a la energía que se ha empleado en la construcción, mantenimiento, t desmantelamiento de dicho medio de generación.

Expresado en otras palabras, la ganancia real de energía que supone la utilización de dicho medio, y no la energía producida por dicho medio, ya que parte de ella debe compensar la energía consumida en su vida útil.

Por lo general, este valor suele ser mayor en el caso de los combustibles convencionales, razón por la cual se utilizan más masivamente.

El modelado del EROI dinámico en MEDEAS está realizado en la pestaña “energy|EROI.RES_elec”, con la programación representada en la Ilustración 97.

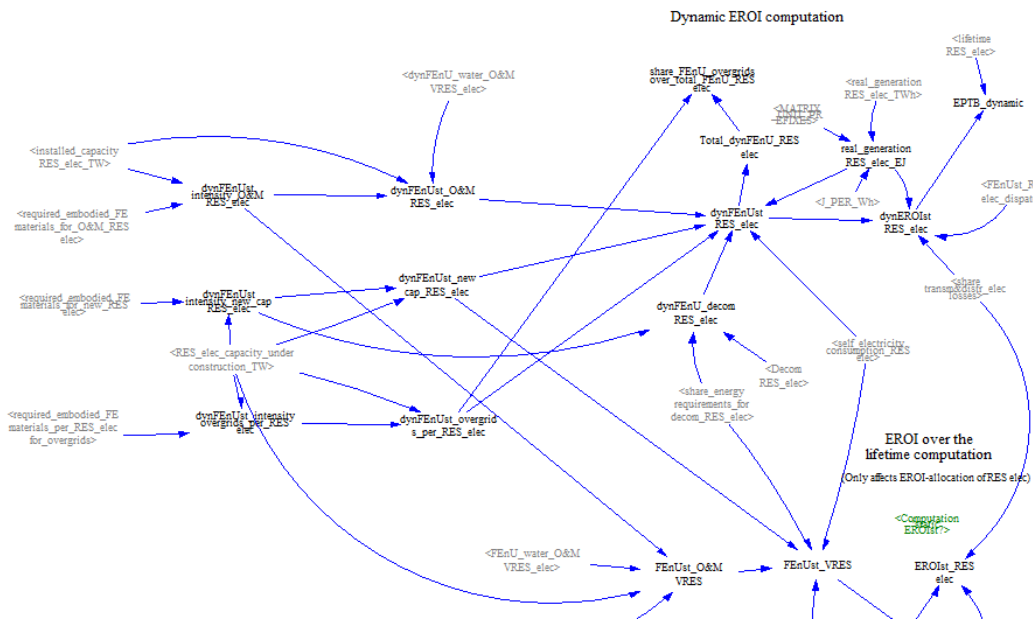


Ilustración 97.- Pestaña "energy|EROI.RES_elec" de MEDEAS

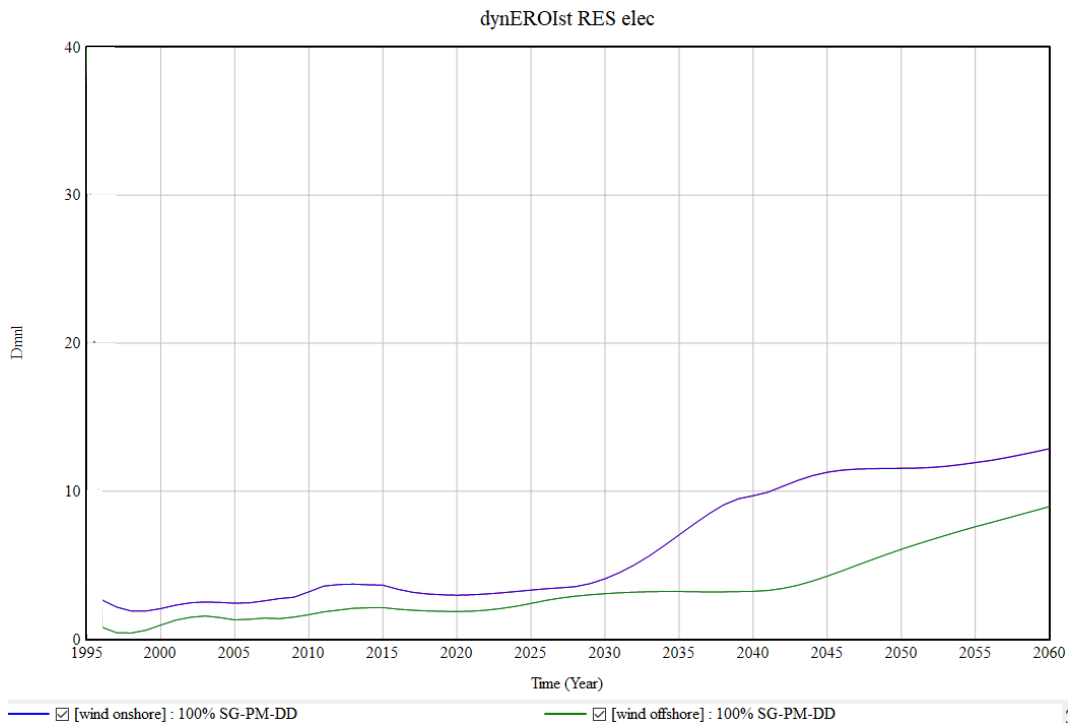


Ilustración 98.- EROI SG-PM-DD

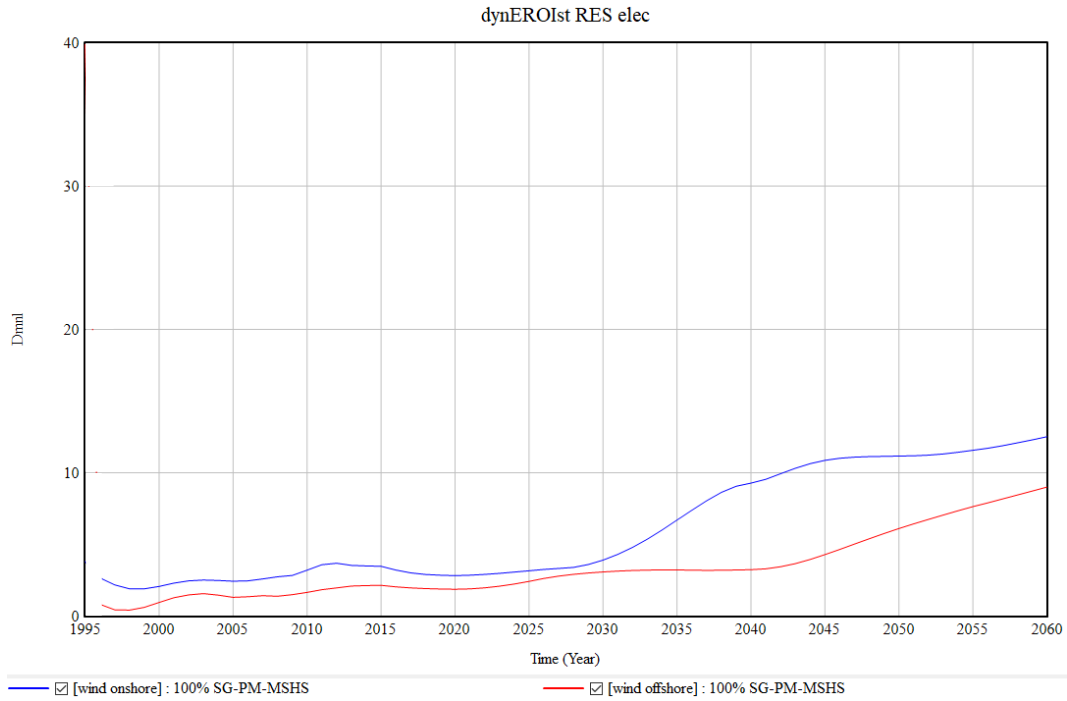


Ilustración 99.- EROI SG-PM-MS/HS

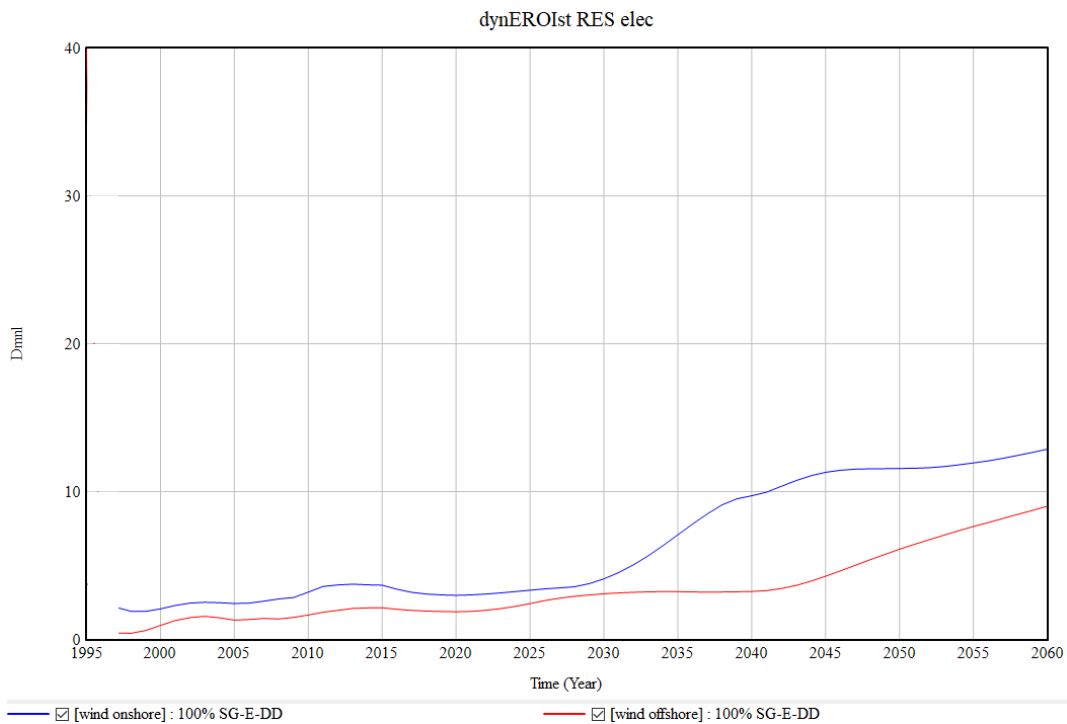


Ilustración 100.- EROI SG-E-DD

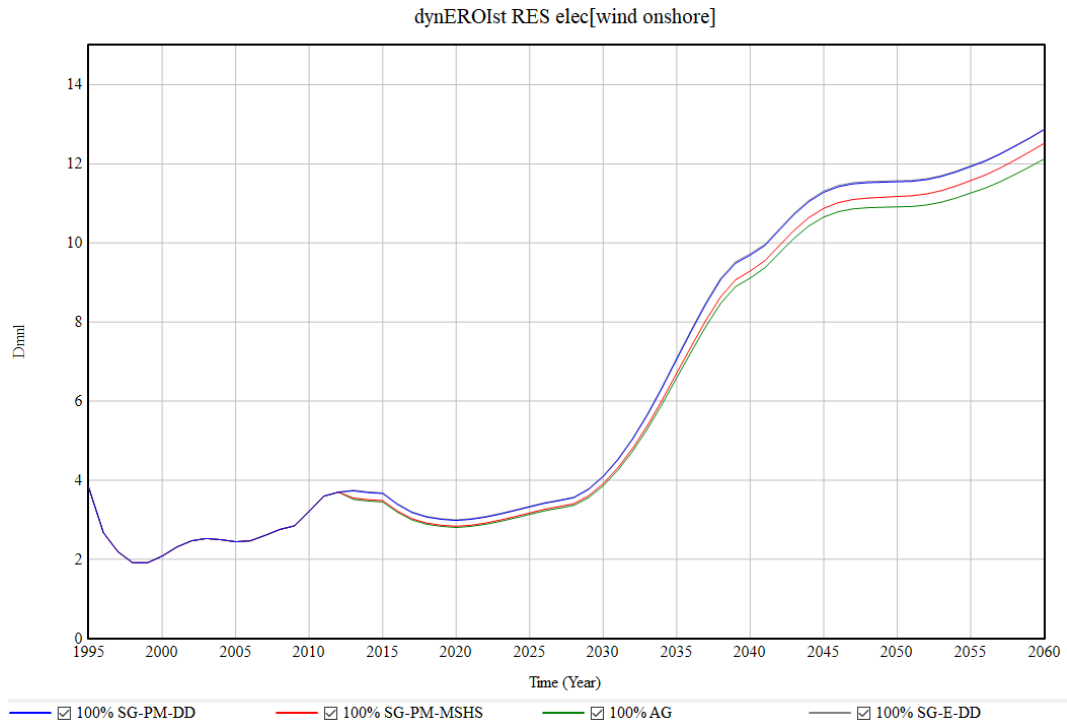


Ilustración 101.- EROI onshore de las distintas subtecnologías

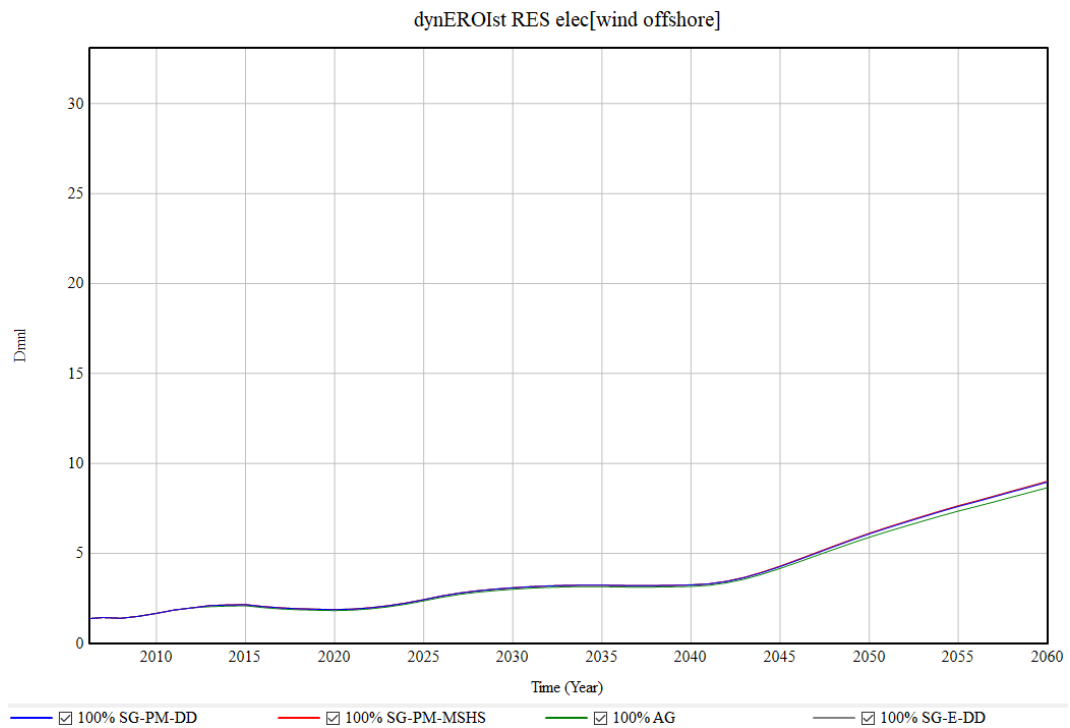


Ilustración 102.- EROI offshore de las diferentes subtecnologías

La subtecnología SG-PM-DD alcanza para sus modelos terrestres y marinos unos EROI de 12,86 y 8,96.

Los modelos SG-PM-MS/HS cuentan con EROI de 12,52 y 9,01 respectivamente al final de la simulación.

Para el caso de la subtecnología SG-E-DD, el EROI máximo en 2060 es de 12,88 y 9,02 para los modelos terrestres y marinos respectivamente.

La tecnología AG alcanza unos EROI de 12,12 y de 8,65 para sus modelos terrestres y marinos respectivamente.

La mejora experimentada a lo largo del tiempo para los cuatro casos es considerable. Sin embargo, esto no se debe a una mejora tecnológica realizada sobre las subtecnologías de aerogeneradores, sino que se debe a que, en los primeros años, debido a la enorme expansión de la capacidad instalada, la energía invertida no se va recuperando de forma inmediata, ya que gran parte de ella se destina a “financiar” energéticamente la nueva capacidad instalada. De esta forma cuando se alcanza un nivel de capacidad instalada más estable (Ilustración 54 e Ilustración 55), sí que se consigue entrar en un periodo de gran retorno energético.

