



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de la disponibilidad futura de recursos minerales críticos para la generación de energía eólica mediante dinámica de sistemas

Autor: D. Pablo Benito de la Piedra

Tutor: D. Luis Javier Miguel González

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Valladolid, Julio, 2017

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Resumen

El uso de modelos dinámicos para la descripción de entornos complejos proporciona una información valiosa para la toma de decisiones políticas y el estudio en sectores estratégicos como la energía.

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) consiste en la utilización de la metodología conocida como dinámica de sistemas para modelar la disponibilidad futura de recursos estratégicos y de gran interés tecnológico y económico utilizados en la generación de energía eólica.

La herramienta utilizada para la construcción del modelo dinámico es el programa de ordenador Vensim, mediante el cual se modelan las principales variables energéticas y económicas comprometidas en el estudio, se introducen los datos de entrada, se valida el propio modelo y se extraen los resultados y relaciones para la toma de decisiones y análisis de disponibilidad futura de recursos.

Palabras Clave: Energía Eólica, Tierras Raras, Vensim, dinámica de sistemas, disponibilidad de recursos, transición energética.

Abstract

The use of dynamic models in the description of complex environments offers a value source of information for the taking of politics decisions and the assessment of strategic sectors such as energy.

This Final Project, related with Industrial Engineering, consists in the employment of the methodology known as system dynamics in order to modelling the future availability of strategic resources of great technological and economic interest which are employed in the generation of wind power energy.

The tool used for the construction of the dynamic model is Vensim software, through which main energetic and economic variables are modelled, input data is introduced, model is validated and results and relations are extracted with the aim of taking strategic decisions and assessing the future availability of resources.

Keywords: Wind Power, Rare Earth Elements, Vensim, system dynamics, resource availability, energetic transition.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y a mi tía en especial, a mis amigos y compañeros y a ti también, los cuáles siempre creyeron en mí, que de una forma directa o indirecta me ayudaron a recorrer este duro camino juntos en la tumultuosa vida del estudiante-trabajador. Cuando las fuerzas y el tiempo no llegaban, nunca me faltó una mano amiga que me recordó que merecía la pena.

Ingeniero Industrial. Porque imposible es solo una opinión.

INDICE

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Objetivos.....	6
2. CAPÍTULO 2: INSTALACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA Y REQUERIMIENTOS MATERIALES	10
2.1. Descripción y componentes de un aerogenerador	10
2.2. Tecnología de generación de energía eólica.	11
2.3. Generadores de imanes permanentes	13
2.3.1. Tendencia tecnológica.....	13
2.3.2. Imanes permanentes.....	14
2.3. Materiales críticos en energía eólica	16
2.4. Minería de los minerales críticos en energía eólica	17
2.4.1. Mineralogía.....	17
2.4.2. Métodos mineros de minerales críticos	20
2.4.3 Extracción y concentración	22
3. CAPÍTULO 3. DINÁMICA DE SISTEMAS	26
3.1. Definición.....	26
3.2. Etapas del modelado dinámico.....	26
3.3. Elementos de un modelo: Diagrama causal	27
4. CAPÍTULO 4. MODELO DE SIMULACIÓN EN VENSIM	32
4.1. Bloque Demanda Energética.....	32
4.1.1. Global Primary Energy Demand (ED)	33
4.1.2. Global Electric Energy Demand.....	37
4.1.3. Total WP Capacity Installed	39
4.1.4. Nd / Dy Demand in Wind Power.....	43
4.1.5. Production Rate.....	48
4.2. Bloque Extracción	48
4.2.1. Resource	49
4.2.2. Ore Discovery	51
4.2.3. Transformation (R→R).....	52

4.2.4. Reserves	53
4.2.5. Nd / Dy Extraction in WP	54
4.2.6. Nd / Dy Other Extraction.....	55
4.3. Bloque de Industrialización del Mineral	56
4.3.1. Ore Extracted	56
4.3.2. Mineral in Use	57
4.3.3. Nd Scrap / Dy Scrap.....	59
4.4. Bloque Energético.....	60
4.4.1. Total Energy in Recycling.....	61
4.4.2. Total Energy in Extraction	63
4.4.3. CO ₂ Removed by Recycling.....	71
4.4.4. CO ₂ Non Emitted by Fossil Fuels	72
4.4.5. Demand Supplied From Recycling	72
4.5. Síntesis general del modelo	72
5. CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
5.1. Demandas Energéticas	76
5.1.1. Demanda Energía Primaria Mundial.....	76
5.1.2. Demanda Energía Eléctrica Mundial.....	77
5.1.3. Capacidad Eólica Instalada.....	78
5.2. Simulación del Neodimio	80
5.2.1. Demanda de Neodimio en Energía Eólica.....	81
5.2.2. Extracción de Neodimio	81
5.2.3. Consumo de la reserva de Neodimio.....	83
5.2.4. Análisis energético de la extracción de Neodimio	84
5.2.5. Reciclado de Neodimio.....	85
5.2.6. Análisis de sensibilidad del modelo de Neodimio.....	87
5.3. Simulación del Disprosio	92
5.3.1. Demanda de Disprosio	93
5.3.2. Extracción de Disprosio	94
5.3.3. Consumo de la Reserva	95
5.3.4. Análisis de sensibilidad del modelo de Disprosio	96
5.3.6. Análisis energético de la extracción de Disprosio	101

6. CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	106
6.1. Visión global	106
6.2. Resultados	107
6.3. Trabajos futuros	109
7. CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	112
8. DOCUMENTOS ANEXOS. MODELOS DE SIMULACIÓN EN VENSIM	118

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

La energía eólica (del latín "aeolicus", relativo al Dios griego Eolo) es la energía obtenida por el viento, en la cual se transforma la energía cinética del mismo en energía mecánica o eléctrica que es aprovechado para un uso práctico. Se trata de uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano, siendo una de las energías más maduras y eficientes de todas las energías renovables.

Los primeros molinos de viento fueron usados en China antes del 200 a.c. y para el siglo 11 d.c. eran usados para moler grano. Los comerciantes que regresaban de las Indias Orientales trajeron el conocimiento de la tecnología del molino de viento a Europa, donde los holandeses lo adaptaron para conducir bombas para eliminar el agua de las tierras bajas. Los molinos de viento fueron introducidos en el Nuevo Mundo en el siglo 18 y fueron utilizados para bombear el agua y moler el grano para las granjas y ranchos rurales. No sería hasta la Segunda Guerra Mundial donde grandes dispositivos fueron puestos en uso para generar electricidad para hogares, negocios y compañías (3).

Los avances tecnológicos en el uso de la energía eólica para producir electricidad se aceleraron en la década de 1970 como una consecuencia del embargo petrolero de la OPEP de 1973, que generó altos precios de combustible y estimuló la investigación para encontrar alternativas a fuentes no renovables de energía como el gas, petróleo y carbón.

No sería hasta los años 80, 90 y 2000 donde más en profundidad se estimuló e incentivó el desarrollo y uso de fuentes de energía renovable. En EEUU en 1985 se desarrolló el primer generador eléctrico de aire conducido con una potencia de 100 kW. En 2006 los primeros escenarios de penetrabilidad de la energía eólica fueron postulados por ejemplo por EEUU donde se plantean en 2030 alcanzar un 30% de energía eólica para suplir su demanda eléctrica (7), otro ejemplo es el de la Comisión de UE donde a través de varios documentos y hojas de ruta postula hasta un 30 % de Energía Renovable para 2020, y aunque no hay claras instrucciones al respecto, se prevén para horizontes más alejados a estas fechas metas de un 80% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que implica hasta 85 % de disminución de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, incluidas las procedentes del transporte (1) (2).

En comparación con fuentes de energía convencionales, la energía eólica tiene claras ventajas medioambientales. La energía eólica no contamina, es inagotable y al sustituir a fuentes de energía provenientes del uso de combustibles fósiles no emite sustancias tóxicas ni contaminantes, no genera residuos ni contamina el agua, siendo ésta una de las energías con la menor huella de consumo de agua. En cuanto al consumo de recursos se trata de una energía en la que no hay grandes consumos de energía ni transformación de combustibles por lo que los problemas derivados de ellos (residuos, escapes y fugas

al medio ambiente, transporte y almacenamiento...) son prácticamente inexistentes. Cabe destacar que como toda manipulación energética, la energía eólica conlleva un cierto impacto ambiental y requiere de un proceso continuo de planes de vigilancia y de recuperación.(3)

En cuanto a lo económico, la energía eólica puede contribuir a diversificar y regenerar las economías rurales, añadiendo nuevos ingresos a ayuntamientos y propietarios de tierras, en un mundo rural cada vez más despoblado y económicamente aislado. Es el caso de Chumillas población de la provincia de Cuenca en España, y que gracias a la instalación de un parque eólico de 2 MW por Gamesa ha permitido crear con los beneficios un plan de repoblación (población con menos 50 hab.) para la reapertura de la escuela, cheques bebés y ayuda para la vivienda. En términos generales la energía eólica crea un 30% más de empleo que una planta de carbón y un 66% más que una central nuclear.(4)

Pese a su gran variedad de tamaños, configuraciones y rango de materiales, la mayor parte de turbinas rondan capacidades instaladas del orden de 1 a 3 MW. Aunque globalmente representa menos del 3% de la capacidad instalada para generación eléctrica, es la principal protagonista energética en la transición energética hacia fuentes de energía de origen no fósiles, representando por ejemplo ya en 2009 EEUU el 42% de la capacidad puesta en servicio (5). En términos generales la capacidad de generación de la energía eólica alcanzó los 432,4 GW a finales de 2015 el equivalente a 60 reactores nucleares, alcanzando por primera vez a esta a nivel global, en retroceso desde los sucesos de Fukushima en 2011. China lidera la capacidad de generación de energía eólica con un total de 145 GW, 33.5%, apoyado fuertemente por el gobierno de Beijing como sustituto a la generación de energía por carbón para combatir la polución en las ciudades del país. A esta le siguen EEUU con un 17%, Alemania con algo más del 10% de la capacidad global, India y España con un 5% cada una y el resto repartido en Latino América y Africa (1).

La energía eólica es considerada abundante pero altamente variable, y la capacidad de producción varía ampliamente de unas zonas geográficas a otras. Muchos factores deben ser considerados al determinar el sitio para un parque de aerogeneradores. Una comprensión profunda de la dinámica del viento disponible para el proyecto es un componente necesario que contribuye al éxito económico y a la eficiencia de producción de un proyecto de energía eólica. Las estimaciones precisas de la dirección, distribución, duración, gradiente y velocidad del viento son esenciales para la correcta ubicación de un aerogenerador. En general, se considera que las áreas con velocidades anuales del viento superiores o iguales a 23,4 kilómetros por hora (a una altura de 80 m sobre el suelo (la altura de un típico rotor de turbina eólica) tienen un recurso eólico adecuado para posibles desarrollo.(4)

Aproximadamente el 2% de la energía que llega del sol se transforma en energía cinética de los vientos atmosféricos. El 35% de esta energía se disipa en la capa atmosférica a tan solo un kilómetro por encima del suelo. Del resto se estima que por su aleatoriedad y dispersión solo podría ser utilizada 1/13 parte, cantidad que hubiera sido suficiente

CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos

para abastecer 10 veces el consumo de energía primaria mundial del año 2002 (10.000 Mtep), de ahí su enorme potencial e interés (6).

En cuanto al mercado los principales constructores de turbinas fueron en 2016 el gigante danés Vestas que instaló en 2016 8.7 GW, el 16% de los parques onshore, debido a su gran actividad en EEUU y una gran actividad global diversificadora en 35 países. La segunda posición corresponde a GE con 6.5 GW compensó su pérdida de presencia en el mercado americano con su presencia en hasta 21 países un 50% más que en el año anterior. El grupo Xinjiang Goldwind Science & Technology cayó desde el primer puesto al tercero con 6.4 GW, focalizando toda sus proyectos en el país asiático. El cuarto lugar corresponde al recién grupo formado por Siemens-Gamesa por sus instalaciones de turbinas onshore con 5.63 GW, seguido de cerca por la alemana Enercon (7). Para dar perspectiva y terminar con esta revisión de fabricantes, se ilustra el cómputo acumulado de fabricantes en el mercado global:

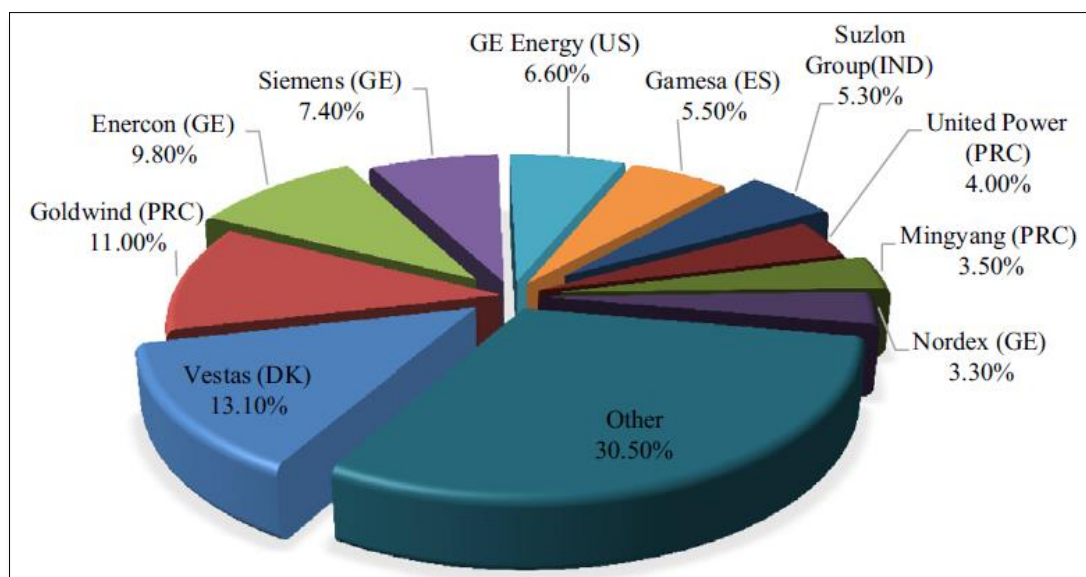


Figura 1.1. Distribución de fabricantes mundiales de aerogeneradores en 2013. Fuente: BNEF

En cuanto los mayores parques eólicos terrestres se sitúan (7), de forma igualmente representativa de su capacidad instalada en: China, EEUU, e India. El complejo eólico Gansu en China con 100 parques eólicos se eleva como el mayor complejo terrestre del mundo con una potencia instalada de 7.965 MW proyectados para 2020, la inversión se eleva a 17.000 millones de euros y unas 2.700 turbinas en trabajo, esta potencia proyectada equivaldrá prácticamente a la potencia instalada en España. Le sigue con lejanía pero no por ello igual de sorprendente el Alta Wind Energy Center en California con una capacidad operativa de 1.547 MW, compuesta por turbinas las últimas incorporadas GE 1.5-MW y Vestas V90-3.0MW, sumando con el resto un total de 586 turbinas. Al complejo californiano le sigue el parque eólico de Muppandal de 1.500 MW de capacidad operativa en Tamil Nadu (India), elegido como un ejemplo de la reactivación de zonas deprimidas rurales (7).

1.2. Objetivos

El presente proyecto englobado en la obtención del título de Ingeniero Industrial dentro del marco del Trabajo Fin de Máster (TFM) del Máster en Ingeniería Industrial pretende dar respuesta a las distintas restricciones de carácter energético, tecnológico y sobre todo de disponibilidad de minerales críticos en la generación y extensión de la energía eólica a nivel mundial, mediante el uso de la dinámica de sistemas.

El propósito de este TFM concentra varias etapas que responden a una pregunta final. En primer lugar, se analiza la evolución de la demanda energética primaria y eléctrica para con ella poder estimar primeramente la capacidad eólica instalada desde la actualidad de la simulación en 2010 hasta 2100. En segundo lugar, el desarrollo tecnológico del futuro de los aerogeneradores plantea como tecnología disruptiva el uso de cantidades de interés de Tierras Raras (REE), concretamente de Neodimio y de Disproso, los cuales han suscitado el interés de numerosos estudios y organismos por su baja concentración. Este proyecto, centrará sus esfuerzos en vislumbrar desde la capacidad eólica instalada la disponibilidad de estos recursos ante el progresivo aumento de la demanda en energía eólica a través de las extracciones de las reservas conocidas en el planeta. En último término, el proyecto analiza distintas variables e indicadores comprometidos en el ciclo de demanda energética, extracción y escasez de reservas y eficiencia energética.

La herramienta utilizada para este fin es la dinámica de sistemas que a través del software de simulación VENSIM permite modelar y analizar las principales relaciones entre variables energéticas y analizar los resultados comprometidos en el desarrollo de la energía eólica a nivel mundial y los recursos estratégicos de REE que consume.

Este documento está formado por diferentes capítulos y secciones que se detallan a continuación:

Capítulo 1: Introducción y objetivos. En el primer apartado de este capítulo se realiza una revisión al estado del arte de la tecnología, evolución histórica y principales beneficios y retos. En el apartado de objetivos se explica la motivación y el alcance del trabajo de este proyecto, así como la distribución de contenidos.

Capítulo 2: Energía eólica. Durante el desarrollo de este capítulo se realiza una revisión de los principales componentes que constituyen la estructura de un aerogenerador estándar para revisar la tendencia actual de las instalaciones de generación desde el punto de vista de su potencia. Basado en la descripción de los principales componentes se justifica el uso de imanes permanentes que deriva en el uso de materiales críticos. Por último, ya justificado el estudio de materiales críticos el proyecto profundiza en las características mineralógicas de los minerales implicados en estos materiales de interés en energía eólica y los principales métodos de explotación de los mismos.

Capítulo 3: Dinámica de sistemas. En el transcurso del capítulo se define las principales características de la dinámica de sistemas así como las etapas en la conceptualización de un modelo y los principales elementos y tipos de variables empleadas en su construcción.

Capítulo 4: Modelado mediante dinámica de sistemas en Vensim. Este capítulo compone el núcleo central del análisis de disponibilidad del Neodimio y del Disprosio en energía eólica al contener el proceso de construcción del modelo dinámico con el conjunto de variables comprometidas y de sus relaciones, así como la justificación de los datos de entrada, sus estimaciones y limitaciones. Dada la estructura del modelo este se divide en un bloque de demanda energética otro de extracción y un último con distintos indicadores y análisis energético. Por último se sintetiza el modelo en su conjunto.

Capítulo 5: Simulación del modelo en Vensim y análisis de resultados. Durante este capítulo se evalúan los distintos resultados de las principales variables e indicadores energéticos del modelo contrastando su ajuste a distintas estimaciones y resultados de autores y organismos internacionales. Este capítulo se divide en un bloque común de evaluación de la demanda energética mundial y capacidad eólica instalada y por otra parte dos bloques independientes de estudio de la disponibilidad e indicadores energéticos para el Neodimio y otro para el Disprosio.

Capítulo 6: Conclusiones. Por último, se recogen los principales resultados y conclusiones sintetizadas a lo largo del transcurso del proyecto. Además, se incluye una reseña a futuros trabajos y líneas de investigación para el futuro.

Capítulo 7: Bibliografía. Para su realización se ha utilizado el gestor bibliográfico Mendeley.

Anexo 1: Captura del modelo de simulación de Neodimio en Vensim.

Anexo2: Captura del modelo de simulación de Disprosio en Vensim.

CAPITULO 2.

INSTALACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA Y REQUERIMIENTOS MATERIALES.

2. CAPÍTULO 2: INSTALACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA Y REQUERIMIENTOS MATERIALES

2.1. Descripción y componentes de un aerogenerador

Cuando el aire fluye sobre una superficie, crea tipos de fuerzas aerodinámicas: una dirección de flujo de aire (conocida como fuerza de rozamiento) y otra más perpendicular al flujo de aire (fuerzas de impulso). Unos cuantos de estas fuerzas pueden utilizarse para generar el par requerido para rotar las palas. Las turbinas de viento modernas trabajan con fuerzas aerodinámicas de impulso. Un aerogenerador consiste típicamente en cuchillas o palas, un rotor, una torre, caja de cambios y un generador. La siguiente figura muestra todos los componentes de un aerogenerador, que se explican a continuación (4):

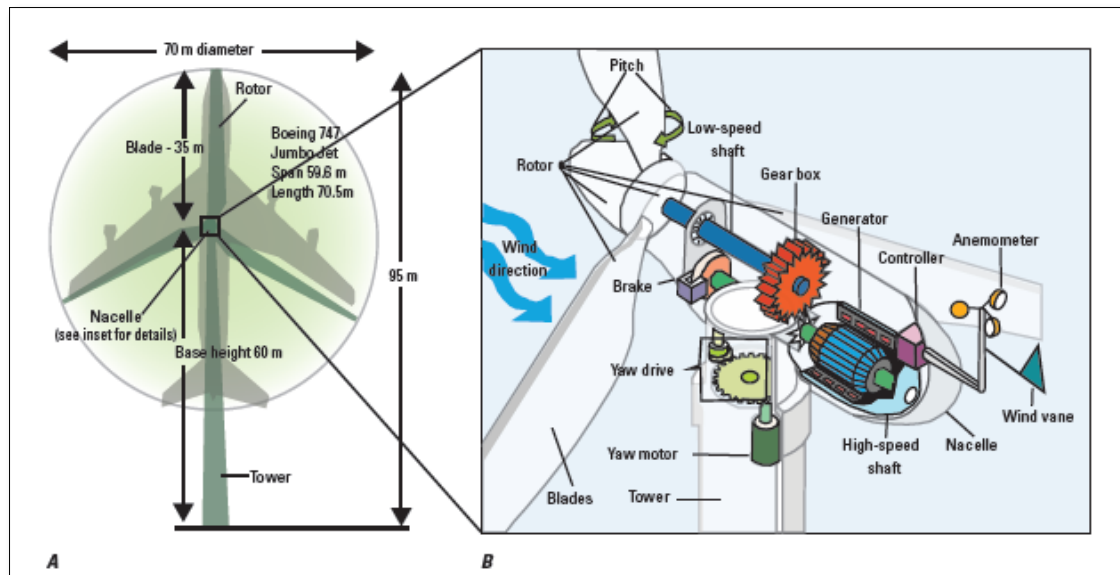


Figura 2.1. Diagrama de un aerogenerador (A) y sus componentes (B). Fuente: USGS.

A continuación se explican los componentes de una turbina eólica más significativos(8): el rotor, la góndola, la caja de cambio o engranaje, el generador y la torre. El compartimento de la góndola está conectado al cubo del rotor por un eje y contiene el generador, engranajes y mecanismos de control que maximizan la recolección y conversión de energía, por último el rotor, que normalmente consiste en tres hojas en forma de ala conectadas a un cubo central. Más en concreto:

Rotor – Un rotor consiste en grandes palas que se asemejan al ala de un avión convirtiendo la energía cinética del viento en energía rotatoria, correspondiendo al 10-14% del peso total de la instalación. Tres palas para una turbina son aceptadas universalmente, pero dos son también funcionales. Las dimensiones de las palas del

rotor son tales que Siemens ha lanzado el modelo B75 de 75 metros, que serán instalados en la planta de pruebas de Osterild en Dinamarca. Otro parámetro conocido como el "pitch drive" es utilizado para reducir el efecto de las fuerzas de impulso en condiciones de alta velocidad, con ello se garantiza que el alternador principal se mantenga en rangos de 1000-3600 rpm.

Góndola – Localizada en la cima de la torre de la turbina, está unida al rotor y contiene las partes técnicas principales como el eje del rotor, la caja de engranajes y el generador, siendo éste el responsable de la transformación de energía mecánica en eléctrica, siendo aproximadamente el 25-40 % del peso total de la estructura. La góndola está conecta a la torre con rodamientos y es capaz de girar respecto a la dirección del viento para maximizar la energía del viento.

Controlador electrónico: que monitoriza las condiciones de funcionamiento del aerogenerador mediante el análisis de las señales captadas por múltiples sensores que miden temperatura, presión, velocidad y dirección del viento, tensión e intensidad eléctrica.

Caja de engranajes – El rotor del aerogenerador tiene típicamente velocidades inferiores a 100 rpm, sin embargo, habitualmente la mayoría de generadores operan entre 1000-3600 rpm, por lo que la caja de engranajes multiplica las bajas velocidades para hacer el generador operacional.