Vemos claramente cómo apenas existen diferencias entre ellas. En todo caso, la de los modelos terrestres siempre se mantiene por encima.

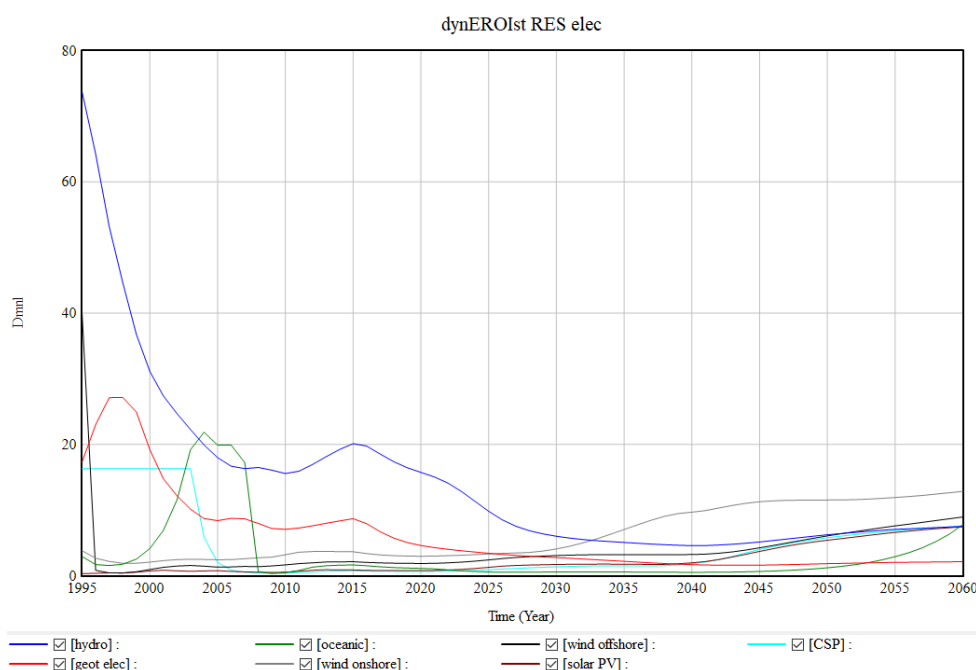


Ilustración 103.- EROI renovables

La Ilustración 103 compara los valores obtenidos para nuestras tecnologías eólicas con el resto de formas de generación de energía renovable. Inicialmente ambas comienzan la simulación con un EROI muy bajo durante los primeros años, pero a partir de aproximadamente 2025, su crecimiento constante, frente a la disminución en el EROI del resto de formas de generación hace que se pongan por delante, llegando a 2060 con la eólica terrestre como la energía renovable que mejor aprovecha la energía invertida en su construcción, y la eólica marina en segunda posición, con los valores de EROI descritos anteriormente.

Dichos valores son los correspondientes a cada subtecnología. Si calculamos los globales para los escenarios de mejora tecnológica y continuista, obtenemos la Ilustración 104.

En la eólica terrestre el EROI apenas cambia entre escenarios, siendo de 12,662 en el escenario continuista y de 12,664 en el de mejora tecnológica, que mejora, pero en una cantidad despreciable.

Sin embargo, no ocurre así en el caso de la eólica marina, que pasa de un EROI de 6,822 en el caso continuista hasta un 8,957 en el escenario de la mejora tecnológica.

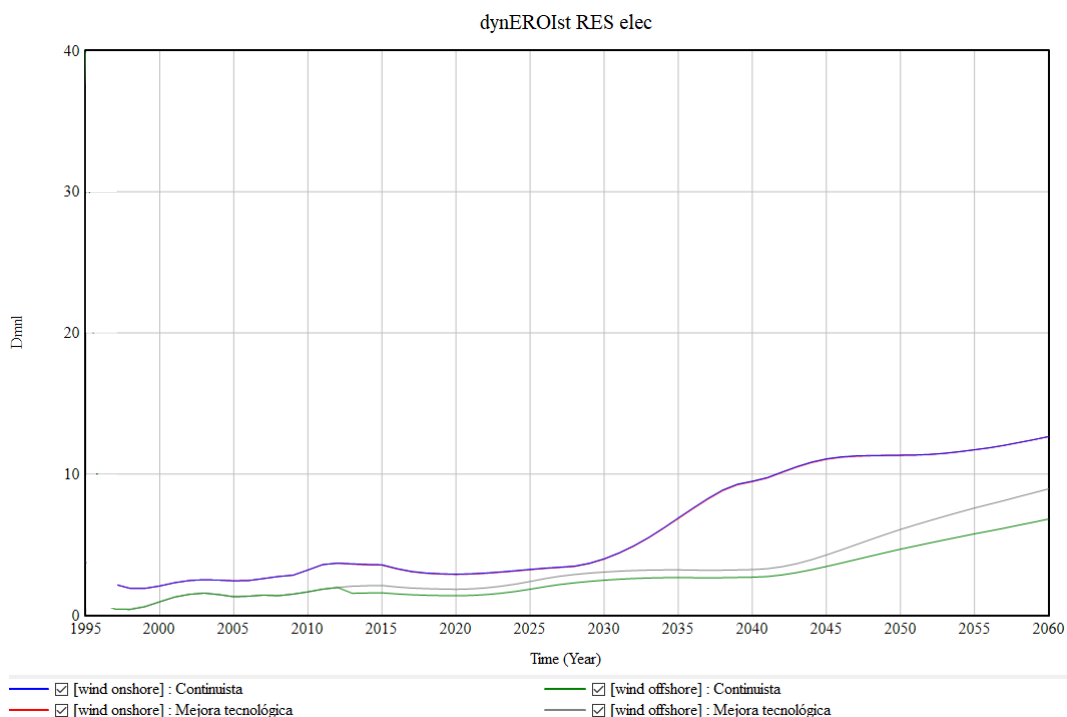


Ilustración 104.- EROI escenarios de mejora tecnológica y continuista

En el modelo MEDEAS-W original se obtenían los siguientes resultados:

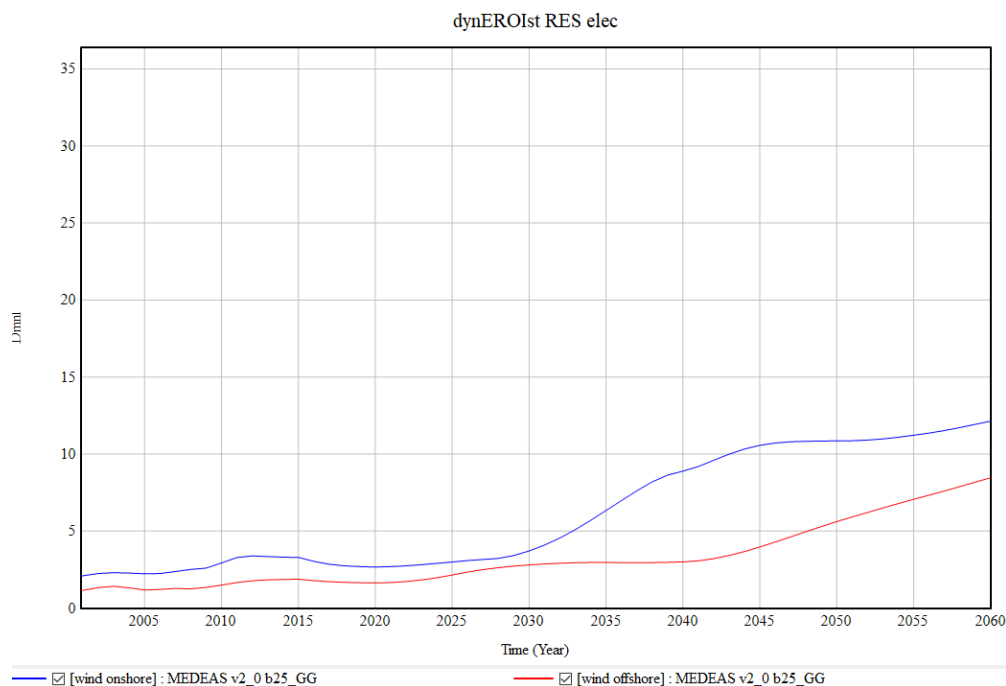


Ilustración 105.- EROI del modelo MEDEAS-W original

El EROI final para la eólica terrestre en 2060 llegaba hasta el 12,138, inferior a los 12,66 de los dos escenarios del nuevo modelo.

Sin embargo, el EROI del modelo original para eólica marina es de 8,465, superior a los 6,82 del escenario continuista del nuevo modelo, pero inferior a los 8,957 del escenario de mejora tecnológica.

Ya que la eólica terrestre representa la gran mayoría de la potencia instalada, el EROI global aumenta en los dos escenarios, tanto el de mejora tecnológica como el continuista, aunque en mayor medida en el de mejora tecnológica.

3.9.6.- Tasa de reciclaje

Una parte cada vez más relevante en la utilización de los recursos limitados existentes en nuestro planeta es el reciclaje. Esto es algo en lo que siempre se debería hacer hincapié por dos motivos principales.

El primero son los problemas de contaminación que genera la fabricación de cualquier tipo de artículo, desde elementos simples como una bolsa de plástico o una camiseta, hasta artículos más complejos, como el silicio de los microprocesadores, o, en el caso que nos ocupa, el Neodimio y el Disproseo de los imanes permanentes de un aerogenerador.

Actualmente el modelo MEDEAS parte de una tasa de reciclaje del 0% con un valor objetivo del 30% en 2050, según el escenario Green Growth, que simulamos.

Por ello vamos a simular un escenario en el que se aplique una tasa de reciclado inicial del 15% tanto para el Neodimio como para el Disprosio, valor estimado por (Sverdrup et al., 2017).

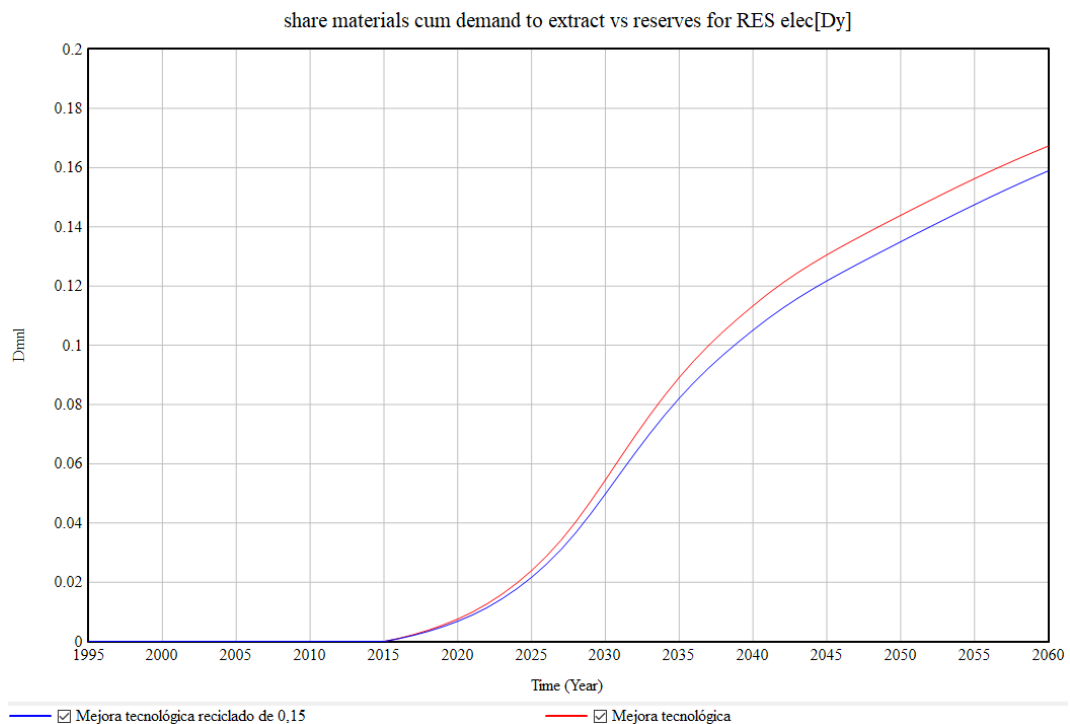


Ilustración 106.- Consumo de Disprosio. Mejora tecnológica con reciclado del 15%

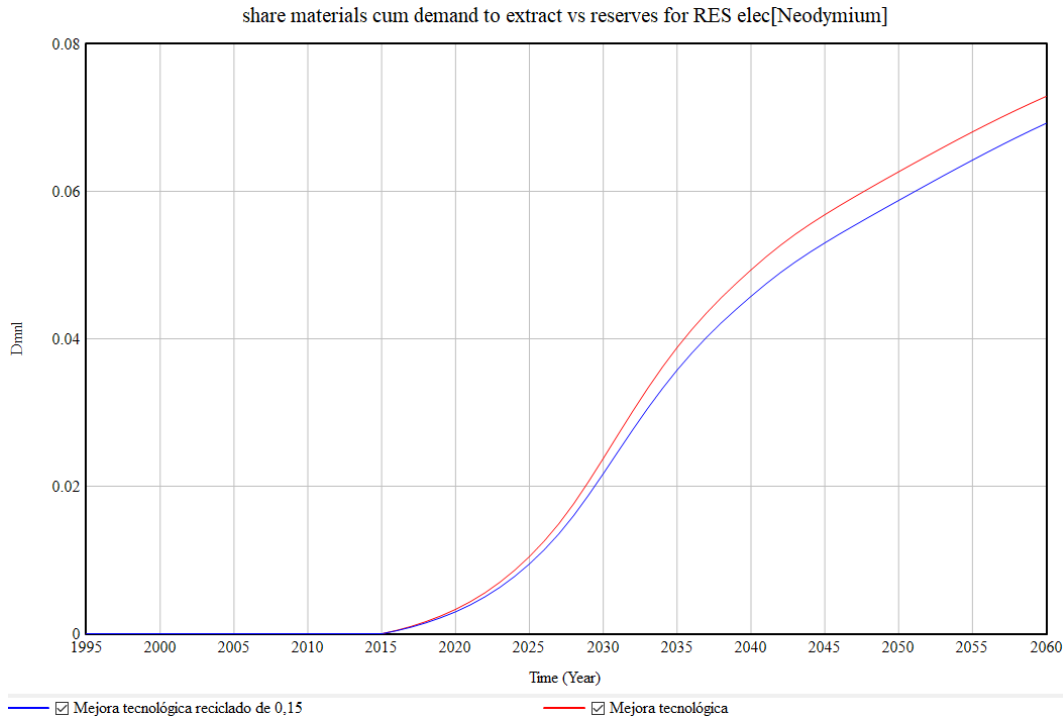


Ilustración 107.- Consumo de Neodimio. Mejora tecnológica con reciclado del 15%

Otros estudios aportan diferentes valores, como por ejemplo (Yang et al., 2017), que pronostica que para 2100 se podría llegar a conseguir que la demanda de imanes permanentes en todos los sectores sea cubierta hasta en un 50% por material reciclado, aunque posteriormente aporta unos valores de un 9% de reciclaje de Neodimio y un 7,5% de reciclaje de Disprosio para 2030.

Otros estudios como (Zakotnik & Tudor, 2015) sugieren que un imán permanente reciclado sería capaz de mantener sus propiedades magnéticas en un primer reciclado, pero que la repetición de este proceso en sucesivas ocasiones podría resultar en un grado inaceptable de impurezas que impidiera al imán lograr las características deseadas.