Torre – Incluye la cimentación de apoyo, proporciona la altura necesaria para acceder al recurso eólico y al conducto requerido para transferir la electricidad generada por la turbina al sistema de recogida del aerogenerador, donde la electricidad de todos los aerogeneradores suele ser alimentada a la red eléctrica.

2.2. Tecnología de generación de energía eólica.

Los aerogeneradores modernos están divididos en dos tipos principalmente (8): HAWTs (horizontal axis wind turbines) y VAWTs (vertical axis wind turbines), que viene a ser en castellano aerogeneradores de eje horizontal y vertical, respectivamente. Los de eje horizontal (HAWT) dominan la industria eólica por su mayor eficiencia y energía obtenida en comparación con los de eje vertical (VAWT), éstos últimos son más problemáticos y se instalan cerca del suelo con menos exposición al viento, lo que para obtener similares prestaciones les obliga a dotar de más material y tamaño que los de eje horizontal. Aunque los VAWT tienen entre sus ventajas menor ruido y menos cortes

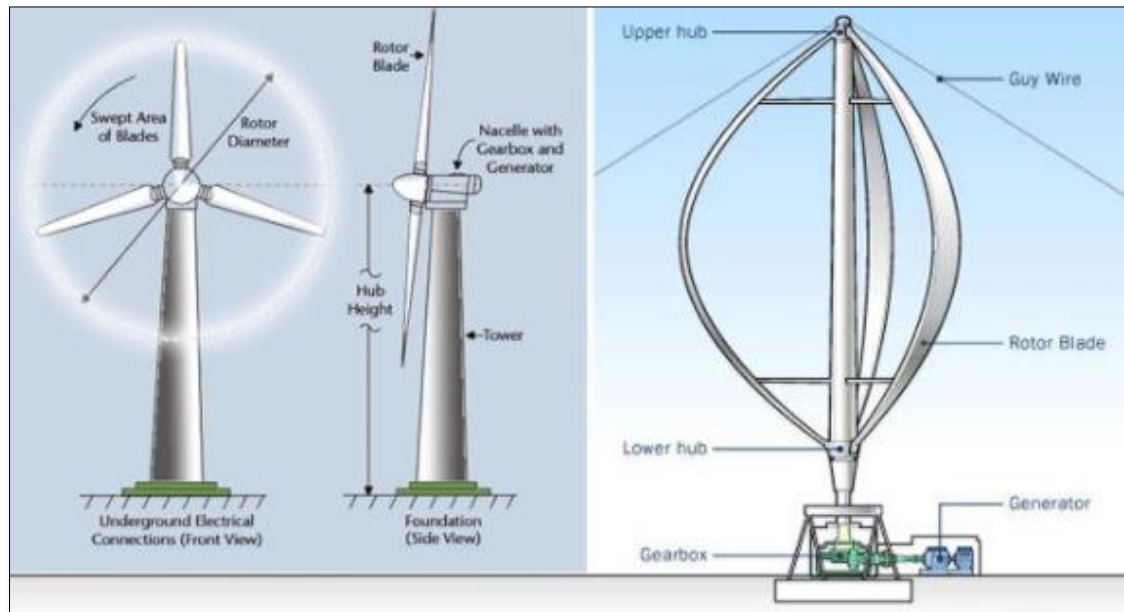


Figura 2.2. Diagrama de un HAWT y un VAWT. Fuente: Wind energy. Trends and enabling technologies

en velocidad, por lo que pueden producir al menos algo de energía en vientos de baja intensidad, teniendo su espacio en aplicaciones a pequeña escala.

Por otra parte se va a introducir los sistemas de energía Onshore y Offshore. Los aerogeneradores Onshore son aquellos aerogeneradores instalados en tierra con torres de entre 50-100 m de altura y un rotor de 50-100 m de diámetro. La tendencia general en el sector es de incrementar las alturas de las torres y la longitud de las palas, permitiendo aprovechar áreas con viento de bajo potencial energético. Las turbinas modernas trabajan a 12-20 rpm a dos tercios menos de la velocidad de hace 20-30 años, con lo que estas turbinas de última generación son capaces de generar energía con viento de mucha menos velocidad (8). Habitualmente la agrupación de múltiple



Figura 2.3. Parque eólico Onshore y Offshore. Fuente: <http://www.green-mechanic.com>

aerogeneradores da lugar a plantas de energía eólica de 5-300 MW de potencia instalada. Como ya se ha indicado el parque de Gansu en China es el mayor proyecto Onshore de la actualidad.

Por último los aerogeneradores instalados fuera de las costas son conocidos como Offshore que en los últimos años han acelerado significativamente su propagación (8) debido al aprovechamiento de las corrientes de viento en los océanos, ya que éstas son más uniformes y de mayor velocidad que en tierra, además cuenta con factores de capacidad superiores. Esta tecnología tiene un amplio horizonte pues se eliminan los problemas de espacio en tierra, además del hecho de que las grandes poblaciones del mundo se sitúan en costa (53% de la población en EEUU), reduciendo los costes de cableado. Similares en diseño a las Onshore, deben de adaptarse a la profundidad en su instalación requiriéndose bases flotantes o sumergidas. En la actualidad la tecnología permite turbinas flotantes de hasta 100-400 m de profundidad. La gran diferencia entre ambas opciones es la fuerte inversión inicial, en algunos casos alcanzado 150-300 % superior a las instalaciones en tierra firme.

2.3. Generadores de imanes permanentes

2.3.1. Tendencia tecnológica

Ya que durante este proyecto se va a analizar el previsible aumento de esta energía en los próximos años en el camino hacia una transición energética, se sugiere este apartado como una parte importante en la justificación del estudio del mismo.

De forma genérica un aerogenerador estándar, y aunque esta información puede variar de unos fabricantes a otro, contiene 89,1 por ciento de acero, 5,8 por ciento de fibra de vidrio, 1,6 por ciento de cobre, 1,3 por ciento de hormigón (principalmente cemento, agua, agregados y refuerzo de acero), 1,1 por ciento de adhesivos, 0,8 por ciento de aluminio y 0,4 de otros materiales como espuma, plástico y madera) en peso (9).

Al igual que en muchos otros sectores (espacial, aeronáutico, naval), la utilización de componentes compuestos está ganando terreno en los próximos años, aumentando prestaciones y aligerando componentes, haciéndoles además más pequeños y económicos, estas mejoras son plasmadas en algunos como rodamientos, ejes y uniones.

La tendencia actual hacia turbinas más grandes ha dado lugar a cajas de cambios muy caras porque el par aumenta más rápidamente que la potencia al aumentar el diámetro del rotor, dando lugar a un aumento de la tensión en los engranajes y mayores requisitos de mantenimiento para las cajas de engranajes. El aumento en el uso de configuraciones de grupos motopropulsores de múltiples generadores o generadores de impulsión directa que no requieren una caja de cambios ha dado lugar a turbinas con menos piezas móviles, lo que resulta en menos mantenimiento y menores costos operativos. A continuación vamos a profundizar en el estudio de esta tecnología (10).

2.3.2. Imanes permanentes

La tendencia actual desde la última década por los principales fabricantes mundial de aerogeneradores (GE Energy, Siemens Gamesa, Vestas, Alstom) es introducir generadores de imanes permanentes (DD-PMG) de transmisión directa a base de una aleación con fuente principal en Neodimio (Nd-Fe-B) frente a los convencionales de inducción (DFID)(11). Sus propiedades ferromagnéticas se caracterizan por el producto energético, una figura de mérito proporcional a la energía en kilojulios por metro cúbico (KJ/m^3) almacenados en el campo magnético creado por un volumen dado de material magnético.

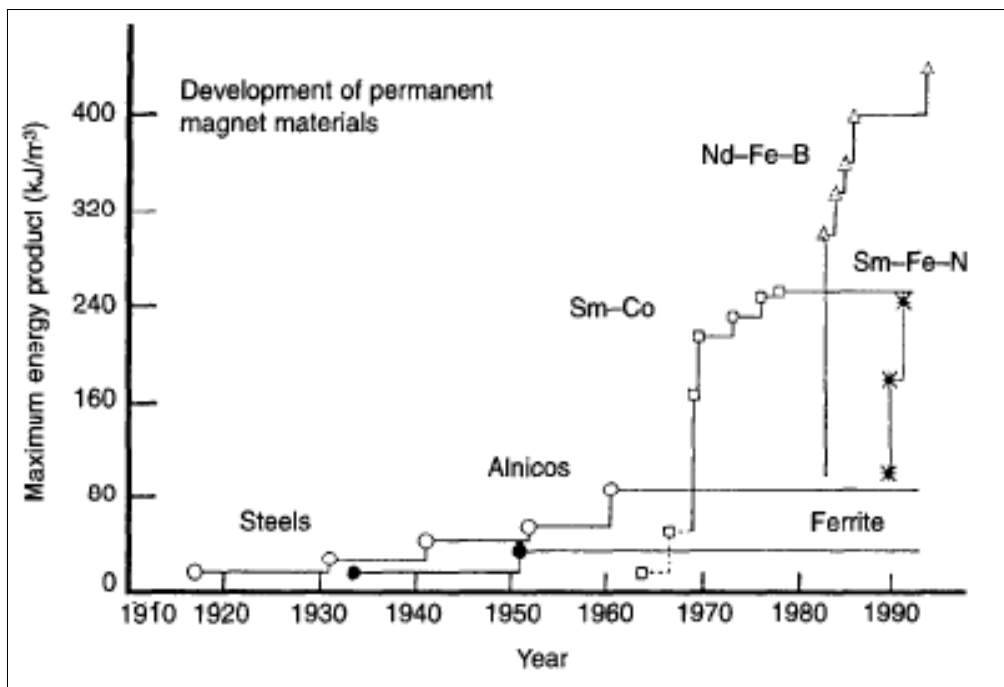


Figura 2.4. Progreso temporal en la mejora del producto de energía (kJ/m^3) en diferentes materiales. Fuente: Journal of Magnetic Materials

A continuación se van a destacar los principales ventajas de su aplicación(12):

- Se utilizan en el rotor del generador en lugar de los electroimanes de cobre bobinado, eliminando gran parte del peso asociado con los devanados de cobre y las bobinas del estator y la energía necesaria para encender los electroimanes.
- Con los generadores de imanes permanentes se permite eliminar la caja de cambios, con los respectivos ahorros en mantenimiento y operación.
- Por otra parte los DD-PMGs operan con mayor fiabilidad al operar sin anillos deslizantes, ni cepillos, consiguiendo eficacias en torno al 98% a cargas parciales incluso al 20% de la nominal.

CAPÍTULO 2. Instalaciones de generación de energía eólica y requerimientos materiales

- Su elevada densidad de energía permite con un segmento de 15 mm de espesor de imanes permanentes generar el mismo campo magnético que con una sección de 10 veces más de espesor de bobina de cobre.
- En comparación a los convencionales bobinados son tan casi eficientes como éstos a plena carga pero son más eficientes en cargas parciales de hasta 400 rpm siendo además las condiciones más comunes de operación debido a las características intrínsecas de la energía eólica, debiendo los convencionales bobinados que inyectar reactiva tener corriente eléctrica inyectada en el rotor a bajas velocidades.

Por estos motivos la tendencia tecnológica es ir hacia la progresiva instalación de aerogeneradores con generadores imanes permanentes(13), es por ello que el alcance de este trabajo va a estar fundamentado en la extensión de su aplicación y la disponibilidad de los materiales que se utilizan en su construcción.

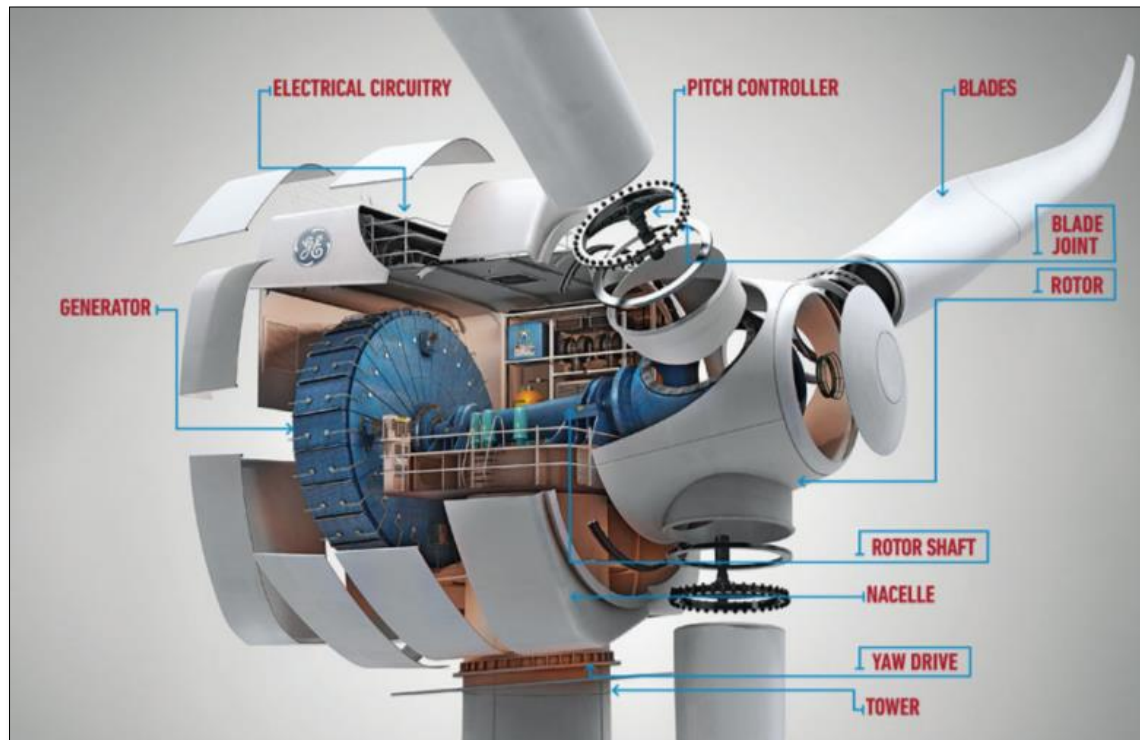


Figura 2.5. Aerogenerador de 4MW de última generación sin sistema de engranajes, funcionamiento mediante generador directamente conducido con uso de imanes permanentes (DD-PMG). Fuente: General Electric.

Los principales estudios en el campo de la disponibilidad de recursos materiales, señalan al propio Nd de los imanes permanentes como uno de los principales protagonistas de la extensión de energías renovables. Además otro material a destacar en el campo de los imanes permanentes es el ya mencionado Dy, que se utiliza principalmente en imanes permanentes para retener la fuerza del imán a temperaturas elevadas. Por lo tanto, el uso de imanes permanentes dopados con disprosio (Dy) se prefiere en vehículos eléctricos y turbinas de viento de transmisión directa(14).

2.3. Materiales críticos en energía eólica

Las materias primas son cruciales para la economía de las naciones y son esenciales para mantener y mejorar nuestra calidad de vida. La propia UE y en el resto del mundo ya han centrado los focos en los intereses detrás del estudio de la disponibilidad de recursos naturales como un factor clave para el desarrollo no sólo de las energías renovables sino del bienestar en general. Para ello la Unión Europea(15) ha creado una lista de materias primas críticas (critical raw material-CRMs). En general estas materias primas críticas combinan dos factores claves y discernientes:

- Alto interés económico.
- Alto riesgo asociado con el suministro.

El primero de estos problemas que concierne a estas materias primas es que su explotación está ligado a un interés industrial, concretamente los principales minerales no energéticos están unidos a los principales motores tecnológicos de la actualidad del futuro, como smartphones, vehículos híbridos y eléctricos y energías renovables (eólica y solar principalmente),superconductores, convertidores catalíticos, bombillas fluorescentes compactas, láseres, teléfonos celulares e incluso sistemas avanzados de armas. El otro gran problema es que la mayoría de ellos son extraídos por una pequeña porción de países exportadores como China, EEUU, Brasil, Rusia y otros.

Dentro de esta lista la UE en su lista de CRMs destaca las Tierras Raras (REE), el cobalto y el niobio como uno de los más acuciantes problemas.

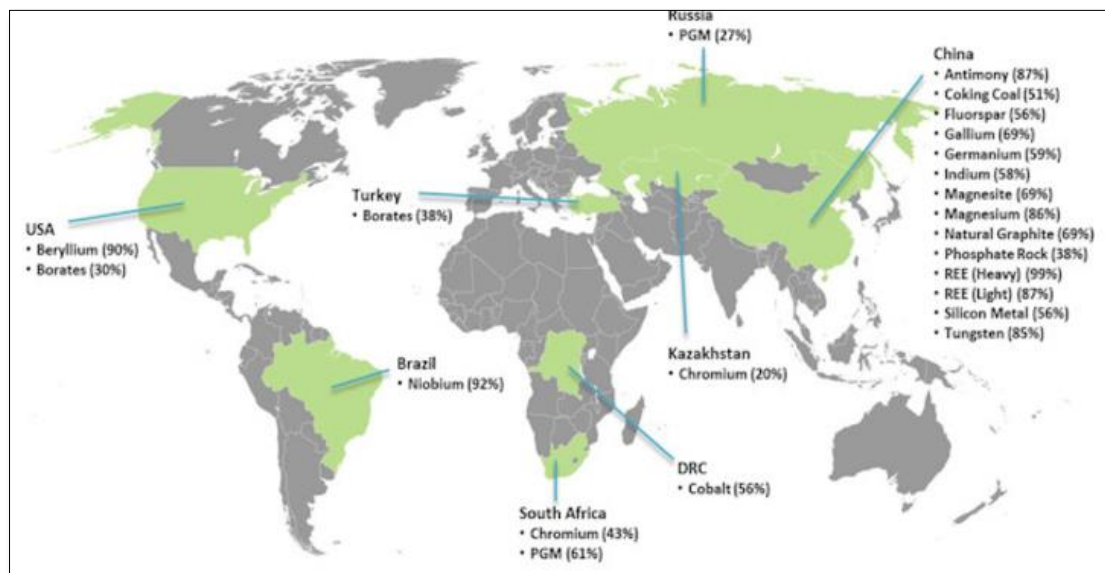


Figura 2.6. Distribución mundial de principales explotaciones de minerales críticos. Fuente: European Comission.

Las tierras raras son un grupo de 17 metales del grupo de los lantánidos que a menudo se agrupan debido a sus similares propiedades, incluyen elementos como el neodimio, el lantano, el lutecio, el escandio, el itrio y el disprosio entre otros. Estos elementos no

son particularmente raros en términos de abundancia, pero durante muchos años permanecieron raramente separados unos de otros debido a sus características químicas similares (16) además son difíciles de encontrar en concentraciones económicamente extraíbles, de hecho se estima que en la corteza hay la misma cantidad de cobre que de éstos elementos.

Diversos estudios por organismos privados y públicos destacan la limitación que supone éstas materias primas críticas en la expansión de las tecnologías renovables. La propia EU en su programa de estudio MEDEAS (Modeling the Renewable Energy Transition in Europe) (17), señala para la energía eólica dos de estos componentes en especial, siendo en el caso del Dy como la tecnología con el mayor exposición, además de utilizar una buena porción de la producción mundial de Nd del futuro. En nuestro campo de aplicación que es la energía eólica y dado el preponderante uso de imanes permanentes por sus superiores propiedades en el futuro se va a estudiar la disponibilidad y limitaciones de dos componentes de las REE: el Neodimio (Nd) y el Disprobio (Dy) (18). Otros autores también han centrado sus esfuerzos en vislumbrar el futuro de la energía y el papel de la energía eólica como motor de la transición energética hacia una generación sin combustibles fósiles (19), estableciendo límites y restricciones a su crecimiento. En este proyecto también se evaluarán además de las limitaciones de disponibilidad de materiales críticos, las limitaciones tecnológicas y energéticas a la expansión de la energía eólica.

2.4. Minería de los minerales críticos en energía eólica

2.4.1. Mineralogía

Los minerales que contienen tierras raras suelen dividirse en tierras raras pesadas (HREEs) o ligeras (LREEs)(20). Minerales que contienen predominantemente itrio y los HREEs incluyen gadolinita, xenotima, samarskita, euxenita, fergusonita, yttrotantalita, yttrotungstita, ytrialita. Los minerales que contienen predominantemente LREEs incluyen bastnasita, monazita, allanita, loparita, ancylita, lantanita, chevinita, cerita, stillwellita, britholita, fluorita y cerianita. Sin embargo, las minas que operan en todo el mundo se extraen principalmente monazita, xenotima, bastnasita. A continuación se exponen las características de los minerales base de los elementos de tierras raras(20).

2.4.1.1. Monacita

Monazita (Breithaupt 1829) tiene una fórmula química generalizada $CePO_4$. El nombre deriva del griego monazeis, que significa "estar solo" debido a los cristales aislados de monacita, y el hecho de que era muy raro cuando se encontró por primera vez. Además de Ce, también otros REE se producen en monacita, de carácter ligero: La, Ce, Pr, Nd y Sm. Por lo general también contiene Th y/o U, pero las cantidades en monacita son generalmente demasiado bajas para ser extraídas como un subproducto valioso. La monacita generalmente aparece como un mineral menor en granitos y granodioritas y también asociada a pegmatitas. Debido a que es un mineral pesado con una gravedad específica (comparada con el agua) entre 4.8 y 5.5 y su muy alta resistencia al desgaste natural, es primero concentrada y después transportada.



Figura 2.7. Monacita, Iveland Setedal, Norway. Fuente: Collection of Naturalis Biodiversity Center, Leiden, Netherlands.

2.4.1.2. Xenotima

El nombre se deriva del griego xenos - "extranjero" y el tiempo - "honor". La fórmula química generalizada de la xenotima es (YPO_4) , ésta en contraste con la monacita y bastnaesita, generalmente contiene, además de Ytrio (Y), cantidades apreciables de HREEs (heavy rare earth elements): Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu. Xenotime puede contener hasta un 67% de REO, en su mayoría los elementos más pesados. Los más frecuentes son disprosio, iterbio, erbio y gadolinio y cantidades menores de terbio, holmio, tulio y lutecio. Xenotima es la fuente principal de HREE, pero como la monacita también contiene Th y / o U, que dependiendo de la ubicación del depósito, y la concentración de estos dos elementos en el mineral, puede ser un subproducto o un desecho. La principal diferencia con la monacita es su contenido en HREEs frente a los LREEs de ésta y mientras ésta concentra Th la xenotima concentra U aunque ciertas cantidades también de Th.



Figura 2.8. Xenotima, Madagascar. Fuente: Collection of Naturalis Biodiversity Center, Leiden. Netherlands.

2.4.1.3. Bastnasita

Por primera descrita por el químico sueco Wilhelm Hisinger como una base de flúor de Cerio, su fórmula es $Ce(CO_3)F$ y su nombre se debe a su lugar de descubrimiento en Bastnäs, Suecia. Se trata de un mineral de tierras raras consistente principalmente en LREEs como Cerio (Ce), Lantano (La), Praseodimio (Pr) y Neodimio. Bastnasita, que no contiene ni U ni Th, ha reemplazado a la monacita como el principal mineral de LREE. La bastnasita es un mineral muy extendido, aunque nunca aparece en grandes cantidades, y lo hace en una gran variedad de rocas ígneas como carbonatitas, rocas metamórficas

y pegmatitas los depósitos de mineral mayores están asociados a intrusiones de carbonatita.



Figura 2.9. Bastnasita, Mountain Pass California. Fuente: Collection of Naturalis Biodiversity Center, Leiden, Netherlands.

Los REE también se encuentran a menudo asociados con mineralización de uranio / torio y minerales de uranio a menudo contienen REE apreciable. Esta co-deposición con radionucleidos puede ofrecer importantes desafíos en el procesamiento de minerales de Tierras Raras.(20)

2.4.2. Métodos mineros de minerales críticos

La extracción de tierra rara puede ser de pozo abierto, subterránea o lixiviada in situ. Para una típica mina a cielo abierto, el enfoque es muy similar a otras operaciones mineras que implican la eliminación de la sobrecarga, la minería, la molienda, rotura y trituración, separación o concentración. El producto del concentrado enriquecido después la separación puede contener alrededor del 30% -70% de tierras raras que contienen minerales. El proceso requiere mayor cantidad de uso de agua y energía (por ejemplo, en comparación con otros metales comunes, es decir, 0.2 a 1 GJ de energía / Ton de REO, 0.3 a 1.8 ML de agua / Ton de REO) así como la producción de corrientes de desechos, en comparación con otros metales debido a sus bajos grados de concentración) tales como desechos y aguas residuales.

A continuación se explican de forma esquemática los tipos de procesos de extracción principales(21).

Si el tipo de depósito es basado en roca dura, entonces la minería convencional de excavación abierta o subterránea de camiones es utilizado. Por otro lado, si se trata de arena mineral formado fundamentalmente en depósito de tipo monazita entonces se utiliza dragado húmedo o método de extracción en seco.

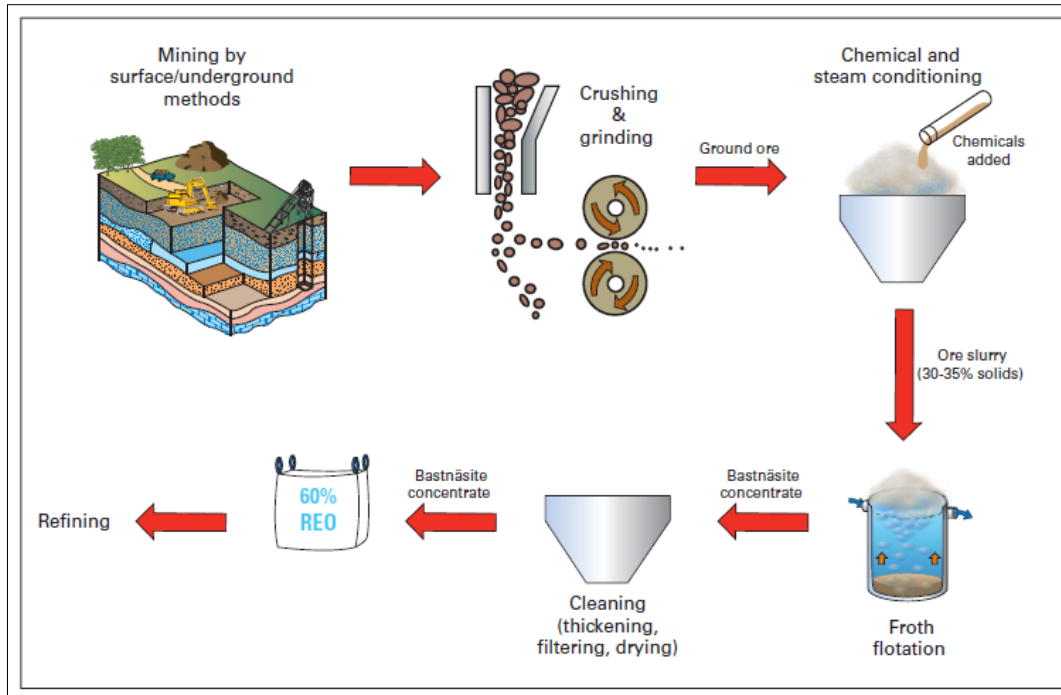


Figura 2.10. Diagrama de flujo de excavación abierta, Mountain Pass. Fuente: British Geological Survey

Si se trata de una operación de explotación húmeda, una draga flotante corta el mineral bajo la superficie de un estanque y bombea la suspensión de mineral a un concentrador húmedo flotante. La extracción en seco puede ser similar a la de sistema convencional de camiones y palas.

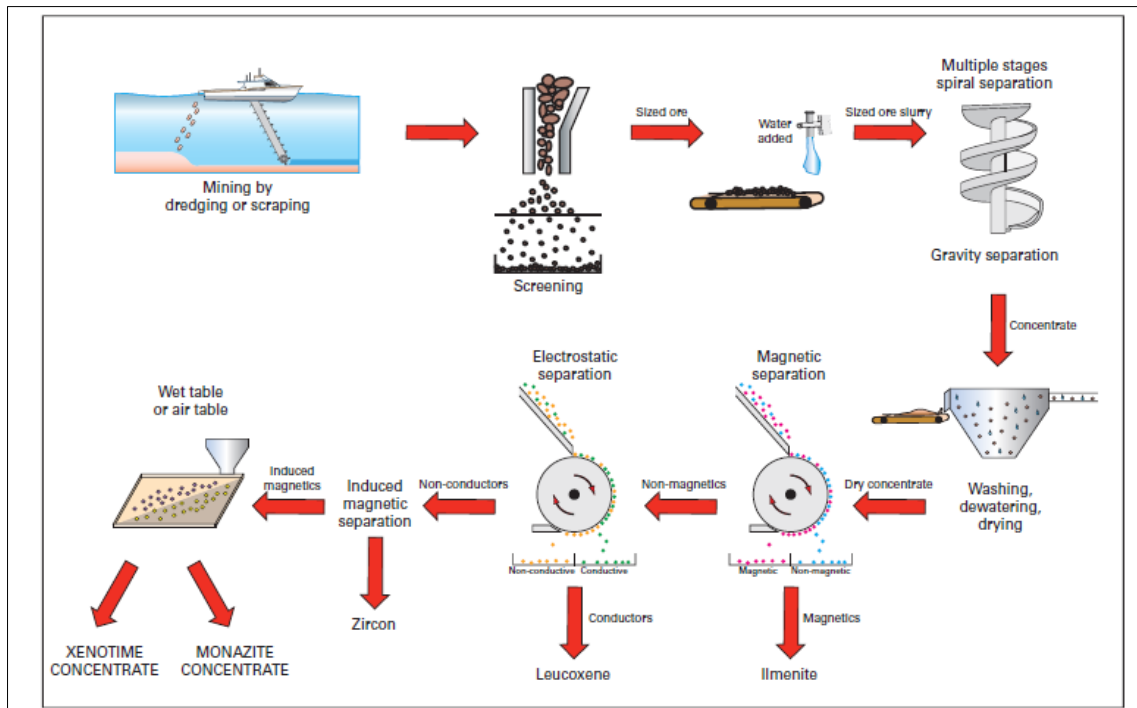


Figura 2.11. Diagrama de flujo de extracción de mineral mediante dragado. Fuente: British Geological Survey.

2.4.3 Extracción y concentración

Para extraer tierras raras, se requiere procesamiento adicional de extracción y refinación. La extracción puede involucrar el uso de rutas ácidas o alcalinas dependiendo de la mineralogía de las fases que contienen REE y la reactividad de las fases de la ganga. Típicamente, la ruta ácida es la más común, dominando al menos el 90% de los métodos de extracción. Dependiendo fuertemente de la mineralogía, la etapa de extracción a menudo implica exponer el mineral de tierras raras a 400 ° C-500 ° C en ácido sulfúrico concentrado para eliminar el fluoruro y el CO₂, y para hacerle más soluble en agua.

El procesamiento de mineral de monazita tiene diferentes rutas. La pasta de mineral resultante se lava (usualmente usando agua) y se filtra o se decanta hasta eliminar las impurezas sólidas finas. A continuación, los REE se lixivian más (a veces en múltiples etapas) utilizando agentes de extracción (ácido clorhídrico) y agentes precipitantes (bicarbonato de amonio (NH₄)HCO₃ o mediante precipitación de NaOH). Se requieren etapas de separación adicionales a través, por ejemplo, de disolventes sucesivos de extracción (por ejemplo, (C₁₆H₃₅O₃P) y HCl) y a continuación seguido por etapas de precipitación usando amonio Bicarbonato (NH₄)HCO₃ o ácido oxálico (C₂H₂O₄). El precipitado se calienta para formar óxidos de tierras raras, es decir, rare earth oxides (REO). Los LREE pueden ser extraídos por electrólisis de sal fundida a base de cloruros u óxidos. Se utilizan procesos de reducción metalotérmico para extraer los metales raros medianos y pesados tales como Sm, Eu, Tb y Dy en condiciones próximas de vacío con gas inerte a altas temperaturas (> 1000 ° C)(21).

En un proceso de producción basado en la disolución alcalina, el concentrado de monazita se descompone con hidróxido de sodio para producir hidróxidos de tierras raras. Los hidróxidos de tierras raras se lixivian con ácido clorhídrico y una solución mixta de cloruro de tierras raras. La solución mixta se separa en tierras raras ligeras, medias y pesadas utilizando procesos de extracción con disolventes. Extensas etapas de extracción de disolvente se requieren para separar estas corrientes en soluciones individuales de cloruros de tierras raras. Estos cloruros separados se tratan con ácido oxálico para producir un hidrato de tierras raras, y estos se calcinan a continuación en un horno a 1000 ° C para producir los productos finales de óxidos de tierras raras de mayor pureza del 99%(22).

En China, los elementos de tierras raras también se recuperan como un subproducto de la minería de hierro. Del mundo Bayan Obo situado en Baotou, China, que contiene 48 millones de toneladas de Reservas de tierras raras en forma de mineral bastnasita.

A continuación se sintetiza el diagrama de flujo con los principales procesos que tienen lugar según el tipo de mineral base:

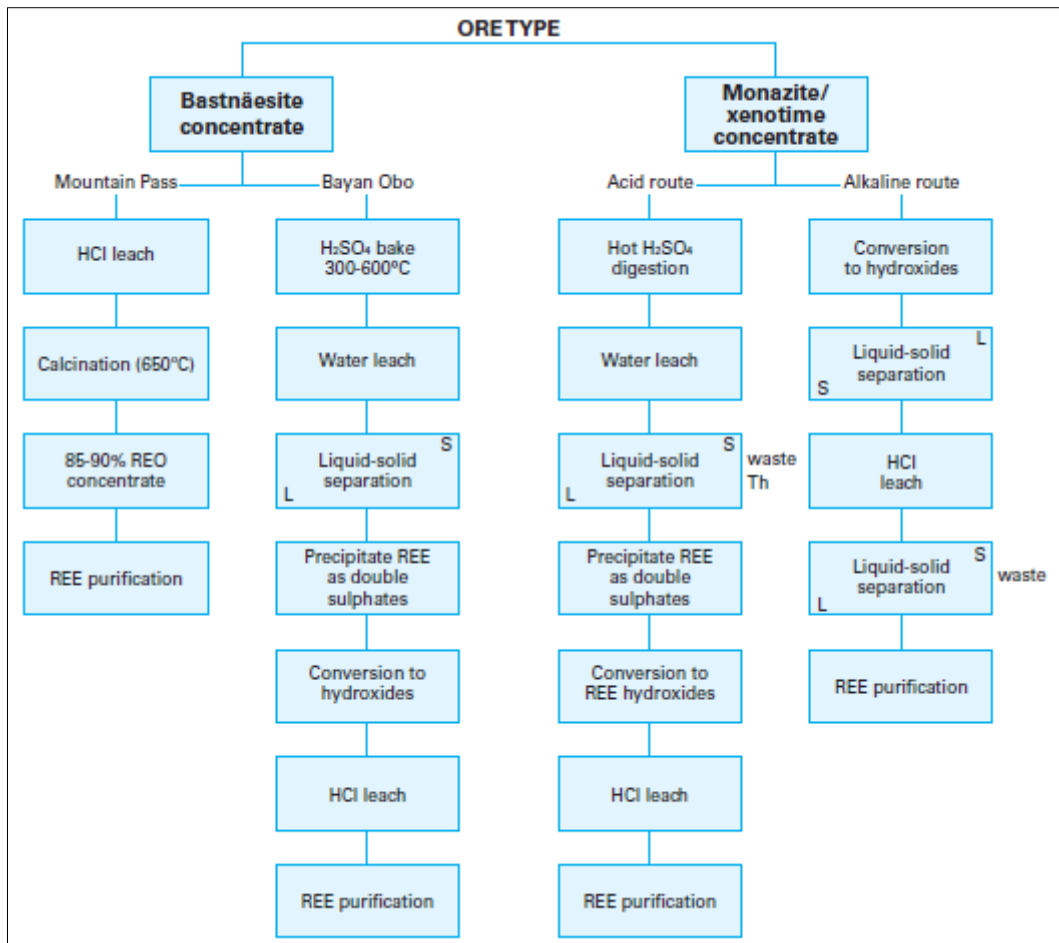


Figura 2.12. Rutas de proceso de separación química desde mineral base según yacimiento. Fuente: British Geological Survey.

En definitiva como ya se ha señalado la minería y la las etapas de procesamiento para el refinado de tierras raras, tienden a ser muy intensiva en energía, agua y productos químicos con importantes riesgos ambientales que afectan a las descargas de agua (radionucleidos, principalmente uranio; metales pesados; ácidos; fluoruros), gestión de residuos y emisiones al aire (radionucleidos, Th y U, metales pesados, HF, HCl, SO₂ y polvo).

CAPITULO 3.

DINÁMICA DE SISTEMAS

3. CAPÍTULO 3. DINÁMICA DE SISTEMAS

3.1. Definición

La dinámica de sistemas surgió de un estudio realizado para una compañía americana a mediados de la década de los años 50 del año pasado. Dicha empresa, preocupada por los comportamientos anti intuitivos observados en la evolución de sus pedidos, y sus consiguientes efectos negativos sobre la marcha de la organización, decidió encargar un estudio al MIT (Massachussets Institute of Technology), dirigido por Jay W. Forrester. Esta técnica se basa en la identificación de bucles de realimentación entre elementos del sistema y en las demoras, de información y de material(23).

Dentro de los modelos de la dinámica de sistemas es importante destacar la diferencia entre los modelos de predicción que pretenden suministrar datos precisos acerca de la situación futura del sistema modelado y por otra parte los modelos de gestión pretenden básicamente establecer que "la alternativa x es mejor que la alternativa y". (24).

Se distinguen tres líneas de desarrollo científico-técnico que se combinan en la dinámica de sistemas las técnicas tradicionales de gestión de sistemas sociales, tanto privados como públicos, la teoría de los sistemas realimentados y, finalmente, la simulación por computadora, con todo esto la dinámica de sistemas pretende elaborar modelos dinámicos en los cuales se recojan los bucles de realimentación detectados en el sistema real, y todo ello empleando como herramienta básica para la simulación en el ordenador(23).

Los principales campos de aplicación de la dinámica de sistemas son: política económica y energética, gestión de recursos naturales, medioambiente y territorio, dirección de proyectos, organización industrial.

3.2. Etapas del modelado dinámico

Con carácter general, para el planteamiento y elaboración de cualquier modelo que recoja un comportamiento dinámico deben seguirse los siguientes pasos:

- Identificación del problema.
- Aislamiento de los factores que parecen interactuar para crear los síntomas observados.
- Trazado de circuitos de realimentación de información tipo causa-efecto.
- Formulación de las políticas aceptables que describen como las decisiones surgen de las corrientes de información disponibles.

- Elaboración de modelos matemáticos de las políticas de decisión, fuentes de información e interacciones entre ambas.
- Generación del comportamiento del sistema en forma de modelo.
- Comparación de resultados con toda la información y conocimiento disponible acerca del sistema real.
- Revisión del modelo en tanto posible como éste represente la realidad del sistema.
- Inclusión de nuevos planteamientos, relaciones y políticas que mejoren la descripción que realiza el modelo de la realidad.
- Implementar en el modelo las políticas y/o decisiones que como consecuencia de la decisión han resultado mejores para eliminar las alteraciones en la evolución del sistema.

Sobre esta etapa se considera hacer especial a dos aspectos importantes en el discurso de este TFM: la obtención de datos y la validación del modelo. En cuanto a los datos cuantitativos que son necesarios para detectar patrones de referencia y validar el modelo en función de si éste reproduce esos mismos datos y además el aspecto cualitativo de los mismos, contrastados con observadores internos a la organización. En cuanto a la validación esta se sitúa como un aspecto fundamental siendo la propia justificación de la simulación simplificada de una realidad, en este trabajo además de comprobar la representatividad del modelo de los datos empíricos, se ha realizado una serie de test de sensibilidad para comprobar la influencia en la variabilidad de las estimaciones en el resto de variables.

3.3. Elementos de un modelo: Diagrama causal

Un Diagrama Causal es una herramienta para mostrar la estructura y las relaciones causales de un sistema para entender sus mecanismos de realimentación en una escala temporal, por lo general estas relaciones se muestran con flechas entre elementos, éstas pueden ser de influencia positiva o negativa, a estas relaciones hay que añadir las ya mencionadas realimentaciones entre variables(25). A continuación se muestra un ejemplo de diagrama causal con bucles de realimentación:

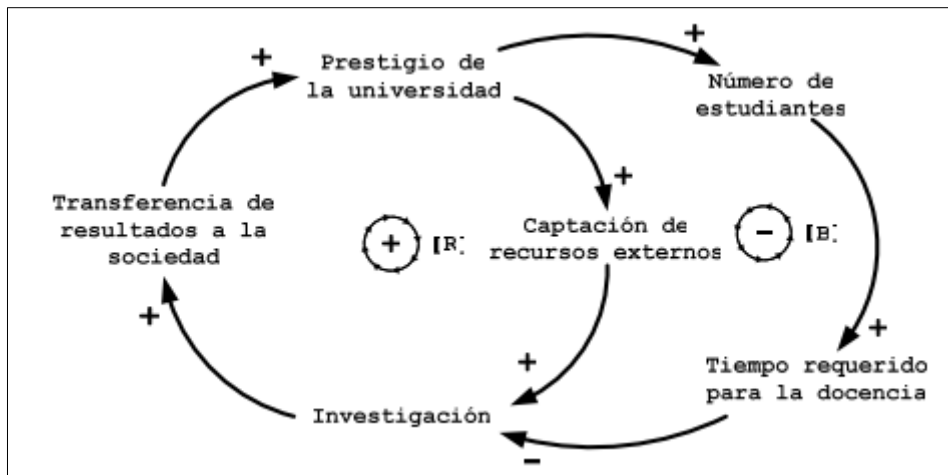


Figura 3.1. Bucle de realimentación positiva y negativa. Fuente: Dinámica de Sistemas, Javier Aracil.

Sin embargo para llevar a cabo la simulación hay que trasladar el Diagrama Causal a un Diagrama de Forrester que es un paso intermedio para la obtención de las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del sistema. Estos diagramas constituyen uno de los conceptos fundamentales de la dinámica de sistemas formando las variables tipo de los diagramas de Forrester:

- Variables de nivel. Son los recipientes, las variables que acumulan magnitudes con el tiempo. Definen el estado del sistema y generan la información en la que se basan las acciones y las tomas de decisiones. Implican la inercia del sistema porque pueden producir retardos por acumulación y, como en los circuitos secuenciales de los sistemas digitales, dotan de memoria al sistema. Se representan por un rectángulo con el nombre en el interior :

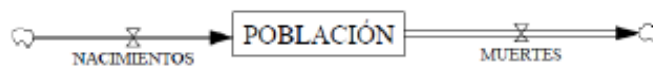


Figura 3.2. Ejemplo de variable stock (Población) y variables de flujo (Nacimientos y Muertes). Fuente: Dinámica de Sistemas, Javier Aracil.

- Variables de flujo. Simbolizan el cambio de las variables de stock o de nivel durante un periodo de tiempo. Al representar la variación del flujo, son las derivadas de los niveles con respecto al tiempo. Representan la ganancia o pérdida de las variables stock. Estas variables suelen estar intervenidas con variables auxiliares o con coeficientes (o tasas).

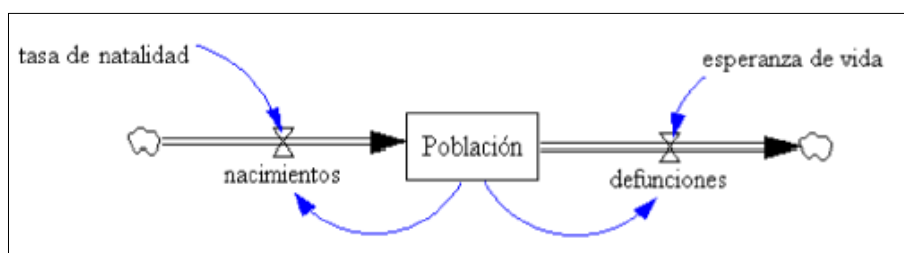


Figura 3.3. Ejemplo de variable de stock, variables de flujo con variables auxiliares. Fuente: Dinámica de Sistemas, Javier Aracil.

- Variables auxiliares. Son variables dependientes intermedias que reciben información de otras variables que transforman en nueva información en base a una función determinada y cuya salida se dirige hacia otra variable auxiliar o hacia una variable de flujo. Se utilizan para descomponer ecuaciones complejas en ecuaciones más simples que faciliten la lectura el modelo.

CAPITULO 4.

MODELO DE SIMULACIÓN EN VENSIM

4. CAPÍTULO 4. MODELO DE SIMULACIÓN EN VENSIM

En este capítulo se va a abordar la estructuración y creación del modelo de estudio que se va a utilizar para vislumbrar el horizonte de la energía eólica y su disponibilidad desde el punto de vista de los minerales críticos que hemos señalado: Neodimio y Disprosio. Si bien este modelo es aplicable a otras energías renovables y recursos debido a sus características y por las propias de la dinámica de sistemas. Cabe destacar como ya se ha señalado el horizonte de este estudio es de 2010 a 2100, si viene estudios de parecido calado extienden su alcance hasta 2050, este estudio cubre todo el siglo XXI, con las previsiones y estimaciones que ello conlleva, siendo además un estudio no sólo exclusivo de una región (EU, EEUU, etc.) sino que su alcance es a nivel global.

La estructura del modelo ha sido concebida de forma que se distinguen dos partes bien diferenciadas. El bloque inicial, que además es el bloque superior, es el correspondiente al estudio de previsiones de demanda de energía global y la correspondiente cobertura que pretende la energía eólica cubrir de aquí a 2100 como capacidad eólica instalada. El segundo bloque, cuyo nexo de unión con el primero es el "Ratio de Producción", corresponde al estudio de extracción de las reservas de mineral, su industrialización en los productos que usa la energía eólica y el reciclado de estos minerales. Por último además de las energías de consumo asociadas a la extracción y reciclado, disponemos de otros indicadores como el CO₂ no emitido por la sustitución de combustión de recursos fósiles y el eliminado por el reciclado de material, la demanda cubierta por el reciclado o el ratio de ocupación de la energía eólica en el mercado de Neodimio y Disprosio, entre otros.

4.1. Bloque Demanda Energética

En este bloque se estudia las distintas variables que influye en el estudio de la potencia eólica instalada que se requerirá para satisfacer las necesidades globales de demanda eléctrica y con ello las necesidades de materiales críticos año a año. Así pues, si delimitamos en forma de caja negra este bloque, tenemos como variables de entrada del bloque el GDP y el Energy Intensity Level of Primary Energy, y como salida del bloque el Production Rate.

A continuación se explica las principales variables, relaciones y datos que se han utilizado para dar respuesta a los objetivos del bloque.

4.1.1. Global Primary Energy Demand (ED)

El inicio no sólo del bloque de demanda energética sino del modelo completo es la estimación de la Global Primary Energy Demand (demanda de energía primaria nivel global). Ésta se define como el conjunto de la energía incorporada en fuentes donde la extracción o captura inducida por el ser humano, con o sin separación del material contiguo, limpieza o clasificación, debe ser realizada antes de que la energía pueda ser comercializada, usada o transformada(26), esto incluye a la energía contenida en producción de las principales recursos energéticos y no energéticos conocidos como petróleo, carbón, gas, nuclear y las principales renovables, así como otras fuentes de entrada al sistema.

Según la corporación BP la energía primaria global sufre un proceso de desaceleración global, aunque año tras año se marca record de consumo de energía, debido al fuerte impulso de la globalización y la desaceleración de la industria China, en 2015 el aumento del consumo global de energía primaria fue del 1%, el menor ascenso en 20 años(27). Las energías renovables (RES) supusieron cerca del 3% de esta demanda, siendo el Petróleo el líder global con el 32.9% con un incremento del 1.6% el menor en 10 años, seguido del Gas Natural que contabilizó el 23.8% en 2015 y del Carbón con un 29.2 % de cuota.