3.9.7.- Resumen de resultados

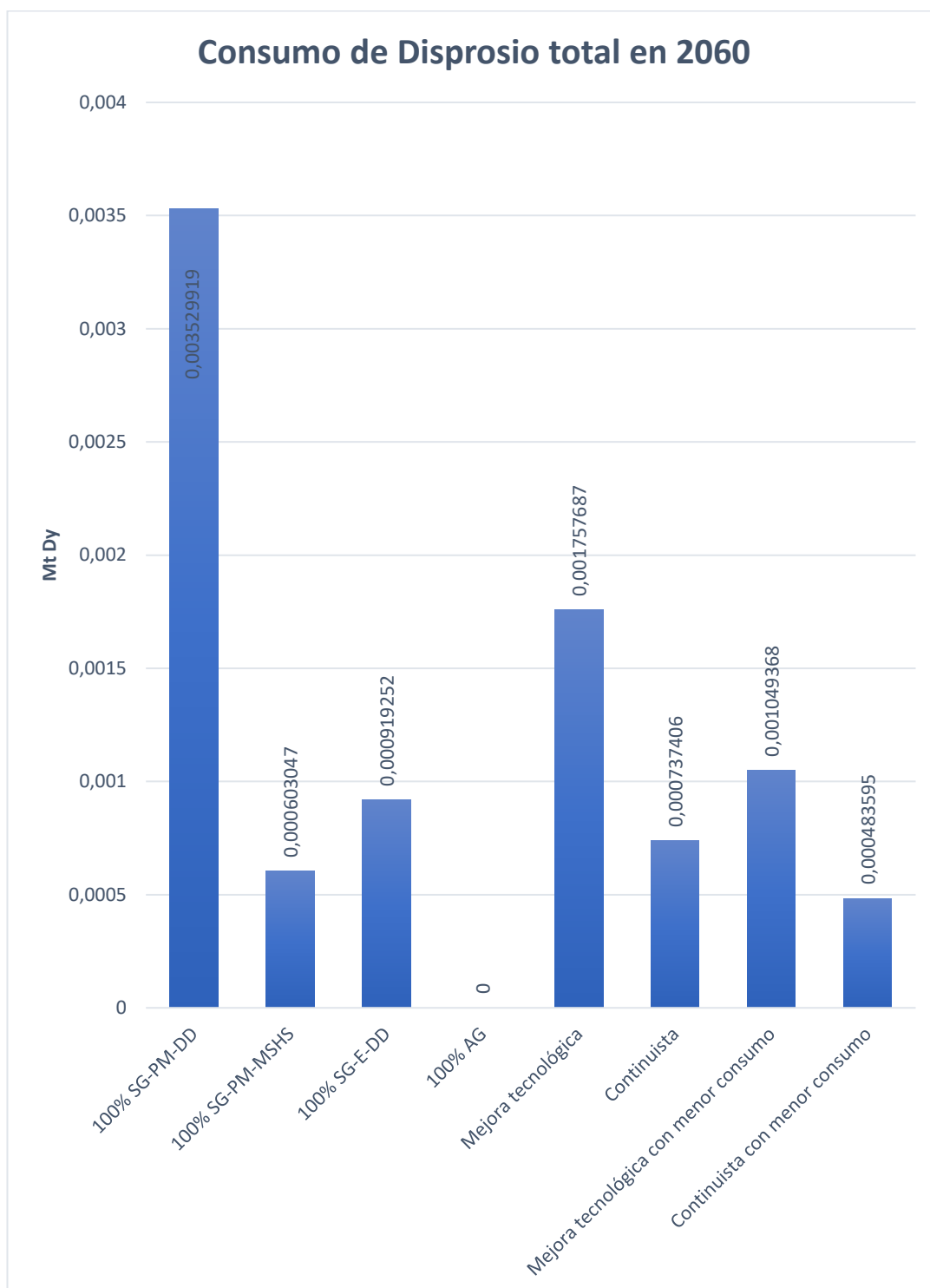


Ilustración 108.- Consumo acumulado total de Disproso en 2060

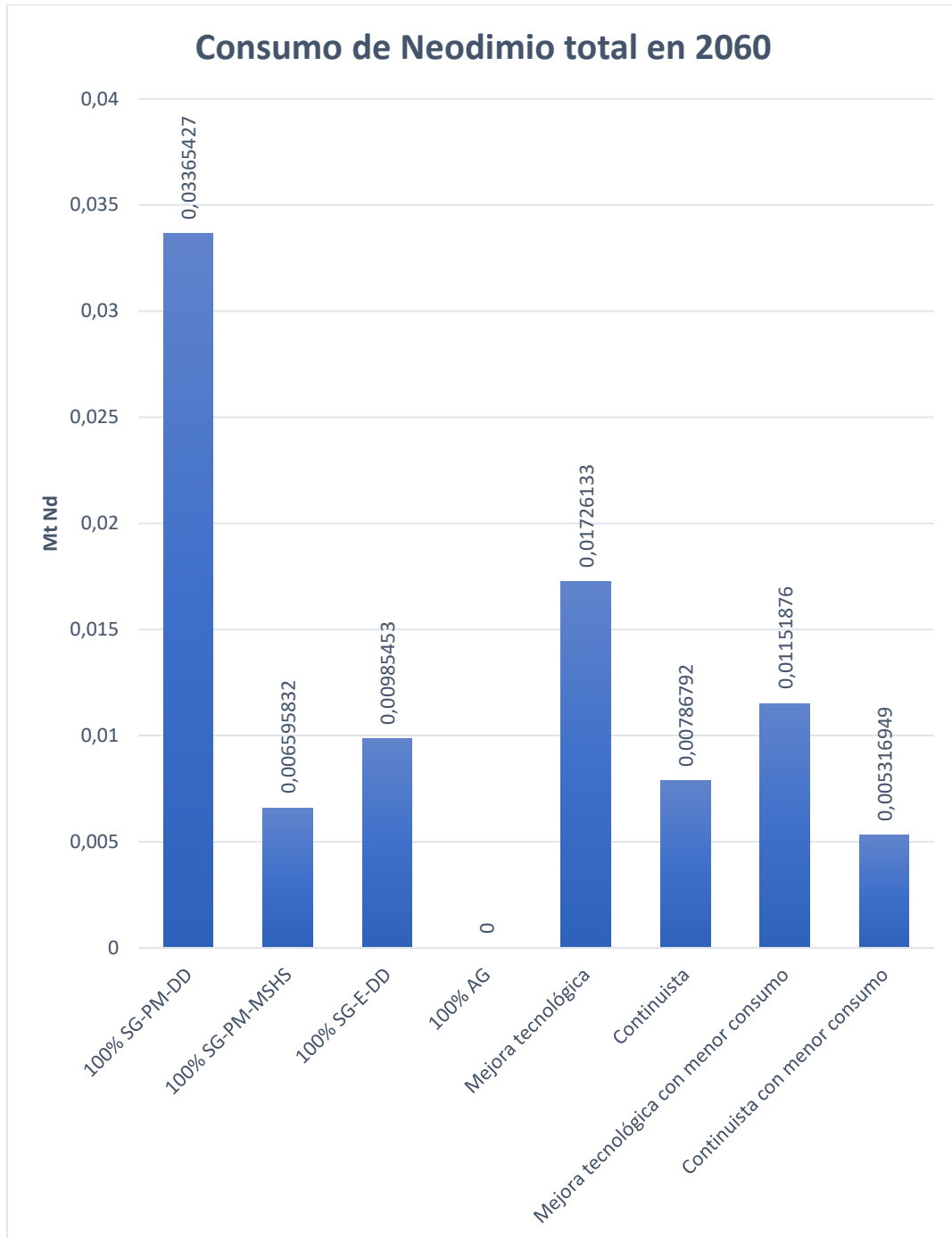


Ilustración 109.- Consumo acumulado total de Neodimio en 2060

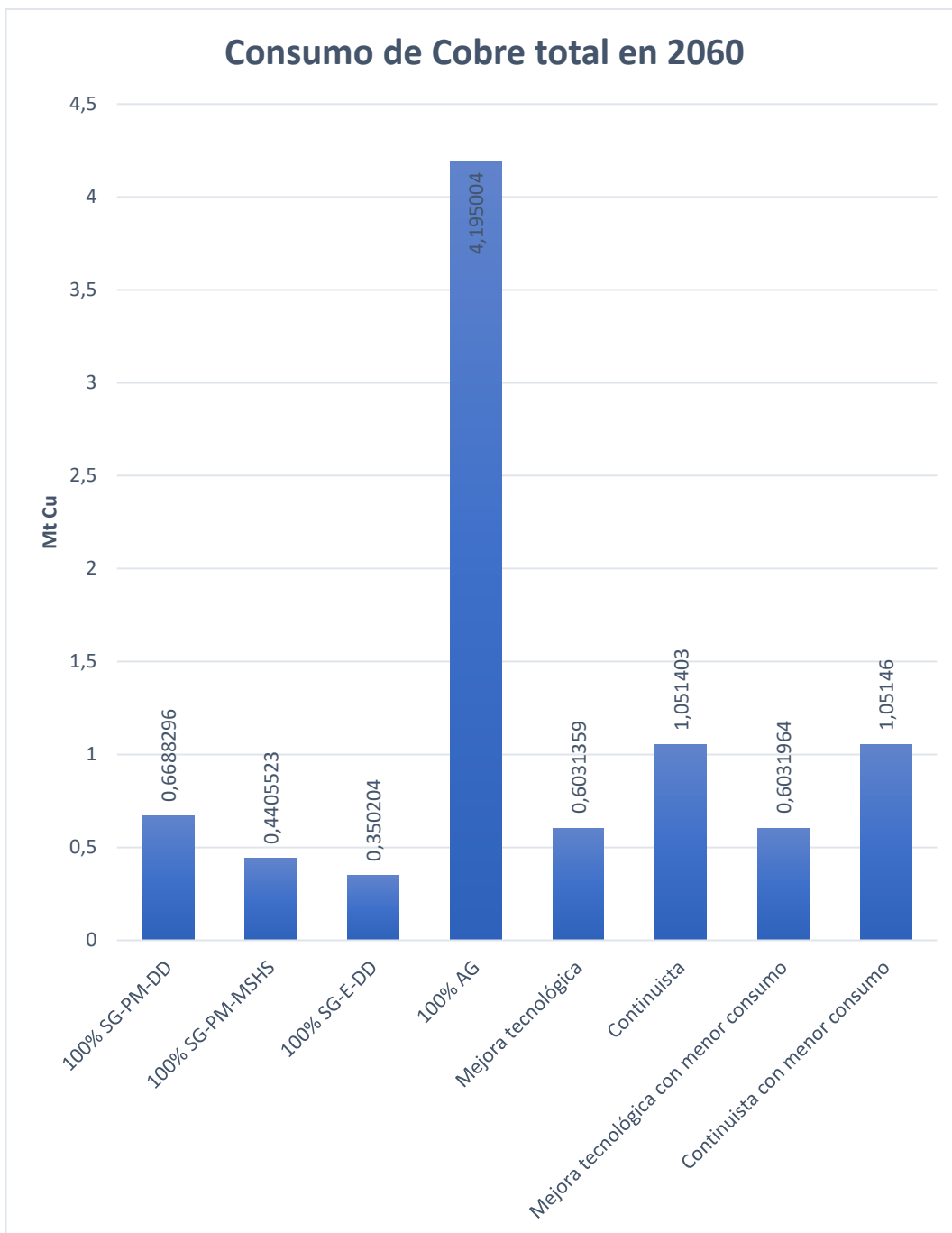


Ilustración 110.- Consumo acumulado total de Cobre en 2060

Los consumos, es decir, las demandas primarias teniendo en cuenta el reciclado, de la Ilustración 108, la Ilustración 109 y la Ilustración 110 están todos expresados en Megatoneladas, así como los de la Tabla 6.

Además en todos ellos se ha tenido ya en cuenta la tasa de reciclaje inicial del 15% considerada en el apartado 3.9.6.- Tasa de reciclaje.

	100% SG- PM-DD	100% SG- PM-MS/HS	100% SG- E-DD	100% AG	Mejora tecnológica	Continuista	Mejora con menor consumo	Continuista con menor consumo
Adhesive	0,00014	0,000139	0,00014	0,000139	0,00014	0,000145	0,00014	0,000145
Aluminium (Al)	0,645202	0,661318	0,441152	0,438262	0,641727	0,576571	0,641792	0,576609
Aluminium mirrors	0	0	0	0	0	0	0	0
Cadmium (Cd)	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbon fiber	0,497146	0,496259	0,497439	0,494085	0,496541	0,525092	0,496585	0,525117
Cement	0	0	0	0	0	0	0	0
Chromium (Cr)	1,016179	1,01437	1,016787	1,009683	1,015282	1,095638	1,015388	1,095704
Copper (Cu)	0,66883	0,440552	0,350204	4,195004	0,603136	1,051403	0,603196	1,05146
Diesel	4,33572	4,32886	4,33859	4,30733	4,33148	4,66658	4,33191	4,66685
Dysprosium (Dy)	0,00353	0,000603	0,000919	0	0,001758	0,000737	0,001049	0,000484
Electric/electronic components	0,085081	0,084804	0,085116	0,084509	0,08493	0,087872	0,084939	0,087877
Evacuation lines (KM)	0	0	0	0	0	0	0	0
Fiberglass	1,467573	3,267874	3,280798	3,258495	2,549737	3,314083	2,549965	3,31421
Foam glass	0	0	0	0	0	0	0	0
Galium (Ga)	1,31E-07	1,3E-07	1,31E-07	1,3E-07	1,31E-07	1,36E-07	1,31E-07	1,36E-07
Glass	0	0	0	0	0	0	0	0
Glass reinforcing plastic (GRP)	0,264772	0,264062	0,264884	0,263196	0,264339	0,272146	0,264361	0,272157
gravel (roads, protection...)	26,64958	26,71339	26,67971	26,50401	26,69266	32,13922	26,69556	32,142
Indium (In)	0,000284	0,000283	0,000285	0,000282	0,000284	0,000294	0,000284	0,000294
Iron (Fe)	0	0	0	0	0	0	0	0
KNO3 mined	0	0	0	0	0	0	0	0
Asphalt	0	0	0	0	0	0	0	0
Lime	0	0	0	0	0	0	0	0
Limestone	0	0	0	0	0	0	0	0
Lithium (Li)	0	0	0	0	0	0	0	0
Lubricant	0,235742	0,235179	0,235843	0,234431	0,235372	0,241707	0,235389	0,241716
Magnesium (Mg)	0,000374	0,000373	0,000374	0,000371	0,000373	0,000389	0,000373	0,000389
Manganese (Mn)	0	0	0	0	0	0	0	0

Heavy machinery (depreciation and reposition)	0,009082	0,009066	0,009088	0,009024	0,009074	0,009793	0,009075	0,009794
Concrete	76,2932	75,96582	76,31445	75,76295	76,11101	76,38996	76,11873	76,39299
Molybdenum (Mo)	0	0	0	0	0	0	0	0
NaNO3 mined	0	0	0	0	0	0	0	0
NaNO3 synthetic	0	0	0	0	0	0	0	0
Neodymium (Nd)	0,033654	0,006596	0,009855	0	0,017261	0,007868	0,011519	0,005317
Nickel (Ni)	0,020987	0,020918	0,020995	0,020846	0,02095	0,021675	0,020952	0,021676
Over grid (15%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Over grid (5%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Paint	0,126677	0,126263	0,126728	0,125825	0,126452	0,130832	0,126465	0,130838
Lead (Pb)	0	0	0	0	0	0	0	0
Plastics	0,561112	0,514458	0,515115	0,511668	0,533142	0,571697	0,533195	0,571734
Polypropylene	0	0	0	0	0	0	0	0
Rock	0	0	0	0	0	0	0	0
Rock wool	0	0	0	0	0	0	0	0
Sand	3,130979	3,120765	3,132265	3,109937	3,125438	3,233696	3,125758	3,233856
Silicon sand	0	0	0	0	0	0	0	0
Silicon wafer modules	0	0	0	0	0	0	0	0
Silver (Ag)	0,000383	0,000382	0,000383	0,00038	0,000382	0,000401	0,000382	0,000401
Site preparation (soil works) etc.	693,277	692,67	693,772	688,985	693,041	766,691	693,114	766,741
Tin (Sn)	0	0	0	0	0	0	0	0
Soda ash	0	0	0	0	0	0	0	0
Steel	26,50716	28,5842	26,34649	26,16092	27,62171	28,73831	27,62458	28,73989
Syntethic oil	0	0	0	0	0	0	0	0
Tellurium (Te)	1,88E-05	1,88E-05	1,89E-05	1,87E-05	1,88E-05	1,97E-05	1,88E-05	1,97E-05
Titanium (Ti)	0	0	0	0	0	0	0	0
Titanium dioxide	0	0	0	0	0	0	0	0
Vanadium (V)	0	0	0	0	0	0	0	0
Wires	0,121004	0,12061	0,121053	0,12019	0,12079	0,124974	0,120802	0,12498
Zinc	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6.- Demanda primaria acumulada total en 2060

3.9.8.- Orientación hacia futuros trabajos.