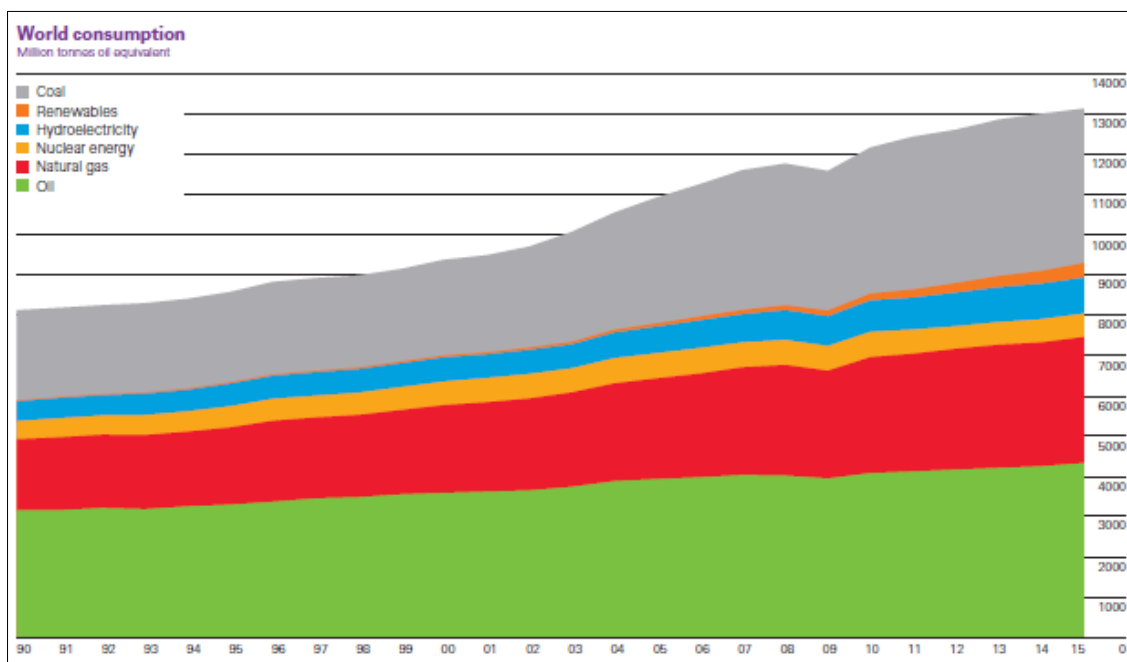


Figura 4.1. Consumo de energía primaria a nivel mundial (Mtoe). Fuente: BP Statistical Review June 2016.

Según la figura 4.1 la energía primaria mundial en 2014 ascendió a 13147.3 toe, es decir toneladas equivalentes de petróleo, lo que equivale a 153 000 TWh.

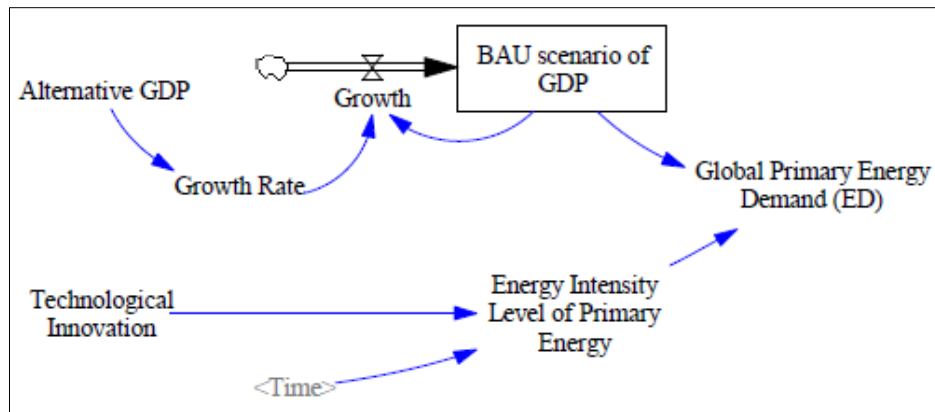


Figura 4.2. Modelado en Vensim, Demanda de energía primaria mundial. Fuente: elaboración propia.

La demanda de energía global primaria tiene unidades de potencia (consumo), y está compuesta tal como se observa en la imagen superior por el GDP (producto mundial bruto) en [\$] y la Energy Intensity Level of Primary Energy (intensidad energética primaria) en [KW*h/\$]. Así pues:

$$\text{Global Primary Energy Demand} = \text{GDP} * \text{Energy Intensity Level of Primary Energy} \text{ [KW*h]}$$

En definitiva un aumento o descenso de la demanda de energía primaria está derivado del aumento o disminución del GDP o de la intensidad energética global.

A continuación se va a disgregar esta variable en sus dos componentes explicando ambas.

4.1.1.1. GDP

El producto interior bruto mundial, conocido como Gross Domestic Product, es una variable socioeconómica monetaria extendida habitualmente por todo tipo de organismos y entidades públicas y privadas para clasificar los recursos, bienes y servicios producidos por las naciones. Habitualmente es un indicador para comparar la riqueza entre países, el cual no contempla otros factores como el coste de vida o la inflación, siendo en otros casos más recomendable el GDP PPP (Purchasing Power Parity).

Actualmente en el año 2017 el GPD a nivel mundial se estima en 2017 en 79.400.000.000.000 \$ siguiendo la tendencia de los últimos años de crecimiento de 2.701% anual, siendo el último valor registrado por el World Bank de 2015 75.241.687.973.546 \$ (28). Como se puede observar del año 2007 a 2010 se produjo una rotura de la tendencia habitual debido a la crisis mundial económica librada por el sector financiero esos años y que aún hoy se ajustan sus efectos.

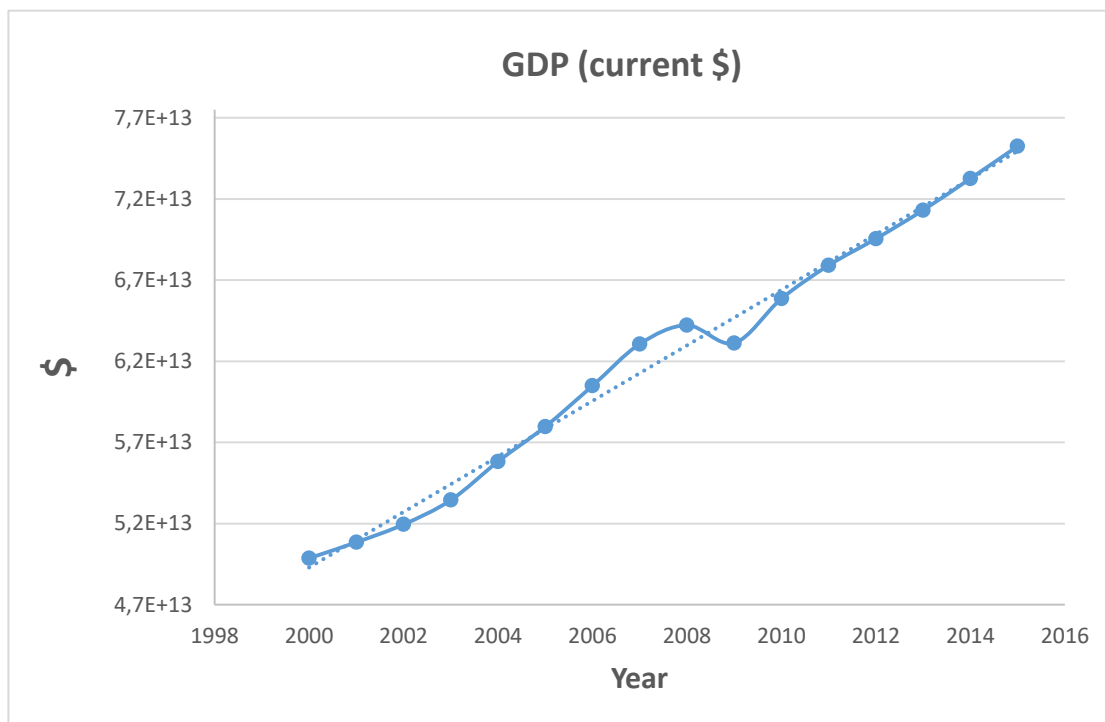


Figura 4.3. Evolución del GDP (\$) desde 2000 a 2015. Fuente: elaboración propia.

El GDP es una variable de tipo nivel ó stock, estando alimentado por la variable tipo flujo Growth que corresponde al aumento anual que sufre el GDP, y a su vez depende de la tasa de crecimiento Growth Rate. Por otro lado ésta tasa de crecimiento de forma general se considera constante, sin embargo se ha considerado interesante que dependa también de otra variable auxiliar, el Alternative GDP, que simboliza los cambios imprevistos en las previsiones de crecimiento, generalmente tiene valor 1 no afectando al Growth Rate, sin embargo se puede introducir en algún momento de la simulación otro valor para representar épocas de mayor bonanza económica o recesiones.

Así pues la variable Growth, con una tasa de Growth Rate constante del 2.701%, cada año alimenta la variable tipo stock BAU scenario of GDP en esa tasa, acumulándose en ésta última el valor en dólares año tras año.

El parametrizado de estas variables en VENSIM es el siguiente:

BAU scenario of GDP= Growth [\$]

Growth= BAU scenario of GDP * Growth Rate [\$/Year]

Growth Rate= 0.027*Alternative GDP

4.1.1.2. Energy Intensity Level of Primary Energy

La intensidad energética es uno de los más extendidos indicadores a nivel mundial de eficiencia energética de las economías mundiales. Según el World Bank, ésta se define como el ratio entre la energía producida y el GDP. La intensidad energética es un indicador de cuánta energía es empleada en producir una unidad de bien económico, en este caso dólares, en definitiva bajos valores de intensidad energética indican que menos energía es utilizada para transformar sus bienes en riqueza económica, luego mayor eficiencia energética de esa nación en cuestión. En el año 2012 la intensidad energética mundial era de 5,842442 MJ/\$ lo que equivale a 1,6229 KW*h/\$, la tendencia de la misma se puede observar en el siguiente gráfico:

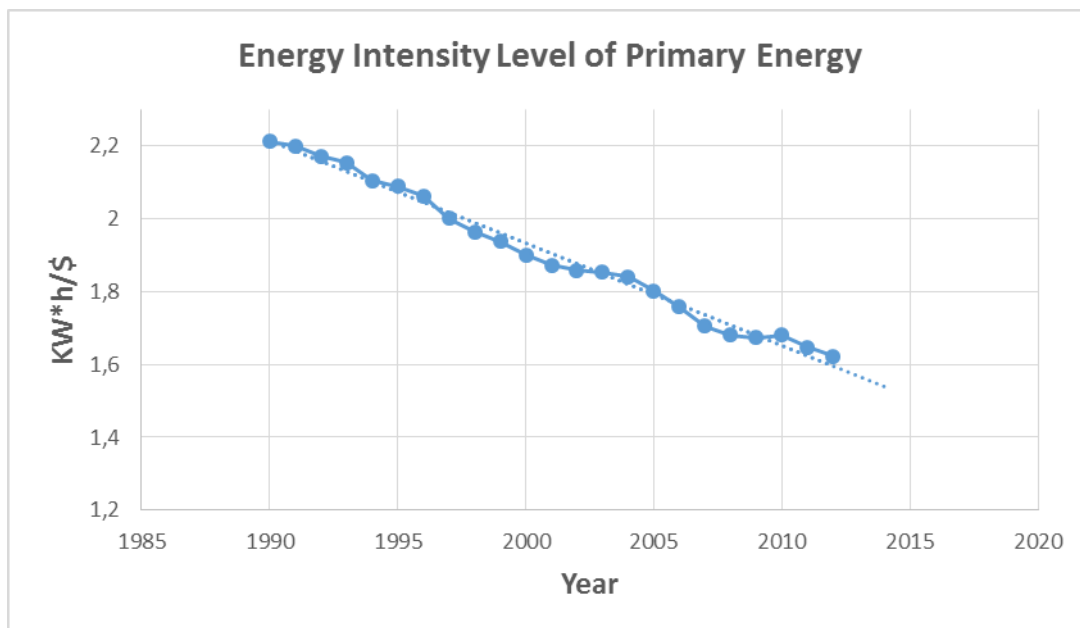


Figura 4.4. Evolución de la Intensidad Energética desde 1990 a 2015. Fuente: elaboración propia.

La intensidad energética se ha modelado como una variable auxiliar que depende tanto de la Technological Innovation como de su propia evolución con el tiempo. La innovación tecnológica en el escenario base se ha cuantificado en valor 1, sin embargo resulta interesante disponer de una variable que introduzca cambios puntuales en la Intensidad Energética de modo que se puedan recoger futuros cambios tecnológicos y descubrimientos científicos que mejoren la eficiencia energética.

Por otro lado, el factor principal de influencia en el modelado de la Energy Intensity Level of Primary Energy es el tiempo. La tendencia de la intensidad energética explicada y la simulación en VENSIM nos permite estimar los siguientes valores desde 2000 al 2100:

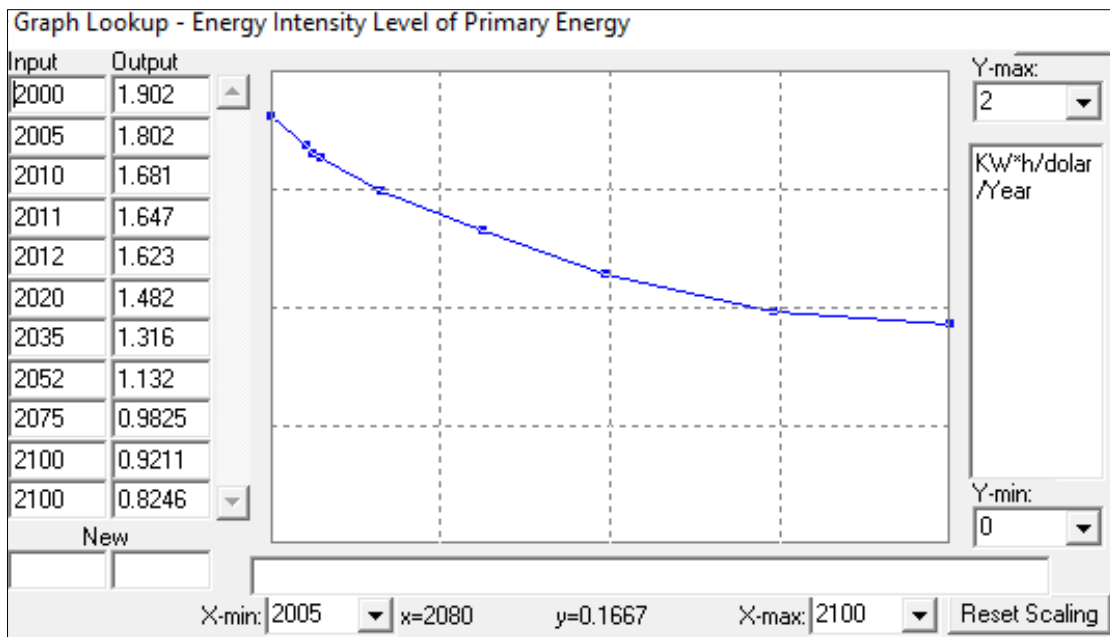


Figura 4.5. Modelado en Vensim, Intensidad energética. Fuente: elaboración propia.

Donde se han tomado los valores del World Bank de 2000 a 2012, hasta 2100 se ha supuesto una tendencia un 50% más conservadora con respecto a lo previsible en 2100 si se mantiene la tendencia con datos reales actuales (0.44 KWh/\$) y cerca de un 20% más conservadora en 2050 (0.92 KWh/\$). Estas estimaciones son previsiones lógicas pues desde 2050 se produciría una estabilización de la misma (26)(9), y además son escenarios más desfavorables pues de decaer más la intensidad energética decae menos la energía primaria demanda global, luego a la larga más potencia instalada de energía eólica y mayores consumos de materiales serán necesitados, por lo que se está cubriendo los escenarios más desfavorables.

4.1.2. Global Electric Energy Demand

La energía eléctrica es habitualmente una parte de toda la demanda de energía primaria, estando ésta formada por el mix de energías a saber química, nuclear, radiante, mecánica, etc. Ésta Global Electric Energy Demand es la parte que supone la generación eléctrica dentro del Global Energy Demand, aproximadamente recoge la generación para iluminación, transporte y uso doméstico principalmente.

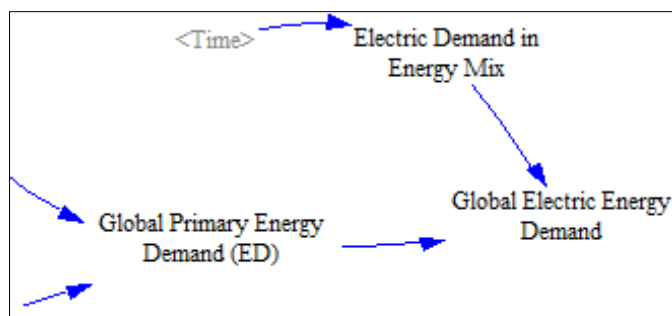


Figura 4.6. Modelado en Vensim, Demanda de energía eléctrica mundial. Fuente: elaboración propia.

Mediante la expresión para su modelado:

$$\text{Global Electric Energy Demand} = \text{Electric Demand in Energy Mix} * \text{Global Primary Energy Demand (ED)} \text{ [KW*h]}$$

Recogemos la dependencia de ésta variable como una parte de la energía primaria global.

4.1.2.1. Electric Demand in Energy Mix

Cómo ya se ha anticipado, esta variable se refiere a cómo el consumo final de energía en una región geográfica dada se descompone por fuente de energía primaria. Incluye los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), la energía nuclear, los residuos y los muchos tipos de energía renovable (biomasa, eólica, geotérmica, agua y solar). Estas fuentes de energía primaria se utilizan para generar electricidad, proporcionar combustible para el transporte y calentar y enfriar edificios residenciales e industriales. La composición de la mezcla energética varía según los países, siendo unos más dependientes que otros de un tipo u otro de energía.

Según las estimaciones recogidas en el informe *International Energy Outlook* (29) y soportadas por otros informes como *Global Wind Energy Outlook* (29) las necesidades de generación eléctrica mundial neta permiten vislumbrar escenarios futuros de 20000 TWh de demanda eléctrica en 2010, 25800 TWh en 2020 y cerca de 36500 TWh en 2040. A partir de las informaciones anteriores y con los datos de energía primaria se ha modelizado la variable auxiliar Electric Demand in Energy Mix como una función del tiempo:

Time (Year)	2010	2020	2030	2040	2050	2065	2075	2085	2100
Electric Demand in Energy Mix [%]	0.2	0.225	0.25	0.3	0.4	0.5	0.55	0.575	0.58

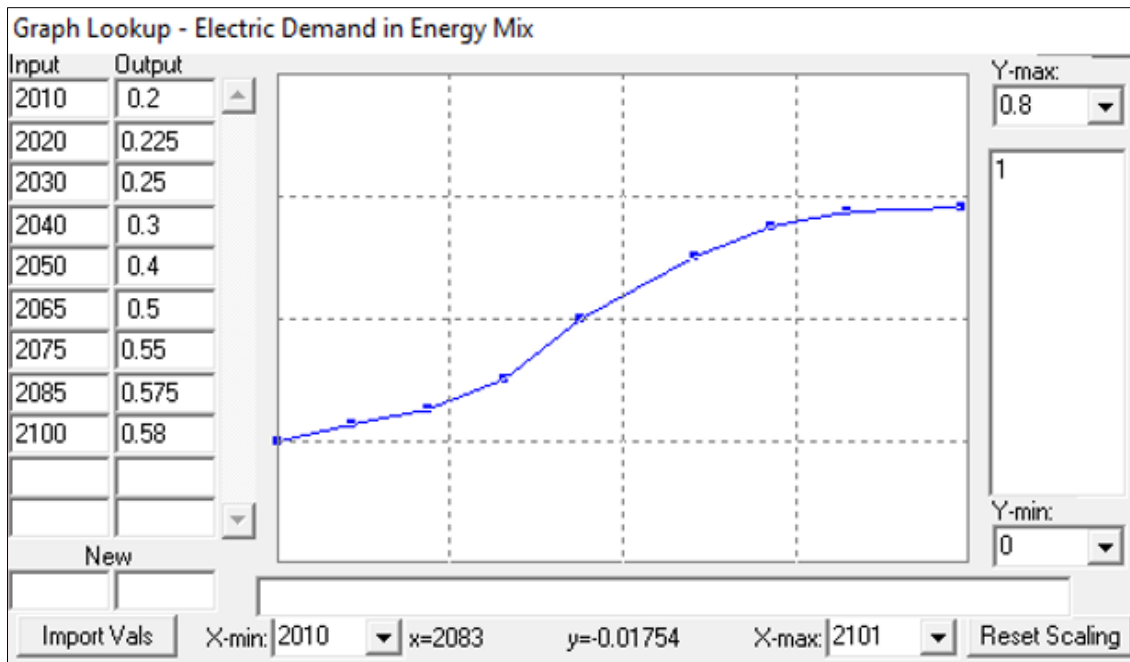


Figura 4.7. Modelado en Vensim, Evolución temporal de la demanda eléctrica en el mix de energías. Fuente: elaboración propia.

Correspondiendo a un 0.2 y 0.58 la parte de la Global Primary Energy Demand que se destinada, de las estimaciones que se ha elegido para 2010 y 2100 y que soportan otros autores como (9)(14) (30) en escenarios más moderados para el crecimiento de la energía eléctrica. El lento despegue de la electrificación del transporte justifica la evolución del 20% en 2010 a cerca del 30% en 2040, en la que los principales países desarrollados se iniciarán más rápidamente pero en menor volumen total, seguidos más tarde por otras regiones como China, África o América Latina.

4.1.3. Total WP Capacity Installed

La potencia instalada a nivel global de carácter eólico va a ser una de las principales variables a prestar atención, pues ella determinará la penetrabilidad futura de la energía eólica en el planeta y los requerimientos en minerales críticos, núcleo de este trabajo.

La estructuración en el modelo para determinar la capacidad eólica instalada representada por esta variable se ha modelizado con la siguiente estructura:

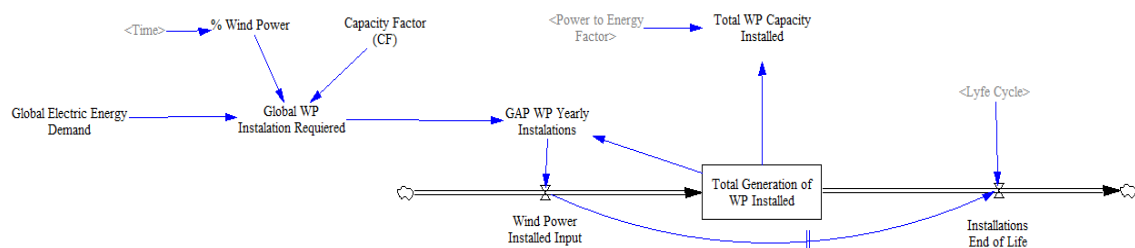


Figura 4.8. Modelado en Vensim, Capacidad eólica instalada. Fuente: elaboración propia.

De la demanda de energía eléctrica mundial representada por la variable Global Electric Energy Demand, a partir del factor de capacidad y del porcentaje anual de cobertura de energía eólica que representa %Wind Power se obtienen los KW*h que anualmente deberían generarse por las instalaciones de energía eólica, esto lo simboliza la variable Global WP Installation Required:

Global WP Installation Required= Global Electric Energy Demand * %Wind Power / Capacity Factor (CF) [KW*h/Year]

Por su parte la variable GAP WP Yearly Instalations, nos proporciona los requerimientos nuevos de energía eólica a instalar anualmente y que se les traspa a la variable flujo Wind Power Installed Input de la que directamente decaerán las necesidades a extraer de Neodimio y Disprosio. Por su parte la variable GAP WP Yearly Installations actúan como un lazo de realimentación, de forma que anualmente compara los KW*h necesitados y los que están ya instalados en el stock, de ser mayor que cero transfiere esa diferencia a la entrada de nuevas instalaciones de energía eólica:

GAP WP Yearly Installations= Global WP Installation Required - Total Generation of WP Installed [KW*h/Year]

A su vez la entrada anual de las nuevas instalaciones anuales de energía eólica:

Wind Power Installed Input= GAP WP Yearly Installations [KW*h/Year]

Por su parte el stock de generación de energía eólica se representa por Total Generation of WP Installed cuya entrada son las nuevas instalaciones anuales de Wind Power Installed Input y la salida es un flujo que representa el fin de vida de los aerogeneradores y que depende de la vida útil de los mismos, a través de la variable Life Cycle, y que se representa con la variable Installations End of Life definida con un retardo de duración el Life Cycle y de valor la entrada de las nuevas instalaciones de entrada:

Installations End of Life= DELAY FIXED (Wind Power Installed Input, Lyfe Cycle , 0) [KW*h/Year]

Total Generation of WP Installed= Wind Power Installed Input - Installations End of Life [KW*h/Year]

A su vez en términos de capacidad eólica instalada directamente en Gigavatios:

Total WP Capacity Installed= Total Generation of WP Installed * Power to Energy Factor / (10⁶) [GW]

Según las estimaciones de diferentes organismos (31) (5) la capacidad eólica instalada ascendió en 2010 a 191 GW. Teniendo en cuenta éstos datos en el año 2010, el stock inicial de energía eólica instalada a nivel mundial para el modelo en VENSIM es $1.67316 \cdot 10^{12}$ KW*h.

A continuación se detallan las principales variables empleada en el modelizado de la capacidad eólica instalada.

4.1.3.1. Power to Energy Factor

Se trata de una variable de transformación de unidades, correspondiendo a las horas que tiene un año para convertir unidades de potencia en energía, concretamente en $1 / (365 \cdot 8)$ [1/h].

4.1.3.2. % Wind Power

Según la World Wind Energy Association (5) en 2016 la energía eólica produjo cerca de 0.045 TW , además según el informe Global Wind Energy Outlook (32) las instalaciones de energía eólica disponibles en más de 90 países con una potencia instalada de 318 GW en 2016 proporcionó el 2.5 % de la demanda energía eléctrica. Además dados algunos escenarios, el potencial de la energía eólica se estima en cubrir hasta el 30% de la demanda eléctrica según la IEA, debido a los compromisos políticos y a los objetivos climáticos marcados por las principales economías y al potencial físico de hasta 40 TW (33) ya en el mundo se estima según la agencia que el porcentaje llega en el mundo al 9% en 2040 y 12% en 2050 (34) y más del 20% en Europa. Lo cual pese al evidente gran salto de desarrollo que tiene que sufrir esta energía no parece descabellado si se tiene en cuenta la electrificación que tiene que venir del transporte (35) y que la demanda de Litio se ha multiplicado por 8 en los últimos años, parece razonable pensar que el potencial de la energía eólica podrá absorber estos porcentajes. Además naciones como EEUU en sus programas de energía ya se han marcado objetivos (4)(9) del 20% de demanda eléctrica producida por energía eólica.

Tal como se observa en la figura en Vensim, la variable %Wind Power se ha modelado en función de la variable tiempo de la siguiente manera con las estimaciones de los principales organismo internacionales:

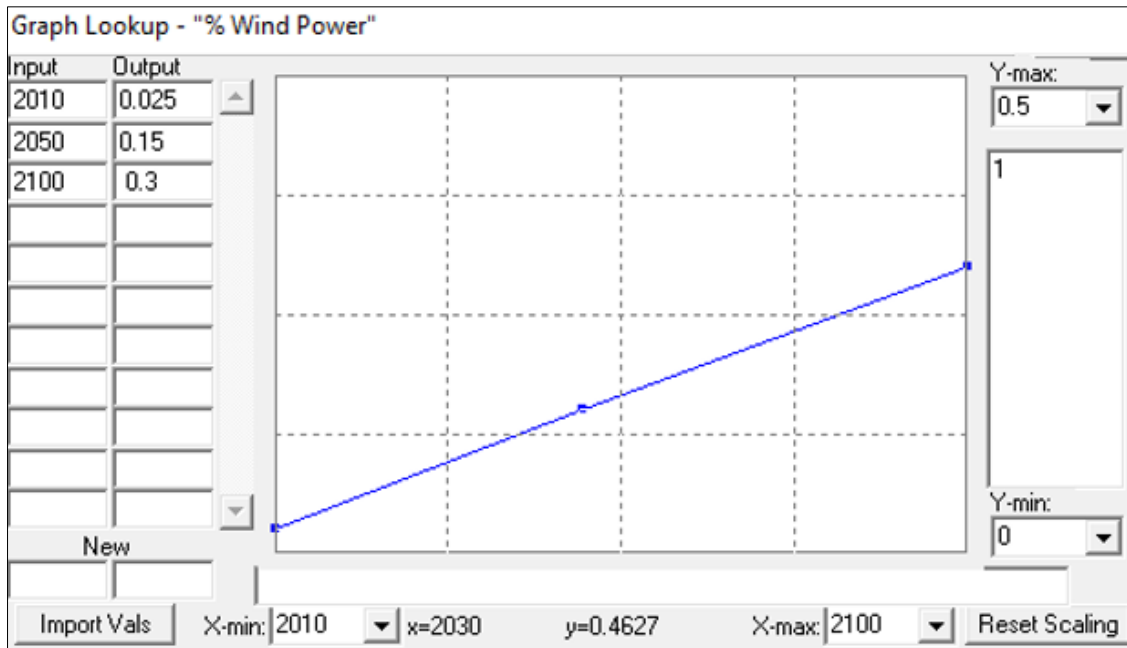


Figura 4.9. Modelado en Vensim, Evolución de la expansión de la energía eólica. Fuente: elaboración propia.

4.1.3.3. Capacity Factor (CF)

El factor de capacidad es una variable típica de centrales de generación eléctrica de todo tipo (eólica, solar, hidroeléctrica, nuclear, térmica) y se define como la relación entre la potencia eléctrica real que obtengo entre la potencia teórica que está instalada, esta última en otras palabras es la potencia que hubiera entregado si la central trabajase a pleno rendimiento de valores nominales el 100 % del tiempo. En general los valores típicos de centrales son del 20-40 % en eólica, 10-30 % en fotovoltaica, 60 % en hidroeléctrica, 60-70 % nuclear, 60-90 % térmicas. Las principales causas de el no desarrollo del 100% del potencial son las fluctuaciones de la fuente de energía, en este estudio es la disponibilidad del aire, las pérdidas en la transformación, la ausencia de demanda, etc.

En este estudio se ha considerado un factor de capacidad mundial del 30% (36), teniendo éste una amplia variación dentro de zonas geográficas distintas como Europa con un 20.8 % ó EEUU con un 25.7 %, asumiendo el potencial de la energía eólica en un 35-40 % (37), parece razonable optar por un 30% de media entre las posibles mejoras de la tecnología y un escenario más desfavorable para el estudio, es decir, mayor potencia instalada necesario, mayor consumo de material crítico.

4.1.4. Nd / Dy Demand in Wind Power

Como se introdujo en este bloque la relación directa entre la potencia instalada anualmente representada por la variable Wind Power Installed Input, dependiente de la demanda eléctrica mundial, y los requerimientos de materiales críticos Nd (ó Dy) Demand in Wind Power, base de este estudio, eran claves.

A continuación se muestra ésta relación existente:

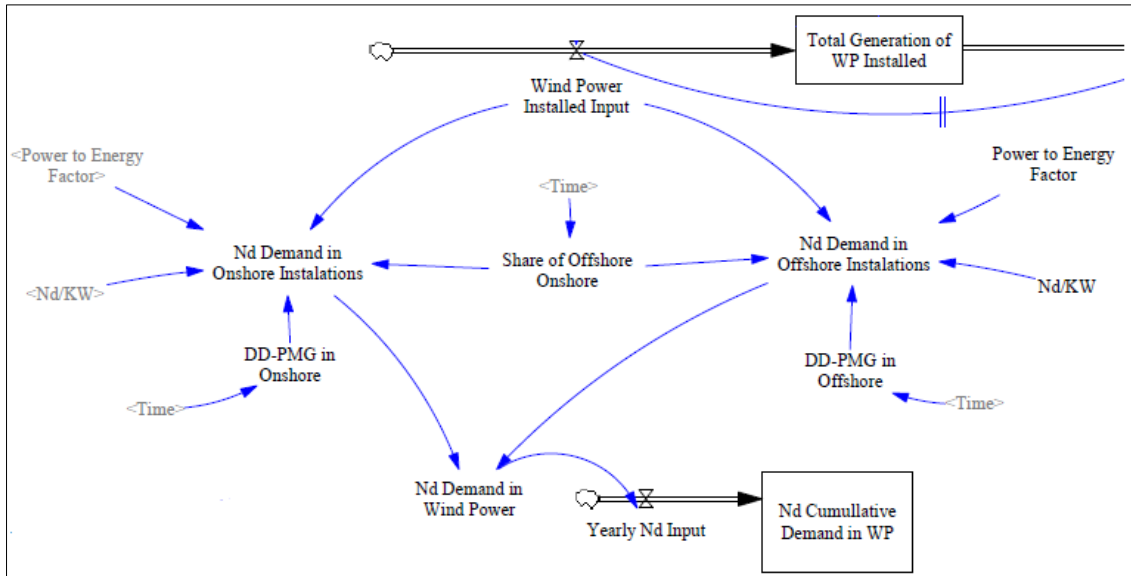


Figura 4.10. Modelado en Vensim, Demanda de Nd en energía eólica. Fuente: elaboración propia.

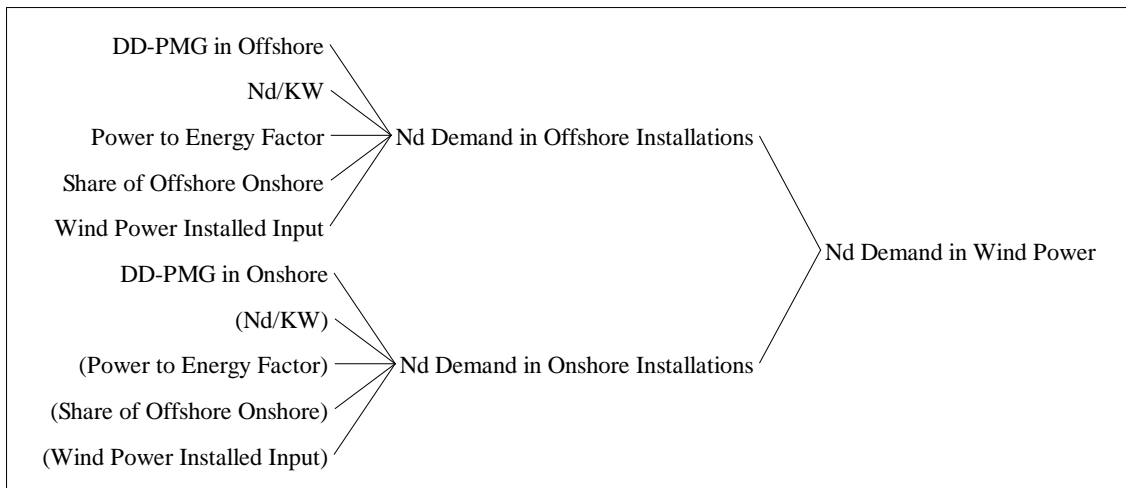


Figura 4.11. Modelado en Vensim, Variables de influencia en la Demanda de Nd en energía eólica. Fuente: elaboración propia.

Si se atiende a la figura obtenida del modelo en VENSIM la variable de tipo auxiliar Nd Demand in Wind Power, es decir la demanda del material crítico Neodimio (o Disprosió para su modelo), va a depender de las demandas por separado de éste material para las instalaciones Onshore y Offshore, pues el requerimiento material va a ir asociado a la penetrabilidad del ya comentado Direct Drive Permanent Magnet Generator (DD-PMG),

siendo superior y con mayor potencial de crecimiento en Offshore que en Onshore, por el factor clave de eficiencia y menor mantenimiento.

A su vez la distribución de instalaciones de instalaciones Onshore y Offshore no va a ser equitativa, sino que en los próximos años los proyectos fuera de la costa liderarán la tendencia mundial, esta distribución viene representado por la variable Share of Offshore Onshore. El parámetro protagonista en este apartado es la variable Nd/KW que representa la cantidad de Neodimio (o Dysprosio en su modelo) por KW de energía eólico instalado, que introduce el requerimiento de material crítico en esta energía. Por último, al igual que en el apartado anterior, se utiliza el conversor Power to Energy Factor para transformar en unidades de energía [KW].

El modelizado de la variable y de sus componentes por tecnología Onshore u Offshore sería:

Nd Demand in Wind Power= Nd Demand in Onshore Instalations + Nd Demand in Offshore Instalations [Ton/Year]

Nd Demand in Onshore Instalations= Wind Power Installed Input * (Nd/KW) * Power to Energy Factor * (1-Share of Offshore Onshore) * DD-PMG in Onshore [Ton/Year]

Nd Demand in Offshore Instalations= Wind Power Installed Input * (Nd/KW) * Power to Energy Factor * Share of Offshore Onshore * DD-PMG in Offshore [Ton/Year]

Dy Demand in Wind Power= Dy Demand in Onshore Instalations + Dy Demand in Offshore Instalations [Ton/Year]

Dy Demand in Onshore Instalations= Wind Power Installed Input * (Dy /KW) * Power to Energy Factor * (1-Share of Offshore Onshore) * DD-PMG in Onshore [Ton/Year]

Dy Demand in Offshore Instalations= Wind Power Installed Input * (Dy /KW) * Power to Energy Factor * Share of Offshore Onshore * DD-PMG in Offshore [Ton/Year]

A continuación se describen las principales variables contenidas en el diseño del modelo para la demanda de Nd en energía eólica.

4.1.4.1. Share of Offshore Onshore

Como se ha expuesto anteriormente, las proyecciones de expansión de proyectos Offshore y Onshore son distintas. En 2010 la capacidad instalada Offshore era de 3.1 GW representando escasamente el 1.6% de la capacidad total, estimada en 197 GW (WWEA 2011). Como ya se introdujo en capítulos anteriores el potencial de las instalaciones Offshore predominarán en el futuro por su mayor predisposición a núcleo urbanos masivos y por su no requerimiento de superficie habitable y/o aprovechable. Ya algunas estimaciones apuntan a que sí se desarrollara 1TW de electricidad eólica Onshore

requeriría cerca de 10^{12} m², que supondría el 5% de la superficie total en la tierra dedicada a agricultura (33) Por otra parte estudios a nivel Europeo asumen la preponderancia en el futuro de esta tecnología (36),(38),(32)

Las estimaciones de los autores se mueven entre el 23 % (34)(26) en 2050 y una capacidad de hasta el 32%. Ya en 2030 se estima que la industria alcance solo en la EU la cifra de 400 GW, de los cuales 150 GW ya son de instalaciones Offshore (36). En este estudio parece razonable asumir en 2050 un tasa del 30% para 2050 y proyecciones en 2100, ante las mejoras tecnológicas y las repotenciaciones de instalaciones junto con el desarrollo de DD-PMG's, de un 45% de parques Offshore(39).

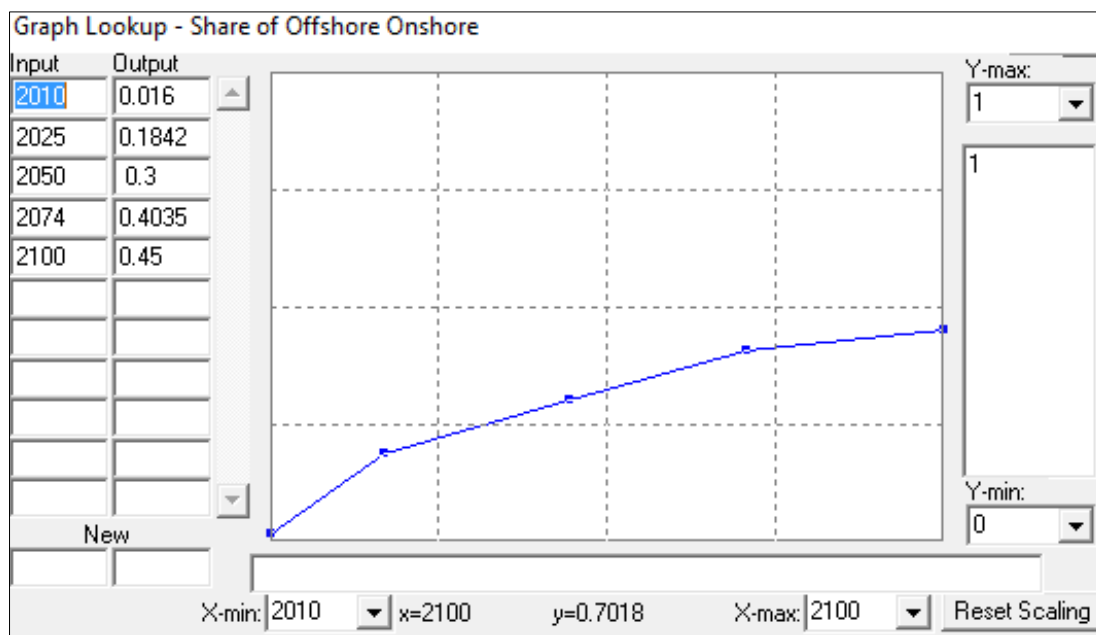


Figura 4.12. Modelado en Vensim, Evolución temporal del ratio de instalaciones Offshore. Fuente: elaboración propia.

4.1.4.2. %Nd/KW y %Dy/KW

Como se ha venido señalando, los imanes permanentes (PM) se han convertido en una solución más económicamente factible para los generadores en energía eólica y que serán usados extensivamente, lo cual deriva el uso de materiales crítico de tierras raras como el Neodimio y el Disproso, que han sido clasificados como críticos en el futuro por multitud de organismos.

Algunos estudios (21) sugieren que los contenidos de los aerogeneradores que usan imanes permanentes de neodimio, hierro y boro (Nd_2O_3) contiene 216Kg/MW de Neodimio de potencia instalada. Otros señalan el contenido en 142.5 Kg/MW con un contenido total de 200 kg./MW en tierras raras (39). Otros estudios (14) estiman el uso de Neodimio y Disproso en 180-197 Kg/MW y 24-27.7 Kg/MW que respectivamente, que coincide con los 182.75 y 14.58 Kg/MW DE Neodimio y Disproso respectivamente del estudio de MEDEAS, que distingue entre requerimientos de tierra raras por

tecnología Onshore y Offshore respectivamente. En este estudio dada la mayor fiabilidad y referente de datos se ha tomado los valores de la USGS en (16) de 216 kg/MW que son 0.000216 Ton/KW, siendo además el caso más desfavorable y posteriormente contrastable con los datos de producción y reserva mundial que la propia USGS gestiona y que sirve de referente mundial de distintos organismos y estudios. En el caso del modelo de Neodimio como se ha ya introducido se ha multiplicado la cantidad introducida por un 0.95, debido al reemplazo que sufre este mineral a favor del uso de Disprosio.

Tomando como base las mismas informaciones y base de datos que para el estudio del requerimiento de material por MW de potencia instalada proporcionada por la USGS en , el Disprosio en el modelo se ha estimado en el 5% del contenido en Neodimio (39) siendo éste utilizado como sustituto para conferir mejores propiedades de resistencia térmica. El contenido utilizado en el modelo con estas estimaciones es de 0.0000108 Ton/KW.

4.1.4.3. DD-PMG in Onshore y DD-PMG in Offshore

Por último, otro de los factores importantes que influirán en el camino hacia el cálculo de las cantidades a extraer de minerales críticos, es la variable DD-PMG de tipo auxiliar que muestra la demanda disgregada de generadores de imanes permanentes por tecnología. Siguiendo con el hilo, los conceptos de generadores sin engranaje y directamente accionados incrementará en las décadas venideras en las nuevas instalaciones de aerogeneradores con el empleo de generadores de imanes permanentes (DD-PMG) (40)(39) El ratio actual de cuota de mercado de aerogeneradores operando con DD-PMG se encuentra en en 10% para ambas tecnología Onshore y Offshore. Las estimaciones de algunos autores y estudios para futuras estrategias de materiales críticos (USDE 2010) estiman para 2050 un potencial de estos generadores de imanes permanentes en una cuota del 25% y del 75% para tecnología Onshore y Offshore respectivamente (40). Estos datos son los que se han transferido al modelo en VENSIM en dos variables de tipo auxiliar, dependientes del tiempo, y que influyen en las demandas de Neodimio y Disprosio:

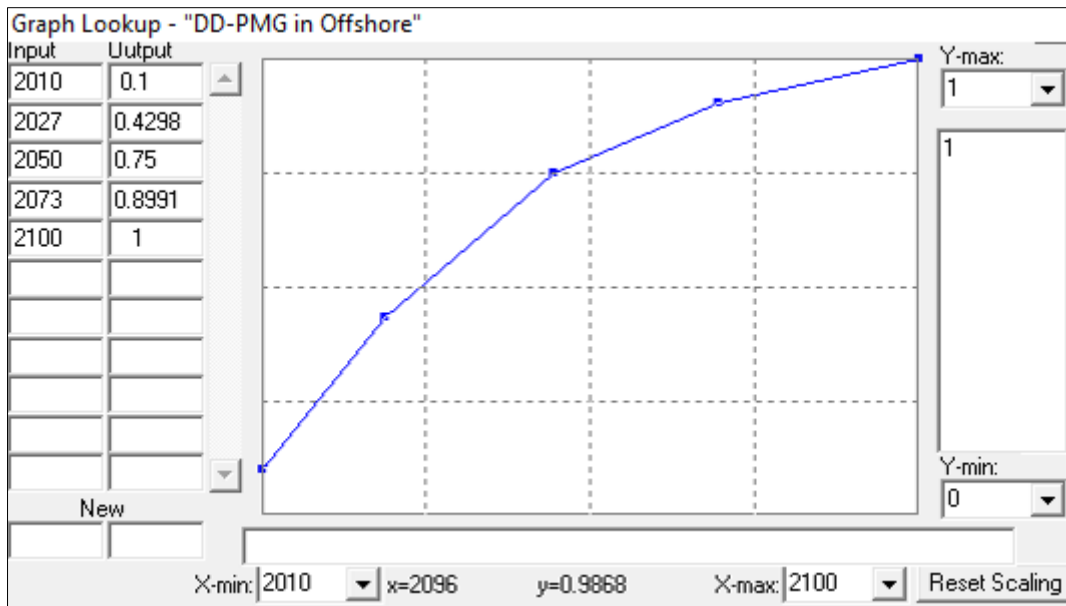


Figura 4.13. Modelado en Vensim, Evolución temporal del ratio de generadores de imanes permanentes en instalaciones Offshore. Fuente: elaboración propia.

Además para los horizontes de 2100 se ha elevado la previsión a un 50% y un 100% para Onshore y Offshore respectivamente, teniendo en cuenta la vida útil del actual parque eólico y la repotenciación que deberá de sufrir además de la extensión masiva de esta tecnología de generadores de última generación y de amplio potencial sobre todo en la preponderante Offshore del futuro.

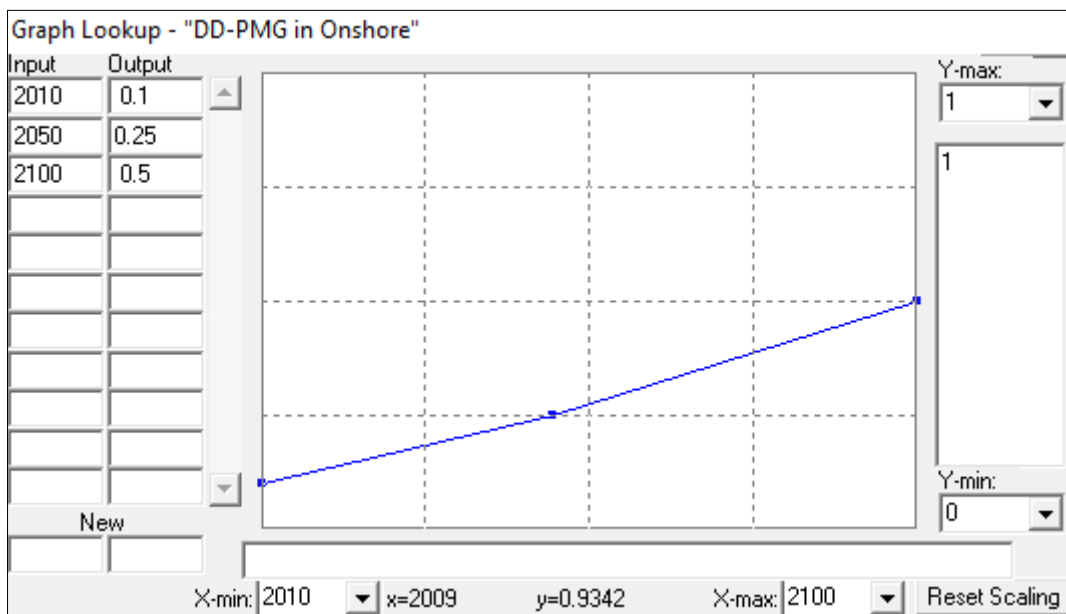


Figura 4.14. Modelado en Vensim, Evolución temporal del ratio de generadores de imanes permanentes en instalaciones Onshore. Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Production Rate

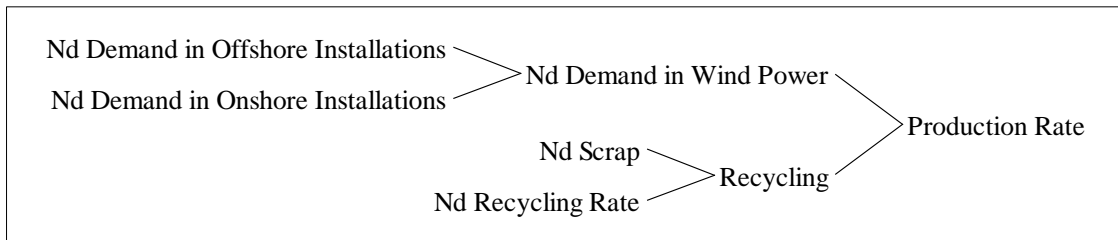


Figura 4.15. Modelado en Vensim, Variables de influencia en el ratio de producción. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte en el modelo en VENSIM se puede observar como el Production Rate viene compuesto por la diferencia entre de la demanda Nd (ó Dy) en energía eólica (Nd/Dy Demand in Wind Power) y por el reciclado (Recycling) anualmente del material que será estudiado más adelante. Matemáticamente:

$$\text{Production Rate} = \text{Nd Demand in Wind Power} - \text{Recycling} \text{ [Ton/Year]}$$

$$\text{Production Rate} = \text{Dy Demand in Wind Power} - \text{Recycling} \text{ [Ton/Year]}$$

La justificación de esto es clara, las necesidades de material crítico viene determinadas desde los KW instalados de energía eólica en la parte superior del modelo y a través de distintas variables especificados en la demanda de material crítico en energía eólica, pero a su vez no toda esta demanda hay que extraerla a través del ratio de producción sino que hay que descontar lo que se recicla anualmente, y que por consiguiente se vuelve a utilizar, aunque teóricamente en el proceso de reciclado sufren pérdidas materiales se va a considerar en el modelo su utilización por completo por simplificación.