Durante la realización de este trabajo han aparecido una serie de limitaciones que podrían servir como punto de partida para futuras ampliaciones del modelo o futuros trabajos, como pueden ser:

- La programación de una regla dinámica de asignación de subtecnologías, que tenga en cuenta criterios adicionales y de mayor complejidad, como puede ser una retroalimentación que tenga en cuenta los diferentes EROIs de las subtecnologías y actúe en consecuencia, una retroalimentación que tenga en cuenta la existencia o no de escasez de un determinado elemento, o los diferentes valores de eficiencia de cada subtecnología.
- El modelado del resto de usos para Neodimio y Disproscio, para poder obtener unos valores globales de consumo más cercanos a la realidad. Según (Bobba, 2020), los riesgos de suministro de estos elementos son los más elevados de toda la lista de materiales evaluada. Adicionalmente, la competencia entre los sectores productivos de la generación eólica y de la fabricación de baterías eléctricas podría agravar este problema.
- La mejora en el cálculo de las eficiencias de cada subtecnología mediante el estudio de las curvas de potencia que los fabricantes proporcionan, para de esta manera no sólo obtener el valor máximo, sino todo el rango de valores en función de la velocidad del viento.
- La adición de futuras subtecnologías adicionales que pudieran surgir.
- La diferenciación de las subtecnologías offshore no sólo por su tipo de generador, al igual que la terrestre, sino por su forma de anclaje al lecho marino, que representa una gran parte de la estructura de este.

4.- Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo fin de grado es proporcionar información acerca de las intensidades materiales, a través de la subdivisión de los grandes bloques renovables de eólica terrestre, y eólica marina en tecnologías más pequeñas.

De esta forma, y mediante su integración en el modelo MEDEAS, hemos creado un punto de partida mediante el cual los investigadores que trabajen con el modelo en sucesivas ocasiones contarán con un mayor nivel de detalle a la hora de desagregar las diferentes formas de generación de energía renovable, y que mediante la creación de los nuevos escenarios que consideren oportunos podrán valorar el efecto que determinadas políticas puedan tener en el sistema.

Tras el trabajo realizado podemos obtener una serie de conclusiones.

La tecnología concreta que no emplea tierras raras (AG), y por lo tanto tiene un impacto nulo en ese sentido, presenta una serie de problemas. El primero es que dispara el consumo de cobre entre 5 y 10 veces por encima del resto de tecnologías, e incluso de los escenarios mixtos generados. El segundo es que no existen estudios que permitan suponer una paulatina disminución en su uso, por lo que debemos asumir que el consumo observado permanecerá constante a lo largo del tiempo. Por último, el tercero es que se trata de la tecnología más obsoleta de todas las estudiadas, no se construyen muchos modelos nuevos con esta tecnología, y la mayor parte de su share es parque ya existente. Todo esto unido al agotamiento de las reservas de cobre (que no de los recursos) que el modelo pronostica para el año 2047 (2042 si se utilizara exclusivamente este modelo de aerogeneradores) no hace pensar que esta sea una buena opción.

La tecnología más innovadora (SG-PM-DD) es, con diferencia la que más tierras raras críticas consume, pero con unos valores de consumo de cobre contenidos al igual que las otras dos restantes (SG-PM-MS/HS y SG-E-DD), y similares a los del modelo MEDEAS anterior sin desagregar. Inicialmente no parecía una buena idea apostar en gran medida por este tipo de tecnologías. Cabe recalcar que los imanes permanentes causantes del consumo de estas tierras raras no solo son utilizados en aerogeneradores, sino que también son esenciales en la fabricación de las baterías de los coches eléctricos e híbridos, e incluso para aplicaciones más mundanas como los auriculares o las pastillas de las guitarras eléctricas. Debido a que el modelo MEDEAS no tiene en cuenta más usos, limitaremos el hecho de que no haya escasez de tierras raras como

información, y no como conclusión, al estar limitados por el alcance del modelo MEDEAS.

Otro factor importante es la tasa de reciclaje de los materiales. Hemos constatado como tiene un gran impacto sobre el consumo con los datos para Neodimio y Disproso, por lo que es algo sobre lo que se debería investigar y profundizar, y a mi juicio, la mejor manera de tratar de paliar los problemas de escasez que se pueden llegar a producir en el futuro, o incluso los que ya se están produciendo, con, por ejemplo, la escasez de silicio para microchips en la que estamos inmersos.

En este caso son principalmente las instituciones las que deben impulsar la utilización de las energías renovables como la eólica, pero aun así es muy importante que la sociedad conozca estos desafíos a los que se enfrenta la humanidad para que así cualquier persona pueda aportar su granito de arena la escala que sea capaz, y de esta forma conseguir cambiar el modelo productivo para reducir la extracción y el consumo de materiales vírgenes, y de esta forma tratar de lograr la mayor sostenibilidad posible en la sociedad.

De nada servirán los grandes avances tecnológicos si el planeta no cuenta con los recursos necesarios para producirlos al haber sido ya utilizados. Debemos lograr ahora el cambio, ya que, si en algún momento esto sucede, habremos llegado a un callejón sin salida del que no podremos escapar.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis tutores, Luis Javier Miguel e Íñigo Capellán, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo en un entorno tan interesante como es el grupo de investigación en Energía, Economía y Dinámica de Sistemas, así como a los también investigadores del grupo, Fernando Frechoso, e Ignacio de Blas por sus aportaciones y apoyo.

Bibliografía

- Aracil, J. (1995). Dinámica de sistemas. *ISDEFE*.
https://www.academia.edu/8563256/Din%C3%A1mica_de_sistemas_Javier_Aracil
- Arantegui, R. L. (2012). *Scientific Assessment in support of the Materials Roadmap enabling Low Carbon Energy Technologies Wind Energy STRATEGIC ENERGY TECHNOLOGY PLAN JRC Coordination*.
https://www.academia.edu/26362957/Scientific_Assessment_in_support_of_the_Materials_Roadmap_enabling_Low_Carbon_Energy_Technologies_Wind_Energy_STRATEGIC_ENERGY_TECHNOLOGY_PLAN_JRC_Coordination
- Bang, D., Polinder, H., Shrestha, G., & Ferreira, J. A. (2008). *Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines*. 11.
- Belkhir, K. S., & Khenfer, N. (2013). Magnetic gear generator for wind energy. *Przeglad Elektrotechniczny*, 89, 72-75.
- BETZ, A. (1920). Das Maximum der theoretisch moeglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift fur das gesamte Turbinenwesen*, 20. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10005373900/>
- Blengini, G. A., Latunussa, C. E., Eynard, U., Torres de Matos, C., Wittmer, D., Georgitzikis, K., & Unguru, M. (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials. Final Report*. Publications Office of the European Union: Luxembourg.

- Bobba, S. (2020). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study*.
- Bobba, S., Carrara, S., & Huisman, J. (2020). *Critical Raw Materials in Technologies and Sectors*. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>
- Buchert, M., & Dittrich, S. (2012). *Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität*. 15.
- Capellán-Pérez, Í., De Blas, I., & Miguel González, L. J. (2020). *MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints—Energy & Environmental Science (RSC Publishing)*. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/EE/C9EE02627D#!divAbstract>
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Miguel González, L. J. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
- Chu, S. (2011). *Critical Materials Strategy*. DIANE Publishing.
- Das, A., & Shivakumar. (2015). Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines. *International Journal of Science and Research*, 4(4), 999-1003.
- de Castro, C., & Capellán-Pérez, I. (2020). Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. *Energies*, 13(12), 3036. <https://doi.org/10.3390/en13123036>

- Dupont, E., Koppelaar, R., & Jeanmart, H. (2018). Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints. *Applied Energy*, 209, 322-338. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>
- Elshkaki, A., & Graedel, T. E. (2014). Dysprosium, the balance problem, and wind power technology. *Applied Energy*, 136, 548-559. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.064>
- Ensam, E. (2004). *Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms*. https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v80_2004_uk.ashx
- European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study.* (2020). <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., Oakdene Hollins Ltd., & The Hague Centre for Strategic Studies. (2011). *Critical metals in strategic energy technologies :assessing rare metals as supply chain bottlenecks in low carbon energy technologies*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2790/35600>
- Floating offshore wind market technology review.* (2020, enero 23). <https://www.carbontrust.com/resources/floating-offshore-wind-market-technology-review>