Ésta variable tipo auxiliar denominada Production Rate constituye el nexo de unión entre el bloque superior del modelo que hemos denominado bloque energético y el bloque de extracción, siendo el que transfiere a la reserva las necesidades de material.

4.2. Bloque Extracción

En la primera parte de este bloque se realiza el análisis de los recursos y reservas disponibles, así como la transformación de unos en otro, por otro lado, a través del ritmo que marca el ratio de producción se realiza la extracción de las reservas, para iniciar el material el proceso de industrialización en material en uso en los aerogeneradores y su fin de vida. Además asociada a la extracción y al reciclado del material tras su fin de vida, existen unas energías asociadas respectivamente y que aumentarán en función de otros parámetros como la calidad del material extraído. A continuación se explican las principales variables asociadas a esta parte del modelo.

4.2.1. Resource

En definitiva uno de los ejes de motivación de este TFM es el estudio de la escasez de minerales estratégicos en energía eólica. La escasez generalmente está motivada por la relación de dos indicadores, la oferta y la demanda. La oferta se entiende como la cantidad de materia prima que es puesta a disposición de la industria y depende principalmente de la extracción de minerales de la Tierra y en segundo término de la cobertura de material proveniente del ciclo de reciclado, ésta será la motivación de la estructura del modelo en VENSIM de este estudio. A continuación se muestra la clasificación que realiza la USGS de reservas y recursos:

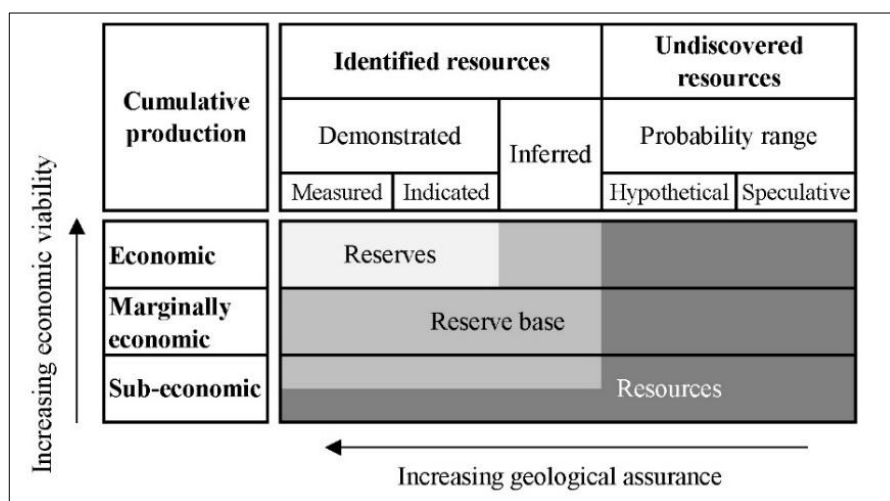


Figura 4.16. Los recursos potenciales y la reserva explotable. Fuente: USGS.

Recursos o recursos totales es la mejor estimación de la disponibilidad total de cada producto en la corteza en tal forma y cantidad que la extracción económica es actualmente o potencialmente factible. La reserva base, también llamada recurso global extraíble, es la parte de un recurso identificado que cumple con criterios físicos y químicos específicos (grado de mineral, calidad, profundidad, etc.). Por último, las reservas se definen como la parte de la reserva base que se puede extraer económicamente en un tiempo determinado. Por lo tanto, como los precios de la tecnología y los productos básicos cambian, las reservas también varían. Si se desarrollan nuevas tecnologías de producción, los recursos inalcanzables pueden ser accesibles o rentables. En esta clasificación, la reserva base es probablemente la aproximación más razonable de la cantidad de un recurso que se puede producir con el tiempo.

Las estimaciones provienen usualmente de inventarios de compañías mineras así como de servicios geológicos nacionales, y están limitados por muchos factores, tales como el precio de los productos básicos, la falta de exploración, las limitaciones geológicas y la demanda. En este sentido la mayoría de materias primas y minerales tienen su fuente en los datos de la United States Geological Survey (USGS), que recoge y contrasta los principales datos de producción, tendencias geológicas y evolución de las estimaciones

de recursos y reservas de minas y yacimientos de todo el mundo, y lo más importante, es aceptado como base de estudio por los principales organismos públicos y privados. En el caso de los dos elementos de Tierras Raras (REE) protagonistas de este estudio (Nd y Dy) no siempre están disgregadas.

En este estudio, como ya se acaba de introducir, se han tomado las estimaciones de la USGS, según ésta a través de los Mineral Commodity Summaries anuales para REE se estima que la Reservas acumulan 120 000 000 Toneladas métricas y de recursos totales hasta 154 000 000 incluyendo la reserva, de los cuales si tenemos en cuenta que dada la propia naturaleza de éstas que se encuentran de forma conjunta en el mineral base, un 18.63 % corresponde a Neodimio y un 0.2% a Disproso éstos valores se estiman como media entre las principales minas extractores entre ellas Mountain Pass y Bayan Obo (41) Por lo tanto para el modelo del Neodimio se tiene unos Recursos adicionales disponibles de 6334200 de Ton y de Reserva que es actualmente explotable de 22356000 de Ton.

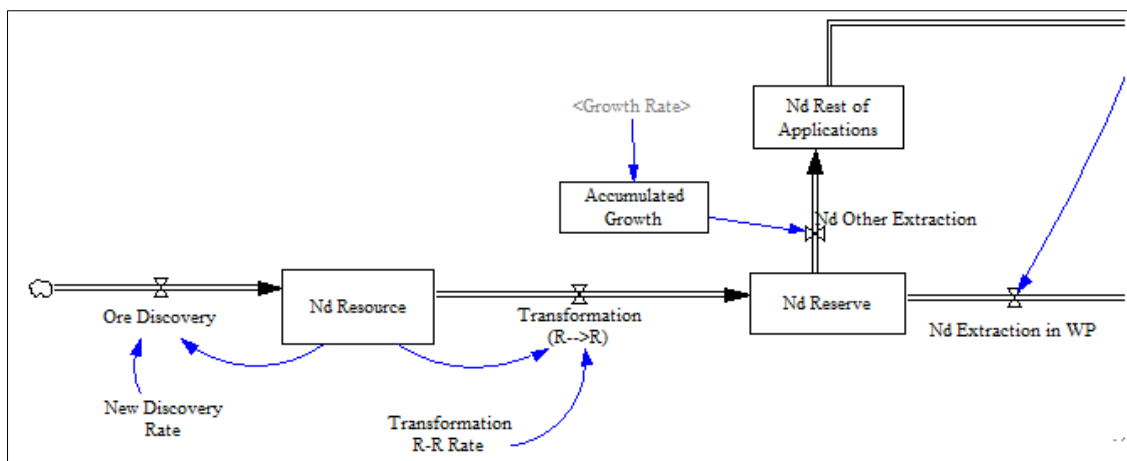


Figura 4.17. Modelado en Vensim, Extracción de la reserva. Fuente: elaboración propia.

El modelado de los recursos disponibles Nd Resource se ha realizado mediante una variable de tipo stock con valor inicial 154 000 000 * (0.1863) Ton y que depende por un lado de los descubrimientos de mineral anuales representado por la variable flujo Ore Discovery y a su vez también por la tasa de transformación de recursos que anualmente pasan a reserva que viene designado por la variable Transformation (R→R). Para el modelo de Disproso, Dy Resource, 34 000 000 * (0.002) Ton. De esta forma se tiene en VENSIM:

$$\text{Nd Resource} = \text{Ore Discovery} - \text{Transformation (R} \rightarrow \text{R)} \text{ [Ton]}$$

$$\text{Dy Resource} = \text{Ore Discovery} - \text{Transformation (R} \rightarrow \text{R)} \text{ [Ton]}$$

A continuación se detallan las variables que influyen en el stock de recursos.

4.2.2. Ore Discovery

La variable tipo flujo indicada corresponde a los nuevos descubrimientos que cada año de la simulación del modelo incorporan Toneladas de recurso disponible que es futurible, dependiendo de la tecnología y la viabilidad económica, de ser incorporados a la reserva. Esta variable está influida por la tasa de nuevos descubrimientos, New Discovery Rate, y a su vez por el stock de recursos del mineral (Nd ó Dy en el estudio), de forma que anualmente un porcentaje de los recursos disponibles son incorporados al stock. Habitualmente este porcentaje viene representado por los descubrimientos de nuevos yacimientos de tierras raras (REE), como ya se ha comentado el principal problema de los REE es su baja concentración lo que les hace difícilmente explotables.

Aproximadamente se estima que existen alrededor de 40 países donde se han encontrado depósitos de REE, es decir, tierras raras: Nd y Dy. China pese a ser el mayor productor mundial con el 95% de la oferta mundial, acumula el 32.72% de las reservas probadas, ésta podría ser superada por Brasil que en 2010 contaba con cerca de 52 597 000 Toneladas en depósitos, correspondiendo al 37.01% de los recursos mundiales. En Asia Japón, Vietnam, India y Mongolia y Kazajistán cuentan con depósitos (22).

En Europa, las principales expectativas están en Groenlandia (42), donde el total de los recursos totales de óxidos de tierras raras alojados en proyectos avanzados alcanzó 38,5 Mt en 2015. Esto se debe a los esfuerzos de exploración sustanciales que se basan en el conocimiento geológico acumulado durante décadas de investigaciones por organizaciones de investigación y exploración privada Grupos, lo cual generaría una futura producción con un potencial del 20% de cuota de mercado.

En Estados Unidos por su parte se compilan el 13% de los depósitos. A continuación se muestra la distribución de los principales recursos a nivel global de tierras raras:

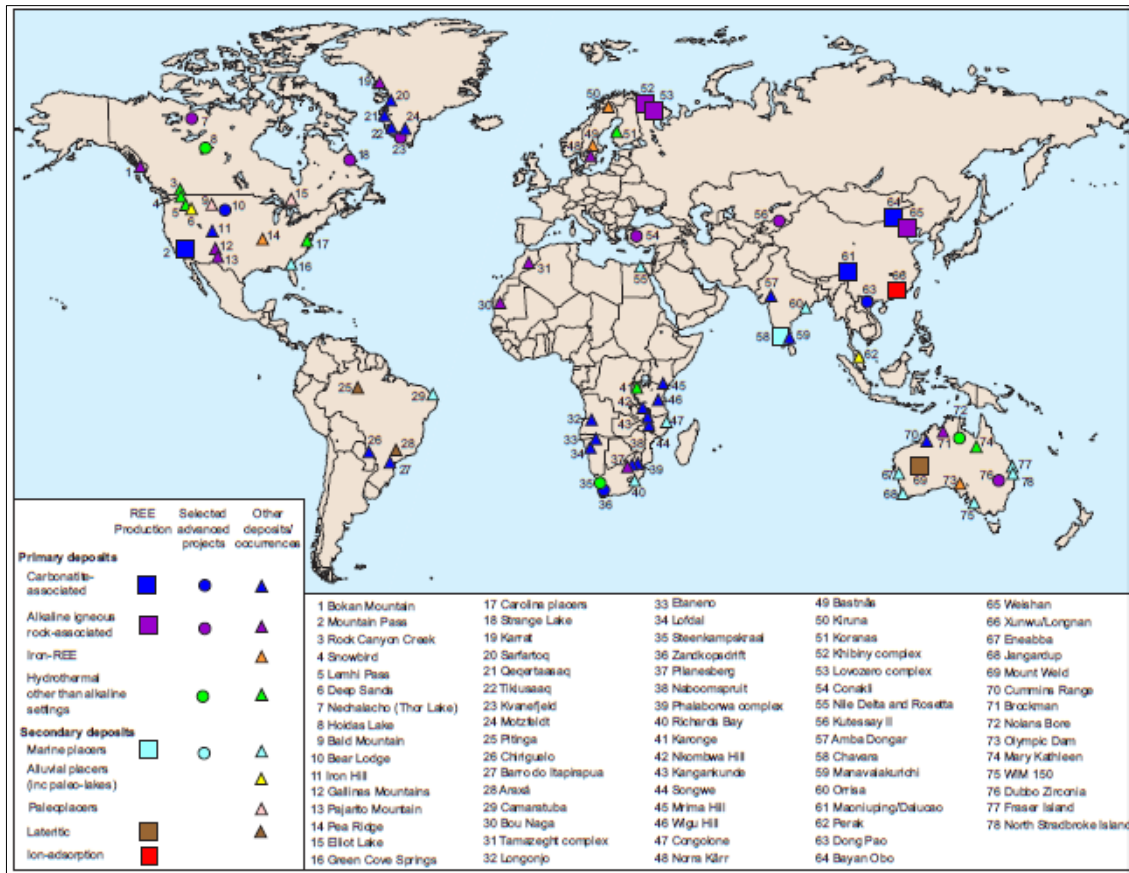


Figura 4.18. Modelado en Vensim, Distribución mundial de los principales yacimientos de REE. Fuente: Economic geology of rare earth elements in 2014, Bernd Lehmann

En este sentido en el modelo en VENSIM, la tasa de nuevos descubrimientos, New Discovery Rate, se ha considerado 0, es decir, en el escenario base, solamente se tiene en cuenta los recursos registrados en la USGS cerca de 154000000 Ton de recursos mundiales incluyendo a los de la reserva tecnológicamente explotable, sin tener en cuenta el potencial de los principales depósitos, de esta forma se estudia uno de los casos más desfavorables con el actual acopio registrado y conocido de depósitos de recursos de tierras raras.

4.2.3. Transformation (R→R)

En relación a la salida del stock de la variable Resource, la variable que realiza la resta anual a la misma es la tasa de transformación de recursos en reservas. Como ya se definió anteriormente (IMAGEN DE RECURSOS) de todos los recursos disponibles de un mineral o material solamente un parte está disponible para su extracción minera, esta parte que es económicamente viable y de una calidad suficiente es lo que se definía como reservas, Nd Reserve y Dy Reserve en el modelo en VENSIM. La conexión entre las dos variables stock recursos y reservas es la variable de tipo flujo Transformation (R→R), que es el porcentaje de recursos que anualmente pasan a reservas con la tecnología y

los medios disponibles para ser viable su extracción. Esta variable está alimentada por la propia tasa que es el Transformation (R→R) Rate.

Por un lado, en otros minerales de mayor expansión y conocimiento como es la extracción de Cu, anualmente el 5% (43) podría asumirse un valor similar al tratarse de un comportamiento parejo en las extracciones de Cu y REE, en cuanto a perspectivas de disponibilidad pues existe las mismas cantidades en la corteza aunque mucho más disperso y con un Energy Replacement Cost del mismo orden de magnitud . Además, si se analizan detenidamente los datos proporcionados por la USGS, teniendo en cuenta que los últimos registros compilados de recursos son del año 2008, se puede estimar la tasa de conversión anual:

2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Resource [Ton]						
1,50E+08	1,50E+08					
Reserve [Ton]						
8,80E+07	8,80E+07	9,90E+07	1,10E+08	1,10E+08	1,10E+08	1,40E+08
Transformation (R-->R) [%]						
0	0	7,33	7,33	0,00	0,00	20,00

De la revisión que se realizó con los descubrimientos y potenciales depósitos del apartado en capítulo anteriores de variable Ore Discovery parece razonable pensar que la tasa de 7.33 % anual se va a mantener en el escenario base sin embargo también se suceden años en los que conversión es nula o muy superior como en el año 2013, teniendo en cuenta el interés industrial que tanto los REE como la energía eólica ha suscitado para el futuro progresivamente se puede estimar que habrá más aumentos de la reserva a través de la transformación de recursos. En el escenario base se utilizará una tasa del 0, estudiando la disponibilidad en la simulación sólo con el material de la reserva. Modelando estos datos en VENSIM:

$$\text{Transformation (R} \rightarrow \text{R)} = (\text{Nd Resource}) * \text{Transformation R-R Rate [Ton]} \text{ ó}$$

$$\text{Transformation (R} \rightarrow \text{R)} = (\text{Dy Resource}) * \text{Transformation R-R Rate [Ton]}$$

$$\text{Transformation (R} \rightarrow \text{R) Rate: 0.00}$$

4.2.4. Reserves

Como se ha venido introduciendo, las reservas de mineral son la parte de los recursos (de la reserva base) que son tecnológica y económicamente viables de explotar para su consumo e industrialización en bienes y productos(43). Como la tecnología y precio de los productos cambian, las reservas también. Si nuevas tecnologías son desarrolladas, recursos inaccesibles pueden ser alcanzados.

El principal problema que se dispone es que los inventarios generalmente proceden de compañías y de servicios geológicos nacionales como la USGS o la BGS, sujetos a volatilidad de precios, falta de exploración, limitaciones geológicas y demanda. Al igual que en los recursos, la información de la reserva de tierras raras (REE) no están disgregadas generalmente por elementos y son analizados a partir de las estimaciones de porcentaje de cada uno a través de varios depósitos y sus contenidos en mineral. A través de las estimaciones de la USGS se estima que las reservas de tierras raras para 2010 es 120 000 000 Ton, de los cuáles dado que se encuentran de forma conjunta en el mineral base, un 18.63 % corresponde a Neodimio y un 0.2% a Disprosio (41). Éstos valores serán tomados como valores iniciales del stock de la reserva para 2010, comienzo de la simulación en VENSIM.

A esta variable Reserves está relacionada con 3 flujos de material en VENSIM, por un lado uno de entrada que es la adición anual de recursos que pasan a reserva (Transformation (R→R)), y por otro lado dos salidas correspondiendo uno de ellos a la extracción (Nd Extraction in WP) de las necesidades de material en eólica que le solicita la variable Production Rate y por otro lado una según extracción (Nd Other Extraction) que corresponde a la demanda de material para el resto de aplicaciones distintas a imanes permanentes (DD-PMG) y energía eólica. Modelando matemáticamente estas informaciones en VENSIM:

Nd Reserve= Transformation (R→R) – (Nd Extraction in WP + Nd Other Extraction)
[Ton]

Dy Reserve= Transformation (R→R) – (Dy Extraction in WP + Dy Other Extraction)
[Ton]

A continuación se explican los flujos que componen ésta variable.

4.2.5. Nd / Dy Extraction in WP

Como ya se comentó en el bloque anterior de demanda energética, la transferencia de necesidades anuales de materiales críticos Disprosio y Neodimio a la extracción se realiza a través de la variable de tipo flujo, Extraction en el modelo en VENSIM, que tiene el mismo valor que el Production Rate que recogía la diferencia entre la demanda total de Nd ó Dy en energía eólica y el valor de todo lo reciclado anualmente. Lo que la variable va a realizar es descontar de la reserva cada año las necesidades que le comunique el Production Rate y sumárselo a la variable stock Ore Extracted, precedente de la industrialización del mineral extraído en producto.

La extracción también va a influir en la variable de flujo Energy Extraction Input, que indicará la energía anual consumida durante la extracción, indicador de la eficiencia de la misma en éste sector y que en los próximos apartados será estudiado.

4.2.6. Nd / Dy Other Extraction

El otro flujo de salida de la variable stock Nd Reserve (ó Dy Reserve) es el correspondiente a una segunda extracción que se realiza de la reserva y que corresponde a las otras aplicaciones tecnológicas que son distintas de la energía eólica y los imanes permanentes, los cuales son usados en ordenadores, sistemas de audio, vehículos eléctricos, smartphones, aerogeneradores máquinas MRI (magnetic resonance imaging). Según estimaciones mundiales de la USGS (16) las aplicaciones de los óxidos de tierras raras de Neodimio tuvieron una distribución de 18 200 sobre 23 900 Ton en imanes de Neodimio correspondiendo al 76.15% del total, seguido muy de lejos por los catalizadores 228 Ton, metalurgia 1900 Ton, 840 Ton de cerámica y otras aplicaciones industriales con 1130 Ton. Para el Dysprosio las aplicaciones fueron muchísimo más exclusivas, recogiendo cerca del 95% de las aplicaciones de su óxido en imanes permanentes de Neodimio, como recordamos como sustituto del mismo. Teniendo en cuenta estos volúmenes y respecto a la producción que disponemos de ambos materiales para 2010, el resto se consideran otros usos y de crecimiento progresivo:

Nd Other Extraction= (18500 * Accumulated Growth) [Ton/Year]

Dy Other Extraction= (180 * Accumulated Growth) [Ton/Year]

A su vez el stock anual de mineral extraído de la reserva será:

Nd Rest of Applications= Nd Other Extraction – Scrap from Other Uses [Ton]

Dy Rest of Applications= Dy Other Extraction - Scrap from Other Uses [Ton]

Probablemente dada la tendencia del sector éstas cantidades descenderán en detrimento de otras aplicaciones industriales y otros sectores estratégicos, sin embargo, dado el objeto de éste estudio que es energía eólica e imanes permanentes, se ha considerado un flujo que crece con el crecimiento de la economía mundial para los otros usos de estos materiales para realizar una aproximación total a descontar de la reserva.

4.3. Bloque de Industrialización del Mineral

Tras la extracción de la reserva, queda por definir la parte del modelo correspondiente al uso industrial de los elementos de éste estudio.

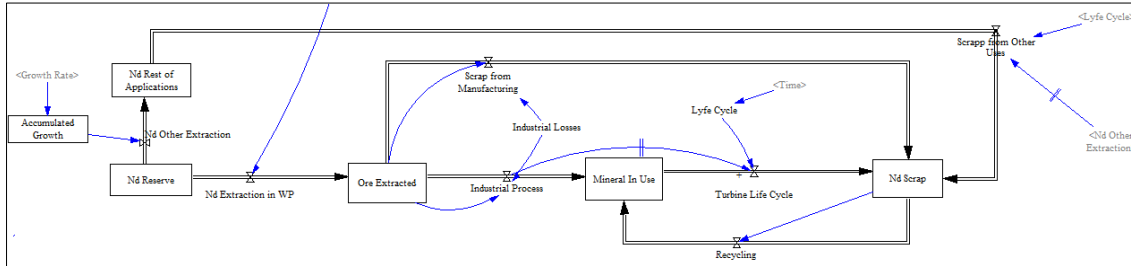


Figura 4.19. Modelado en Vensim, Industrialización del mineral extraído y proceso de reciclado. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la imagen del modelo en VENSIM, las entradas de información y de material a este bloque es la extracción de mineral para uso en energía eólica que corresponde a un flujo de material anual que actúa sobre el stock de mineral extraído Ore Extracted, y de la extracción para otros usos que tras su fin de vida alimenta el Nd Scrap. Del Ore Extracted se obtendrán dos flujos de material uno correspondiente al Scrap from Manufacturing y el otro la parte útil representado por un flujo denominado Industrial Process, de éste tras un período de vida útil se obtendrá el stock de desecho representado por el Nd Scraap (ó Dy Scraap). Por último según una tasa de reciclado, anualmente se recupera un flujo de material reciclado en Recycling y que se descuenta a las necesidades del Production Rate y se incorpora al Mineral in Use. En las próximas páginas se analizarán más a fondo cada una de éstas variables y sus relaciones.

4.3.1. Ore Extracted

En esta variable de tipo stock se recoge el flujo de mineral extraído de la reserva anualmente y que va a formar parte de un bien manufacturado. Esta variable consta de 3 flujos de material, uno corresponde a la entrada de material que le transfiere Extraction y dos salidas, la primera es el Scraap form Manufacturing y que está relacionado con las pérdidas industriales en la manufactura del mineral y por otro lado otro flujo que es la parte útil del proceso industrial y que se acopia anualmente en el stock de Mineral in Use, denominado Industrial Process. En lo que se refiere a modelizado en VENSIM, matemáticamente se representa:

$$\text{Ore Extracted} = \text{Extraction} - (\text{Scraap from Manufacturing} + \text{Industrial Process}) \text{ [Ton]}$$

4.3.1.1. Scrap from Manufacturing

El primero de los flujos de salida corresponde a los desperdicios que se producen durante la industrialización del mineral de Disprosio y Neodimio, aunque típicamente en cualquier proceso industrial todo el material de entrada no es aprovechable al 100%. Estas pérdidas corresponden a la manufactura de los imanes permanentes, motor de la implantación de la energía eólica en las próximas décadas. Ésta variable tipo flujo está determinada por el porcentaje de pérdidas que representa la variable auxiliar Industrial Losses y que típicamente en procesos de éste tipo, donde principalmente se tiene pérdidas de conformado y trozado para la construcción del imán permanente (40) tiene un valor del 20%, es decir, del mineral extraído solamente es posible aprovechar en la transformación en imán un 80% de lo extraído, éste valor será el tomado para la simulación del estudio. De ésta forma en el modelo en VENSIM se reproduce esta información relativa al porcentaje de aprovechamiento anterior y junto con el mineral extraído que también influye en éstos flujo:

Scrap from Manufacturing= Ore Extracted * (1- Industrial Losses) [Ton/Year]

4.3.1.2. Industrial Process

Por otra parte la otra salida de flujo material del mineral extraído es el flujo del proceso industrial Industrial Process, ésta variable se relaciona con las pérdidas industriales, siendo la parte útil del proceso de transformación correspondiendo a un aprovechamiento del 80%, a su vez esta variable está influida por el propio mineral extraído Ore Extracted y además, el Industrial Process influye en el flujo de fin de vida del uso de material representado por Turbine Life Cycle y que comentaremos más adelante. En definitiva en VENSIM:

Industrial Process= Ore Extracted * (Industrial Losses) [Ton/Year]

4.3.2. Mineral in Use

Esta variable tipo stock representa un almacén intermedio que representa típicamente la vida útil de una instalación o parque de aerogeneradores, siendo el propio mineral ya industrializado y ensamblado en sus componentes específicos, en estos momentos se encuentra el Nd y Dy en uso. Ésta variable dispone de dos entradas y una salida. La primera entrada ya enunciada, es el flujo procedente del mineral extraído que se representa con Industrial Process, la otra entrada de material que ésta variable recibe anualmente es el Recycling y que representa el flujo rescatado y vuelto a poner en servicio. En cuanto a la salida se encuentra la variable tipo flujo Turbine Life Cycle, que representa el flujo de fin de vida del mineral en uso, típicamente la vida útil de una instalación eólica. Con estas variables se ha modelado de la siguiente forma:

Mineral in Use= (Industrial Process + Recycling) – Turbine Life Cycle [Ton]

4.3.2.1. Turbine Life Cycle

El flujo de reciclado representa la salida del mineral en uso de la cadena productiva. Ésta flujo de salida está determinado tanto por la cantidad total de mineral en stock en Mineral in Use como de la propia vida útil del mismo representado por el Life Time. El Life Time representa la vida útil de las instalaciones de aerogeneradores, en la actualidad el valor estándar de las mismas es de 25 años de servicio, sin embargo, se estima en hasta 2050 este valor no parara de aumentar progresivamente por las mejoras de tecnología, la reducción del mantenimiento necesario (44). Con estas informaciones se ha modelado en VENSIM por una parte la tasa de vida representada en el Life Time que depende del tiempo:

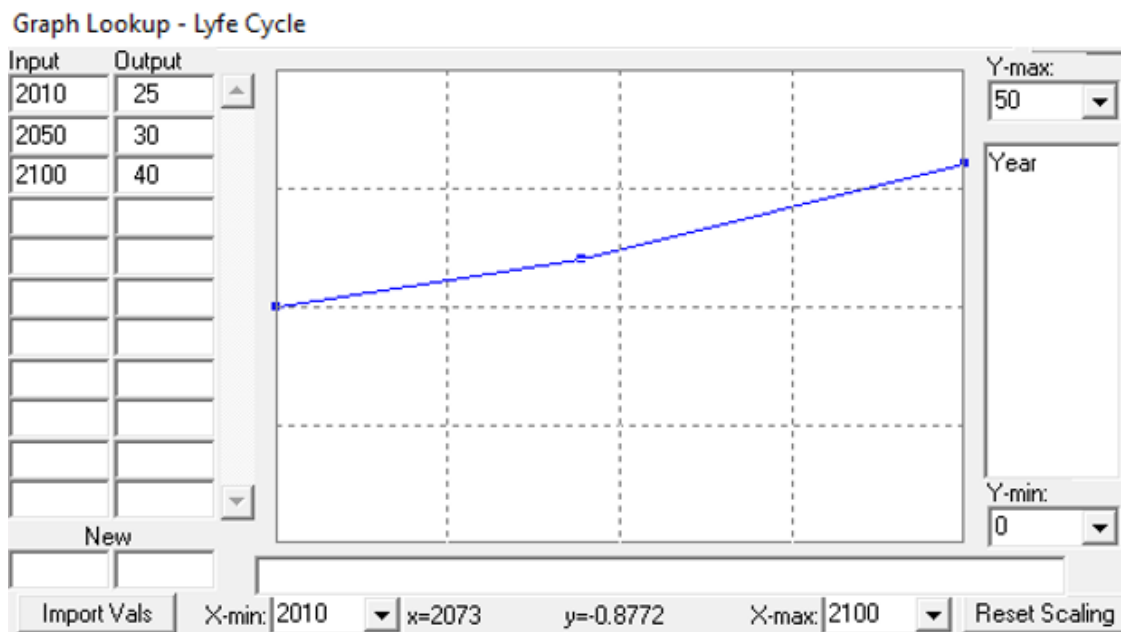


Figura 4.20. Modelado en Vensim, Evolución temporal de la vida útil de los aerogeneradores. Fuente: elaboración propia.

A su vez el Turbine Life Cycle se ha modelado para representar la discontinuidad que representa la vida útil:

Turbine Life Cycle= DELAY FIXED (Industrial Process, Lyfe Cycle , 0) [Ton/Year]

Mediante el comando DELAY FIXED lo que se pretende es devolver el valor de la variable de entrada, en este caso el flujo de material del Industrial Process, en un período de tiempo representado por el Lyfe Cycle (y que además se incrementa con el paso de los años), con un valor 0 inicial en el inicio de la simulación. Con esto se consigue introducir el retardo en la salida del mineral del ciclo productivo.

4.3.2.2. Scrap from Other Uses

Como ya se ha explicado el tras un período de vida útil este flujo proveniente de los otros usos de los elementos Nd y Dy se almacenarán en el stock de ambos materiales. La caracterización de estas variables al igual que en el Turbine Life Cycle se realiza mediante un retardo:

Scrap from Other Uses= DELAY FIXED (Nd Other Extraction, Lyfe Cycle , 0) [Ton/Year]

4.3.3. Nd Scrap / Dy Scrap

Los principales flujos existentes en un en la vida de un metal dentro de su flujo productivo es el siguiente:

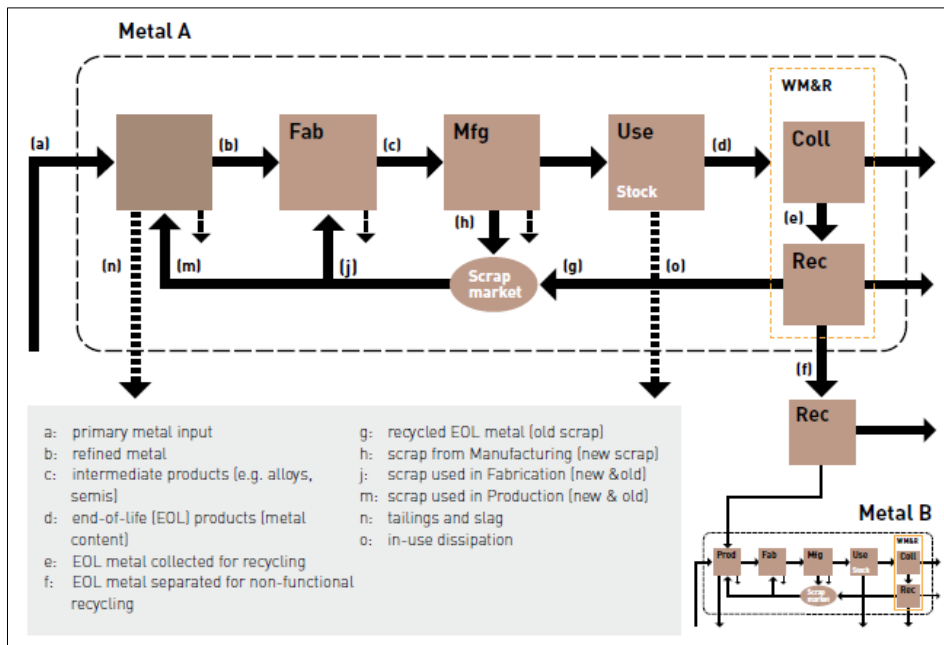


Figura 4.21. Modelado en Vensim, Diagrama ciclo de vida útil de un metal. Fuente: Recycling rates of metals, UNEP.

Según el diagrama tenemos un flujo de entrada del metal A, que sufre una serie de transformaciones de fabricación (Fab) y producción (Mfg), éstos tienen típicamente asociados unos flujos de salidas de pérdidas, tras estos se pasa al uso en un producto o bien del metal (Use) para después de su vida útil (EoL) pasar a una serie de etapas dentro de un bloque de pérdidas en su tratamiento y reciclado (WM&R). Finalmente un flujo que recoge las pérdidas en todas las fases productivas anteriores se suma al flujo de entrada (Scrap Market) para ser otra vez puesto en circulación. En el caso de estudio de este modelo por simplificación se tiene típicamente un único flujo de pérdidas en el proceso de industrialización que es el Scrap from Manufacturing, que se le suma al stock de fin de vida útil Nd Scrap (ó Dy Scrap), siendo este la suma del mineral en uso para energía eólica y el otros usos, de esto un porcentaje de reciclado es vuelto a poner en uso y sumando al Mineral in Use. A su vez para ser útil este reciclado, anualmente se resta a la demanda de Nd y Dy en energía eólica lo reciclado, para que el Production

Rate solamente pida esa diferencia a la Reserve a través del Extraction. El conjunto de variables:

Nd Scrap= (Turbine Life Cycle + Scrap from Other Uses + Scrap from Manufacturing) – Recycling [Ton]

Dy Scrap= (Turbine Life Cycle + Scrap from Other Uses + Scrap from Manufacturing) – Recycling [Ton]

4.3.3.1. Recycling

En variable se aplica la tasa de reciclado conocida, típicamente esto es un flujo dentro del total del stock de material que contempla la variable Nd Scrap (ó Dy Scrap) que anualmente se recicla y se vuelve a poner en circulación.

En este sentido casi todas las fuentes y estudios acuden a los datos que ofrece la UNEP en su informe (45) donde se recogen los principales datos de reciclado de los principales metales. Para las tierras raras, siendo un recurso estratégico se disgregan para el Neodimio y Disproso unos valores del 5% y del 10% respectivamente. Éstos valores son los tomados en el escenario base, sin embargo será interesante en análisis posteriores analizar las consecuencias de esta tasa de reciclado y la extensión de vida de las reservas. A su vez el potencial de éste sector se estima en tasas de reciclado de hasta el 40% (39).

En VENSIM, la variable Recycling depende por un lado de la cantidad de material de desecho total y de la tasa de reciclado en cuestión, quedando:

Recycling= Nd Scrap * Nd Recycling Rate [Ton/Year]

Nd Recycling Rate= 0.05

Recycling= Dy Scrap * Dy Recycling Rate [Ton/Year]

Dy Recycling Rate= 0.1

4.4. Bloque Energético

Como se ha ido señalando durante distintas partes precedentes de este TFM, los procesos de reciclado y de extracción tienen asociados dos consumos de energías que nos indican el gasto en realizar las mismas, signo de la eficiencia del sector, además de ser una potente herramienta de análisis. A continuación se estudian la energía total invertida en el proceso de reciclado y extracción durante el período de la simulación junto con sus respectivas variables.

4.4.1. Total Energy in Recycling

Mediante esta variable incorporada al proceso de industrialización, en la parte inferior derecha del modelo se analiza la energía gastada en recuperar parte del mineral en stock en fin de vida y ser incorporado de nuevo al ciclo productivo, flujo de material que es ahorrado directamente en la extracción.

Como se puede observar en el detalle del modelo en VENSIM el stock de energía utilizada en el reciclado se representa por la variable Total Energy in Recycling, la cual dispondremos de una en el modelo del Neodimio y otra en la del Disproσιο, éstos stock se alimentan anualmente de la entrada de energía en reciclado Energy Recycling Input que depende directamente del flujo de material reciclado.

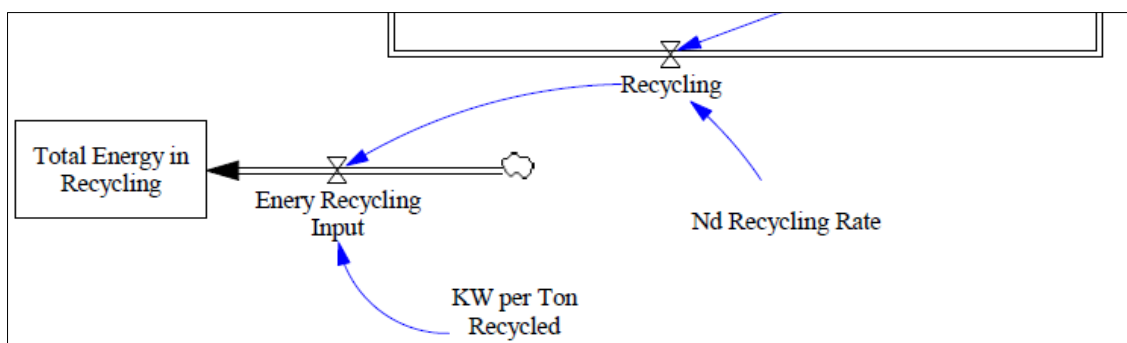


Figura 4.22. Modelado en Vensim, Flujo y energía de reciclado. Fuente: elaboración propia.

Matemáticamente en el modelo el conjunto de éstas variables es el siguiente:

$$\text{Total Energy in Recycling} = \text{Energy Recycling Input [KW*h]}$$

$$\text{Energy Recycling Input} = \text{Recycling} * \text{KW per Ton Recycled [KW*h/Year]}$$

Tanto como para la energía de reciclado como para la energía de extracción el factor clave es la energía asociada a la tonelada de material reciclada y extraída que se va a analizar a continuación.

4.4.1.1. KW per Ton Recycled

Un proceso típico de reciclado consta de números procesos y equipos principales y auxiliares con ello se consigue recuperar parte del Neodimio y Disproσιο contenido en imanes de hierro-boro NdFeB mediante el uso de novedosas técnicas que permiten purificar y separar ambos mediante un proceso que implica el uso de H₃TriNOX (46).



Figura 4.23. Modelado en Vensim, Separación de Nd y Dy encontrados en imanes permanentes. Fuente: J.A. Bogart.

El proceso de separación comienza con una separación de las tierras raras del hierro y el boro contenidos en los imanes por disolución ácida y luego precipitación de las tierras raras. Después de esto, los metales de tierras raras son separados en $[Dy (TriNOX)]_2$ y $[Nd (TriNOx)]_2$. Ambos compuestos se tratan a continuación con ácido oxálico, creando compuestos de $Dy_2(C_2O_4)_3$ y $Nd_2(C_2O_4)_3$ y H_3TriNO_x reciclado. Por último, la descomposición térmica de $Dy_2(C_2O_4)_3$ y $Nd_2(C_2O_4)_3$ los convierte en Dy_2O_3 y Nd_2O_3 , óxidos de tierras raras re-utilizable en imanes permanentes para aerogeneradores.

Si se tienen en cuenta los distintos requerimientos de utilities en el proceso conjunto de reciclado global se dispone del siguiente desglose:

Utility	Energía requerida por lote (MJ/lote)	Energía requerida por lote (KW*h/lote)	KW per Ton Recycled (KW*h/Ton)
Agua refrigerada	52527		
Vapor	11744		
Combustible	543		
Electricidad	2741		
Total	67555		
Lote de alimentación de NdFeB (Ton/lote)	1,46	18765,27778	12852,92998

Por lo tanto, con estos datos se modeliza en VENSIM para ambos modelos Neodimio y Disprosio:

KW per Ton Recycled= 12852.9 [KW*h/Ton]

A continuación se prosigue con el otro requerimiento de energía del modelo, el de la extracción.

4.4.2. Total Energy in Extraction

El otro análisis de requerimiento de energía es el asociado a la extracción de mineral de la reserva, sin embargo, a diferencia de la energía de reciclado ésta presenta sus peculiaridades pues la energía de extracción depende de la disponibilidad de mineral, de su calidad en el mineral base y de la energía asociada a la extracción de ese mineral de una determinada calidad, pudiendo modificarse éstos parámetros en función de sus interrelaciones y el propio tiempo.

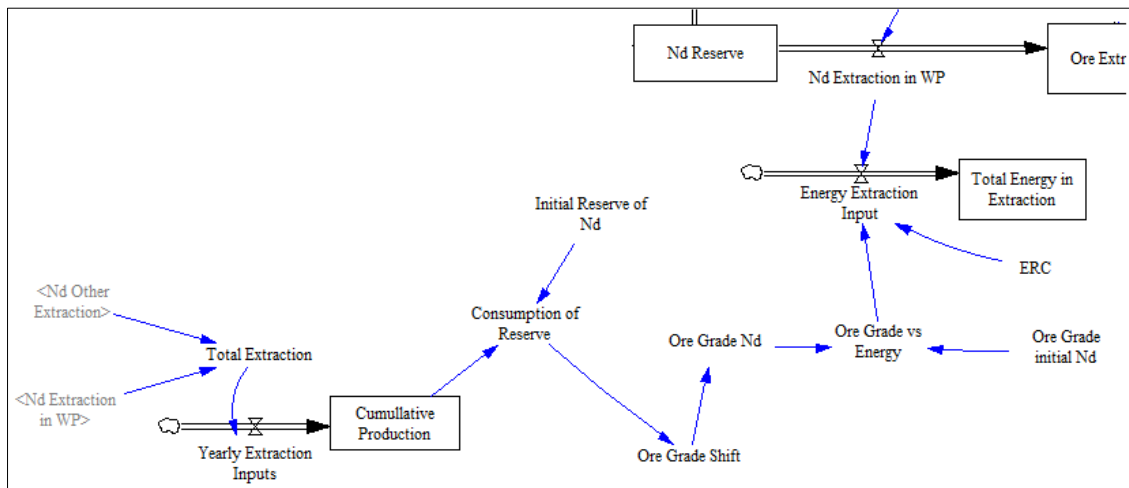


Figura 4.24. Modelado en Vensim. Consumo de la reserva y su influencia en la energía de extracción. Fuente: elaboración propia.

El esquema general del modelo en VENSIM que se presenta, válido tanto para el Neodimio como el Disproseo, en relación a la energía en la extracción viene definida por la variable Total Energy in Extraction. Como se observa se puede identificar el siguiente camino de lógica en torno a la extracción y su energía, si se lee en sentido antihorario podemos identificar que a mayor reserva y extracción mayor consumo de la reserva a su vez mayor degradación del ore grade aumentando el ERC y con ello mayor energía requerida en la extracción. Modelizando estas informaciones se obtienen las siguientes ecuaciones para el modelo:

$$\text{Total Energy in Extraction} = \text{Energy Extraction Input [KW*h]}$$

$$\text{Energy Extraction Input} = \text{Extraction} * \text{ERC} * \text{Ore Grade vs Energy [KW*h/Ton]}$$

A continuación se describen los principales elementos asociados a la simulación de esta energía de extracción.

4.4.2.1. Exergy Replacement Cost (ERC)

La industria minera consume en torno al 8% al 10% de la energía total mundial, de los cuales ciertos indicadores es posible analizar sus indicadores como el consumo de energía, ore grade (grado del mineral), producción emisiones de gases de efecto invernadero y desperdicios sólidos entre otros.

La rareza termodinámica (Thermodynamic Rarity) es definida como la cantidad de exergía requerida para obtener un bien o producto de la roca base que se extrae con la tecnología disponible. La exergía es una mejor medida de la calidad más adecuada para hablar de disponibilidad de recursos por encima de la energía o el tonelaje, que atañen solamente la cantidad. El estado de referencia o "estado muerto" del que se mide la exergía es lo que se conoce como Thanatia, que designa un planeta con todos sus recursos, componiendo más de 292 rocas ordinarias, agotados y todos los elementos químicos oxidados y dispersados en la corteza(47).

En lo que éste estudio nos compete, la rareza implica dos tipos de costes: el primero el coste exergético necesario para convertir un mineral en un bien o producto, incluyendo los procesos de beneficiado, fundición, y refinamiento, en definitiva el coste exergético del mineral desde la mina hasta el mercado; segundo, un coste suplementario o bonus exergético que "cobra" la naturaleza por tener los minerales concentrados en minas en vez de dispersados por la corteza, este coste es el Exergy Replacement Cost (ERC), que en definitiva y como objeto de nuestro modelo se puede definir como la exergía necesaria para extraer un mineral desde la roca ordinaria (en el estado de referencia o estado Thanatia) a las condiciones de concentración y composición encontrados en la mina, con la tecnología disponible. Éste valor será el que corresponde a la exergía asociado a la extracción de la reserva en el modelo de este TFM.