- Forrester, J. (2009). *Some Basic Concepts in System Dynamics*. Sloan School of Management Massachusetts Institute of Technology. /paper/Some-Basic-Concepts-in-System-Dynamics-Forrester/922267ecfb122c0ec2766ed856525f8b9979520c
- Guezuraga, B., Zauner, R., & Pölz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*, 37(1), 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.008>
- Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S. G., & Liu, J. P. (2011). Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. *Advanced Materials*, 23(7), 821-842. <https://doi.org/10.1002/adma.201002180>
- Habib, K., Hamelin, L., & Wenzel, H. (2016). A dynamic perspective of the geopolitical supply risk of metals. *Journal of Cleaner Production*, 133, 850-858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.118>
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hoenderdaal, S., Tercero Espinoza, L., Marscheider-Weidemann, F., & Graus, W. (2013). Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? *Energy*, 49, 344-355. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.043>
- How magnets are made. (2020). *Bunting - EMagnets*. <https://emagnetsuk.com/introduction-to-neodymium-magnets/how-neodymium-magnets-are-made/>

- Igwemezie, V., Mehmanparast, A., & Kolios, A. (2019). Current trend in offshore wind energy sector and material requirements for fatigue resistance improvement in large wind turbine support structures – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 181-196. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.002>
- IRENA. (2020). /Statistics. /Statistics
- Jay, A., Myers, A. T., Torabian, S., Mahmoud, A., Smith, E., Agbayani, N., & Schafer, B. W. (2016). Spirally welded steel wind towers: Buckling experiments, analyses, and research needs. *Journal of Constructional Steel Research*, 125, 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.06.022>
- Jin, H., Afiuny, P., McIntyre, T., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2016). Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling. *Procedia CIRP*, 48, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.013>
- Junne, T., Wulff, N., Breyer, C., & Naegler, T. (2020). Critical materials in global low-carbon energy scenarios: The case for neodymium, dysprosium, lithium, and cobalt. *Energy*, 211, 118532. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118532>
- Kim, J., Guillaume, B., Chung, J., & Hwang, Y. (2015). Critical and precious materials consumption and requirement in wind energy system in the EU 27. *Applied Energy*, 139, 327-334. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.003>

- Kis, Z., Pandya, N., & Koppelaar, R. H. E. M. (2018). Electricity generation technologies: Comparison of materials use, energy return on investment, jobs creation and CO2 emissions reduction. *Energy Policy*, *120*, 144-157. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.033>
- Lacal-Aránzategui, R. (2015). Materials use in electricity generators in wind turbines – state-of-the-art and future specifications. *Journal of Cleaner Production*, *87*, 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.047>
- Leader, A., Gaustad, G., & Babbitt, C. (2019). The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, *8*(2), 8. <https://doi.org/10.1007/s40243-019-0146-z>
- Li, H., & Chen, Z. (2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons. *IET Renewable Power Generation*, *2*(2), 123-138. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20070044>
- Li, K., Modaresahmadi, S., Williams, W., & Bird, J. Z. (2019). Electromagnetic analysis of a wind turbine magnetic gearbox. *The Journal of Engineering*, *2019*. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8006>
- Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E., & Blanco, J. (2009). Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy*, *34*(3), 667-673. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.020>
- Muller, S., Deicke, M., & Doncker, R. W. D. (2002). Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *IEEE Industry Applications Magazine*, *8*(3), 26-33. <https://doi.org/10.1109/2943.999610>

- Oelker, J. (2008). Is there a limit to wind turbine size? *Wind Energy*, 4.
- Offshore Wind Power Market Share, Statistics | Global Forecast, 2026*. (2019).
<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/offshore-wind-power-market-100148>
- Olivier, J. G. J. (2017, diciembre 11). *Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: 2017 report* [Text]. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2017-report>
- Pachauri, R., & Meyer, L. (2014). *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Pathak, A. K., Khan, M., Gschneidner, K. A., McCallum, R. W., Zhou, L., Sun, K., Dennis, K. W., Zhou, C., Pinkerton, F. E., Kramer, M. J., & Pecharsky, V. K. (2015). Cerium: An Unlikely Replacement of Dysprosium in High Performance Nd–Fe–B Permanent Magnets. *Advanced Materials*, 27(16), 2663-2667. <https://doi.org/10.1002/adma.201404892>
- Pavel, C. C., Lacal-Aránzategui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W., & Blagoeva, D. (2017). Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*, 52, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010>
- Polinder, H., Bang, D., Rooij, R. P. J. O. M. van, McDonald, A. S., & Mueller, M. A. (2007). 10 MW Wind Turbine Direct-Drive Generator Design with Pitch or Active Speed Stall Control. *2007 IEEE International Electric Machines*

Drives Conference, 2, 1390-1395.

<https://doi.org/10.1109/IEMDC.2007.383632>

Pons, O., de la Fuente, A., Armengou, J., & Aguado, A. (2017). Towards the sustainability in the design of wind towers. *Energy Procedia*, 115, 41-49.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.005>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (2019). En *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed.

Regueiro y González-Barros, M. (2014). *Minerales críticos en Europa:*

Metodología para la evaluación de la criticidad de los mieraes.

Sanz-Aguilar, A., Sánchez-Zapata, J. A., Carrete, M., Benítez, J. R., Ávila, E.,

Arenas, R., & Donázar, J. A. (2015). Action on multiple fronts, illegal poisoning and wind farm planning, is required to reverse the decline of the

Egyptian vulture in southern Spain. *Biological Conservation*, 187, 10-18.

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.03.029>

Solé, J., Samsó, R., García-Ladona, E., García-Olivares, A., Ballabrera-Poy, J.,

Madurell, T., Turiel, A., Osychenko, O., Álvarez, D., Bardi, U., Baumann,

M., Buchmann, K., Capellán-Pérez, Í., Černý, M., Carpintero, Ó., De Blas,

I., De Castro, C., De Lathouwer, J.-D., Duce, C., ... Theofilidi, M. (2020).

Modelling the renewable transition: Scenarios and pathways for a decarbonized future using pymedeas, a new open-source energy systems

model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110105.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110105>

- Sverdrup, H. U., Ragnarsdottir, K. V., & Koca, D. (2017). An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: Security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity. *Journal of Cleaner Production*, 140, 359-372. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.085>
- The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. (2021). 287.
- Tokimatsu, K., Höök, M., McLellan, B., Wachtmeister, H., Murakami, S., Yasuoka, R., & Nishio, M. (2018). Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: Exploring metal requirements and the well-below 2 °C target with 100 percent renewable energy. *Applied Energy*, 225, 1158-1175. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.047>
- Valero, A., Valero, A., Calvo, G., & Ortego, A. (2018). Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 178-200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>
- Venkatesan, P., Hoogerstraete, T. V., Hennebel, T., Binnemans, K., Sietsma, J., & Yang, Y. (2018). Selective electrochemical extraction of REEs from NdFeB magnet waste at room temperature. *Green Chemistry*, 20(5), 1065-1073. <https://doi.org/10.1039/C7GC03296J>
- Viebahn, P., Soukup, O., Samadi, S., Teubler, J., Wiesen, K., & Ritthoff, M. (2015). Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 655-671. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.070>
- von Bertalanffy, L. (1968). *General_System_Theory*.

- von der Haar, C., & Marx, S. (2015). Design aspects of concrete towers for wind turbines. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 57(4), 30-37. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2015/v57n4a4>
- Wilburn, D. (2011). *Wind Energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry From 2010 Through 2030* (Scientific Investigations Report) [Scientific Investigations Report].
- Wind Tower Market Size, Share, Growth | Global Forecast [2020-2027]*. (2020). <https://www.fortunebusinessinsights.com/wind-tower-market-103299>
- WWEA. (2019). *World Wind Energy Association*. <https://wwindea.org/information-2/information/>
- Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauss, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P., & Binnemans, K. (2017). REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>
- Zakotnik, M., & Tudor, C. O. (2015). Commercial-scale recycling of NdFeB-type magnets with grain boundary modification yields products with ‘designer properties’ that exceed those of starting materials. *Waste Management*, 44, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.041>
- Zimmermann, T. (2013). Parameterized tool for site specific LCAs of wind energy converters. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 49-60. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0467-y>