La rareza y el ERC varía de mineral en mineral, de hecho un mineral según estos estándares es clasificado como escaso cuando su exergía de reemplazo (ERC) es elevado, esto ocurre cuando el ore grade, medido como unidad de peso del componente de interés entre el peso en la matriz o roca base, es bajo. El ore grade o concentración de un mineral en la mina es determinante para para estimar el consumo de energía en el proceso de extracción, fundición y refinado(48). Varios estudios muestran como cuando el ore grade decrece en una mina la energía de extracción se incrementa (49), ésta relación será tomada en el modelo de este estudio con la relación que impone la variable Ore Grade vs Energy. A continuación se muestran distintos valores de ERC, rareza termodinámica y energías asociadas al proceso de extracción en la mina para distintos minerales (47):

CAPÍTULO 4. Modelo de simulación en Vensim

Mineral	x_c [g/g]	x_m [g/g]	ERC [GJ/t]	Mining and conc. [GJ/t]	Smelting and refining [GJ/t]	Thermo.rarity [GJ/t]
Aluminium	1.38E-03	7.03E-01	627	10.5	23.9	661.4
Antimony	2.75E-07	5.27E-02	474	1.4	12.0	487.4
Arsenic	4.71E-06	2.17E-02	400	9.0	19.0	427.0
Barite	7.09E-04	9.50E-01	38	0.9	-	38.9
Beryllium	3.22E-05	7.80E-02	253	7.2	450.0	710.2
Bismuth	5.10E-08	2.46E-03	489	3.6	52.8	545.4
Cadmium	1.16E-07	1.28E-04	5,898	263.9	278.5	6,440.4
Chromium	1.03E-04	3.00E-04	4.5	0.1	36.3	40.9
Cobalt	1.98E-04	6.37E-01	10,872	9.2	129.0	11,010.2
Copper	5.15E-09	1.90E-03	292	35.3	21.4	348.7
Fluorite	6.64E-05	1.67E-02	183	1.5	-	184.5
Gallium	1.12E-05	2.50E-01	144,828	610,000.0	-	754,828
Germanium	1.30E-04	3.00E-04	23,750	498.0	-	24,248.0
Gold	1.76E-05	5.00E-05	553,044	110016.1	-	663,060
Graphite	1.41E-06	3.00E-03	20.39	1.1		21.5
Gypsum	1.28E-09	2.24E-06	15	0.2	-	15.2
Indium	5.61E-08	4.50E-04	360,598	3319.7	-	363,917
Iron ore	9.66E-04	7.30E-01	18	0.7	13.4	32.1
Lead	6.67E-06	2.37E-02	37	0.9	3.3	41.2
Lime	8.00E-03	6.00E-01	2.6	0.4	5.8	8.8
Lithium	3.83E-04	8.04E-01	546	12.5	420.0	978.5
Magnesite	2.50E-02	4.20E-01	26	9.5		35.5
Manganese	4.90E-05	5.00E-01	16	0.2	57.4	73.6
Mercury	5.73E-08	4.41E-03	28,298	157.0	252.0	28,707.0
Molybdenum	1.83E-06	5.01E-04	908	136.0	12.0	1,056.0
Nickel	5.75E-05	3.36E-02	761	15.5	100.0	876.5
Nickel Garnierite	4.10E-06	4.42E-02	168	1.7	412.0	581.7
Niobium	8.10E-06	2.00E-02	4,422	132.0	-	4554.0
Palladium	3.95E-10	8.02E-07	8,983,377	583333.3	-	9,566,710
Phosphate rock	4.03E-04	5.97E-03	0.4	0.3	4.6	5.3
Platinum	3.95E-10	8.02E-07	4,491,697	291666.7	-	4,783,356.7
Potassium	2.05E-06	3.99E-01	665	1.7	-	666.7
REE	2.54E-07	6.00E-02	348	10.2	3.7	361.9
Rhenium	1.98E-10	2.33E-04	102,931	156.0	-	103,087.0
Silver	1.24E-08	4.27E-06	7,371	1281.4	284.8	8,937.6
Sodium	5.89E-04	2.00E-01	44.07	3.3	39.6	86.9
Tantalum	1.58E-07	7.44E-03	482,828	3082.8	8.1	485,918.9

Tellurium	5.00E-09	1.00E-06	2,235,699	589366.1	39.2	2,825,104.3
Tin	2.61E-06	6.09E-03	426	15.2	11.4	452.6
Titanium	4.71E-03	2.42E-02	4.5	7.2	128.1	139.8
Titanium	2.73E-04	2.10E-03	8.8	13.8	243.8	266.4
Tungsten	2.67E-06	8.94E-03	7,430	213.0	381.0	8,024.0
Uranium	1.51E-06	3.18E-03	901	188.8	-	1,089.8
Vanadium	9.70E-05	2.00E-02	1,055	136.0	381.0	1,572.0
Yttrium-Monazite	1.30E-04	3.00E-04	159	1198.3	-	1,357.3
Zinc	9.96E-05	6.05E-02	155	1.5	40.4	196.9
Zirconium	3.88E-04	4.02E-03	654.43	738.5	633.0	2,025.5

Si se analiza los datos contenidos para la los REE, resulta de interés para nuestro modelo los $6.00E-02$ [g/g] de x_m definido como el ore grade en la mina, es decir la concentración media del mineral de REE, que será tomado en éste modelo como Ore Grade Initial. Además se toma como valor de ERC 348 [GJ/Ton] que resulta en un valor en el modelo de 96666.67 KW*h/Ton. El uso de éste y no del Thermodynamic Rarity, es debido a que el ERC es la exergia requerida para extraer y concentrar un mineral con la tecnología disponible en la actualidad, no incluyendo tratamientos posteriores hasta el mercado, sino haciendo exclusiva alusión a la extracción.

Como se ha explicado, a partir de las relaciones del ore grade, la extracción y la energía consumida en la misma, hay que establecer las relaciones que unen a unos y otros, y para ello se ha tomado los datos históricos de la extracción de Cobre, debido a su similar abundancia con los REE (Neodimio y Disproso) (aunque distinta concentración y reparto en la atmósfera), y valores similares de ERC y Thermodynamic Rarity, 293 [GJ/Ton] y 348.7 [GJ/Ton] respectivamente, lo que es un indicador lo suficientemente robusto para estimar comportamientos parecidos energéticos y de escasez de recursos. A partir del análisis de la disponibilidad de recursos de Cu se analiza y detalle el resto de variables incluidas en esta parte del modelo.

4.4.2.2. Ore Grade Shift

Analizando la producción acumulada de Cu para el año 2010 se observa cómo se llega a nivel mundial a $591 \cdot 10^6$ Ton, por otra parte las estimaciones de Cu restante disponible acumulan las $177.4 \cdot 10^6$ Ton, conocidos como URR (Ultimate Recoverable Resource), lo que revela que la producción histórica acumulada se eleva al 25.017%, para un pico de producción en torno al 2032 (49). En la siguiente imagen se puede ver la tendencia actual:

CAPÍTULO 4. Modelo de simulación en Vensim

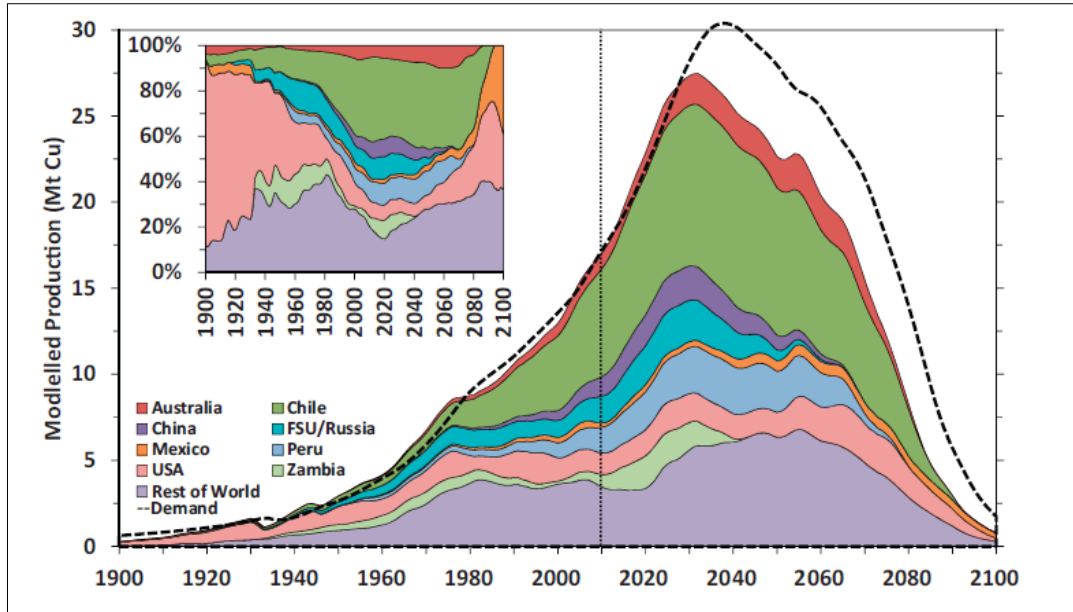


Figura 4.25. Evolución de la producción de Cu por regiones. Fuente: Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper production, S. Northey et al.

Así mismo, si se analizan los datos disponible de ore grade en mina, a partir del %Cu por Tonelada extraída, se observa como la variación para el año 2010 al 2025 es del -55.8%, del 2025 al 2050 -32.9%, del 2050 al 2075 -45% y del 2075 al 2100 -67.8%. A su vez las estimaciones de variación de la producción son del año 2010 al 2025 de un 52.9%, del 2025 al 2050 de -12.7%, del 2050 al 2075 del -46% y del 2075 al 2100 del -93.4. Por lo tanto parece haber motivos fuertemente fundados, para concluir que aproximadamente el ore grade, una vez consumido el 25% de los recursos estimados cada 25 años decrece en torno a un 50.375%, es decir la mitad.

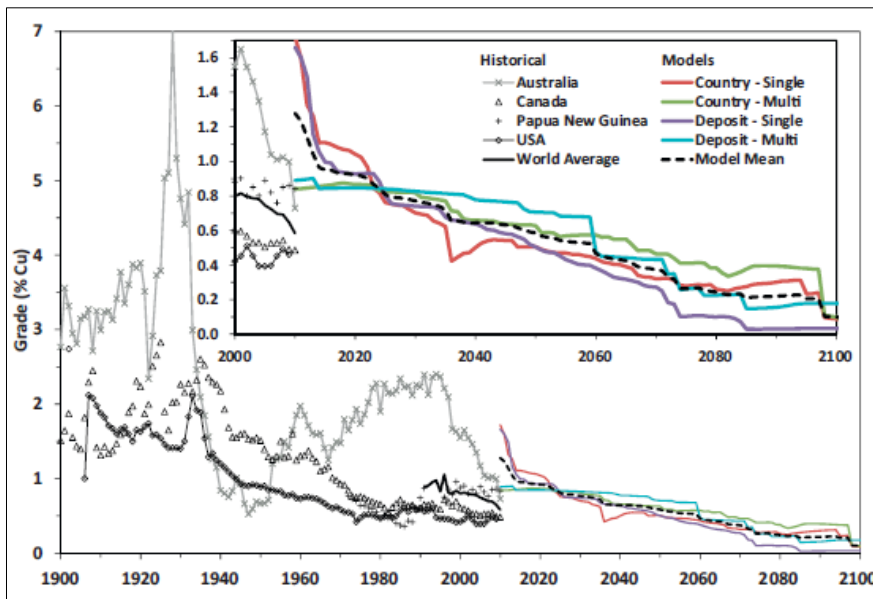


Figura 4.26. Evolución temporal del ore grade del Cu a nivel mundial. Fuente: Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper production, S. Northey et al.

Si trasladamos este análisis al objeto de este TFM que es la disponibilidad de Tierras Raras, con el paralelismo existente entre ambos mineral por su similitudes exergéticas y de disponibilidad, se puede concluir dado que todavía no está próximo el pico de producción de estos elementos (estimaciones de pico a partir del año 2050) el ore grade de las Tierras Raras puede mejorar unos años debido a la mejora de la tecnología, disponibilidad de nuevas explotaciones en desarrollo con material de alta calidad hasta que se consuma el 25% de la reserva. Ésta aumento precederá según nos acercamos al 25% de consumo de las reservas de un decrecimiento del ore grade de las Tierras Raras, que se modeliza para la variable Ore Grade Shift. En la actualidad si se tienen en cuenta la producción acumulada que proporciona la USGS desde el año 1960 al 2015 se estima un consumo del 2.46% de los recursos disponibles, es por ello lógico pensar el aumento del ore grade unos años más hasta alcanzar el 25%.

En el modelo la variable Ore Grade Shift se define como un cuantificador de forma que en cuanto se inicie el consumo del 25% de la reserva esta variable actúa. En el modelo en VENSIM se ha introduciendo según la entrada a ésta variable que es el consumo de la reserva:

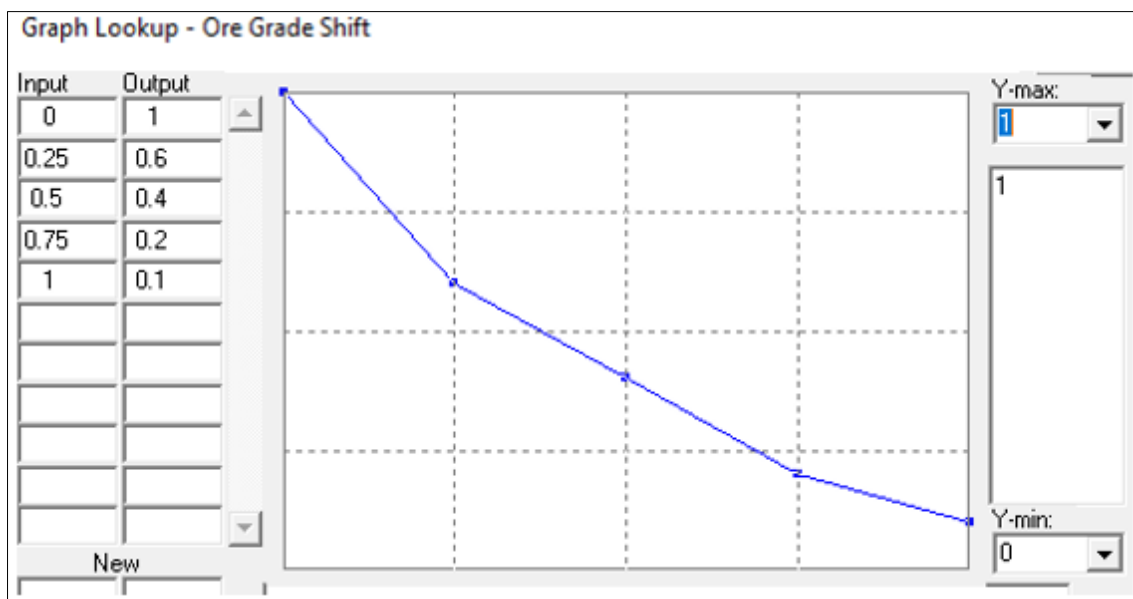


Figura 4.27. Modelado en Vensim. Evolución del ore grade con el consumo de la reserva. Fuente: elaboración propia.

Tal como se puede observar, y en base al análisis realizado de la producción histórica del Cu y su ore grade, se ha asociado un consumo del 25% de la reserva con una caída del 40% del ore grade, para cuando se haya consumido el 75% el ore grade será de la concentración 80% inferior al estado inicial de la misma.

4.4.2.3. Consumption of the Reserve

Mediante esta variable en el modelo se recoge el progresivo consumo que se realiza de la reserva de Neodimio y Disprosio mediante la cuantificación de la demanda acumulada, correspondiente en el modelo a la Nd Extraccion in WP por el uso de estos minerales en energía eólica y a Nd Other Extraccion relativo a los otros usos existentes. En el modelo en VENSIM se corresponde con las siguientes ecuaciones ligadas:

Consumption of Reserve= Cumulative Production / Initial Reserve of Nd

Cumulative Production= Yearly Extraction Input [Ton]

Yearly Extraction Input= Total Extraction [Ton/Year]

Total Extraction = Nd Other Extraccion + Nd Extraccion in WP [Ton/Year]

4.4.2.4. Ore Grade vs Energy

En última instancia queda por trasladar los cambios que sufre el ore grade en el modelo por el consumo de la reserva a cambios en la energía de extracción. Como ya se introdujo en la parte del flujo de Energy in Extraction Input, ésta depende del ERC, de la propia Extraction y a su vez de un cuantificador de los cambios del ERC en función de la calidad del material y su disponibilidad, es decir con los cambios del Ore Grade. Este link entre los cambios sufridos en el ore grade y el ERC se modelizan a través del Ore Grade vs Energy, en esta variable se va a cuantificar los cambios sufridos en el ore grade inicial, que según los valores registrados anteriormente es de 0.06 g/g, respecto al actual mediante un porcentaje de aumento o disminución de la energía necesaria.

Un fiable análisis puede extraerse de los datos de ore grade medio reportado por las compañías mineras es la variación del mismo en el tiempo. A continuación se analiza la información de las principales minas de Cu para el año 2010 por la USGS:

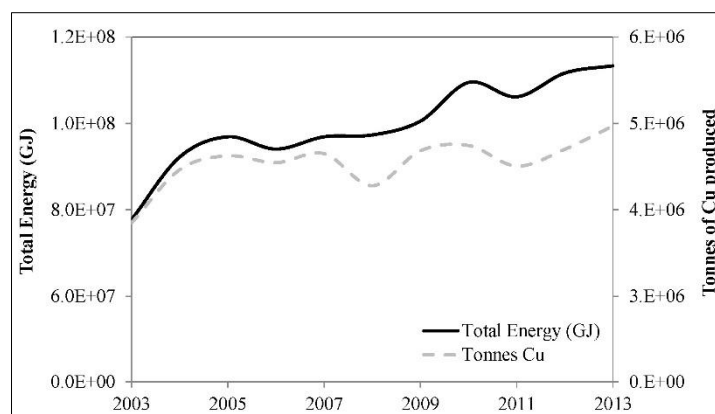


Figura 4.28. Evolución de la energía consumida en la extracción y la producción de Cu. Fuente: Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper production, S. Northey et al.

De éste análisis en las estimaciones del Cu, se observó en el conjunto de minas mundiales como media entre 2003 al 2013 mientras el ore grade disminuía un 25% en ese mismo período de tiempo la energía consumida era un 40% mayor (50). Por lo tanto, el aumento general del consumo de energía está distintivamente unido a la extracción exponencial, con el progresivo consumo de las reservas, que se puede observar a nivel global ya que más energía es necesaria para producir el mismo mineral y suplir la demanda de la sociedad.

En definitiva, el decrecimiento en el ore grade observado para estas minas implica un incremento en la energía consumida pues más material de desecho tiene que ser eliminado del mineral para producir la misma cantidad de concentrado. Por lo tanto ore grade, producción y consumo y energía consumida están fuertemente relacionadas (51).

A partir de estas informaciones contrastadas se modeliza las variaciones en el ore grade y su relación con la energía consumida mediante la siguiente descripción en VENSIM:

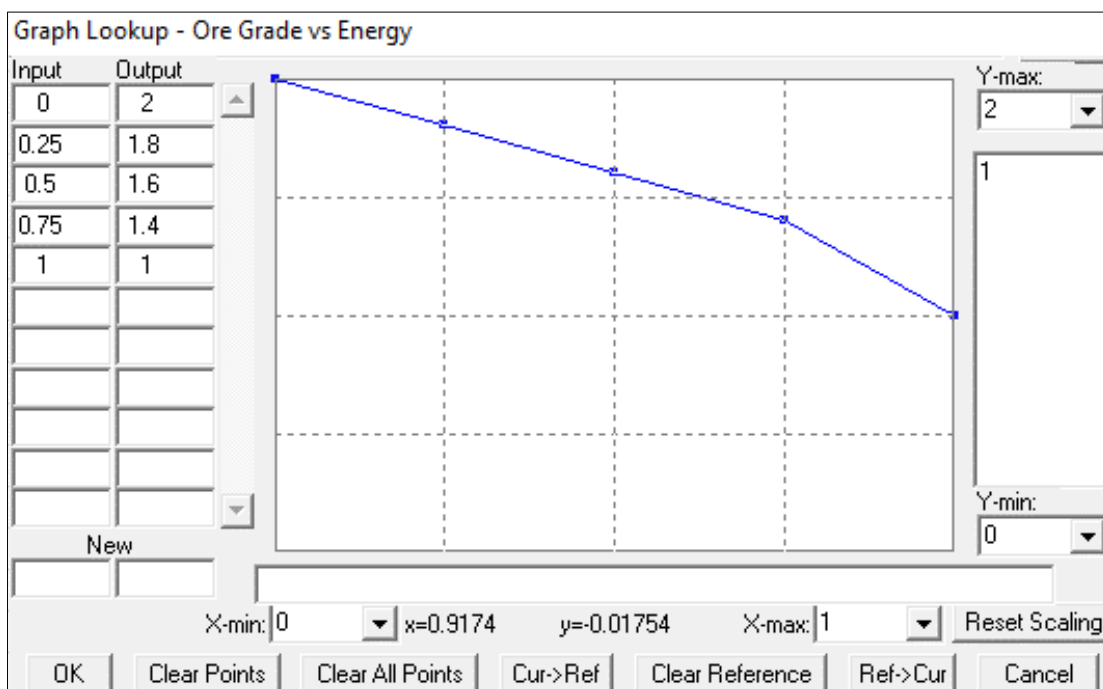


Figura 4.29. Modelado en Vensim. Evolución de la energía de extracción con el ore grade. Fuente: elaboración propia.

Ore Grade vs Energy= Ore Grade Nd / Ore Grade Nd initial

Ore Grade Nd= 0.06 * Degradation of Ore Grade

Se ha cuantificado como cuando el ore grade decae un 25%, esto es un Ore Grade Nd / Ore Grade Nd del 75%, la energía aumenta un 40% traduciéndose en un factor de 1.4

para valor de salida del Ore Grade vs Energy. Para el caso de aumentos de más del 25%, la diferencia entre el ore grade actual e inicial, se ha realizado una estimación de aumentos progresivos del 20% para diferencias del 50%, 75% y 100%, donde la energía en éste último caso sería el doble.

4.4.3. CO₂ Removed by Recycling

Como se ha comentado en este bloque, la minería en general y concretamente la de Tierras Raras es fuertemente energética y consumidora de recursos, así como indicador energético y poder observar y analizar posteriormente la importancia del reciclado, que ya se ha visto como es uno de los grandes retos de la industria, se ha introducido en el modelo una variable que cuantifica el CO₂ no emitido a la atmósfera por los ahorros en la extracción de la reserva al suplir la demanda de Nd y Dy.

A partir de diferentes estudios y datos de distintas corporaciones se estima que las emisiones de CO₂ se estiman en 76 Kg por Kg de metal de Tierras Raras (52), aunque no son de tanta relevancia estas cantidades frente a otras industrias como el del cemento ,conviene prestar atención al cómputo global debido al aumento de la extracción durante los próximos años.

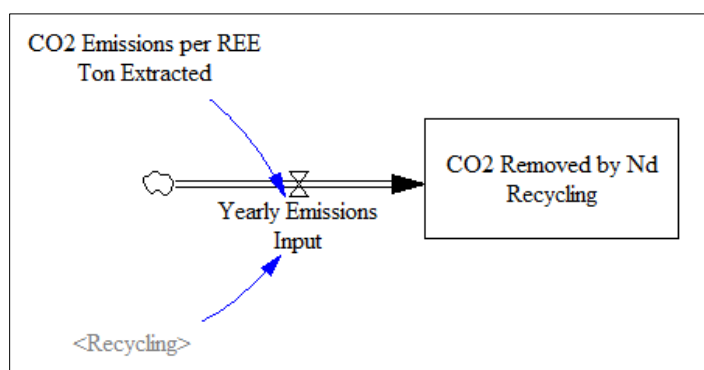


Figura 4.30. Modelado en Vensim. CO₂ no emitido por el reciclado y no extracción. Fuente: elaboración propia.

VENSIM se estudiará mediante una variable stock las Toneladas de CO₂ que se eliminan de la atmósfera durante el período de la simulación. Ésta variable stock se denomina CO₂ Removed by Nd Recycling y es alimentada por el flujo de emisiones anuales que libera el reciclado, representado por Yearly Emissions Input, la cual depende del de flujo Recycling y de CO₂ Emissions per REE Ton Extracted.

$$\text{CO}_2 \text{ Removed by Nd Recycling} = \text{Yearly Emissions Input} [\text{Ton CO}_2]$$

$$\text{Yearly Emissions Input} = \text{CO}_2 \text{ Emissions per REE Ton Extracted} * \text{Recycling} [\text{Ton/Year}]$$

$$\text{CO}_2 \text{ Emissions per REE Ton Extracted} = 76 [\text{Ton CO}_2/\text{Ton}]$$

4.4.4. CO₂ Non Emitted by Fossil Fuels

En esta variable se va a realizar un stock de CO₂ que se ha conseguido no emitir a lo largo de los años por el uso de energía eólica, entendido como el CO₂ que no es emitido por la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. En este sentido a partir de la estimación de 0.00075 Ton CO₂ / KW*h anual (52) se introduce en el modelo:

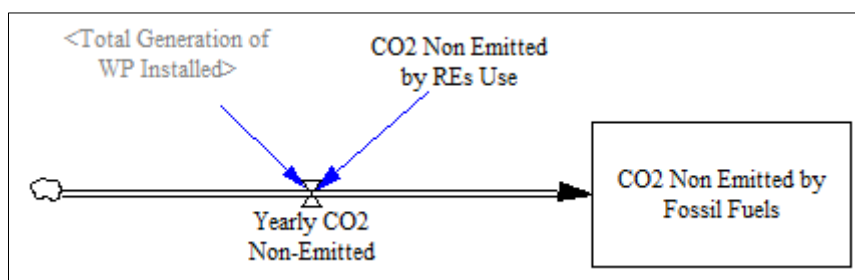


Figura 4.31. Modelado en Vensim. CO₂ no emitido por la generación de energía eólica Fuente: elaboración propia.

$$\text{CO}_2 \text{ Non Emitted by Fossil Fuels} = \text{Yearly CO}_2 \text{ Non-Emitted} [\text{Ton CO}_2]$$

$$\text{Yearly CO}_2 \text{ Non-Emitted} = \text{Total Generation of WP Installed} * \text{CO}_2 \text{ Non Emitted by REs Use} [\text{Ton CO}_2/\text{Year}]$$

4.4.5. Demand Supplied From Recycling

Como un indicador para poner en análisis el peso del reciclado, se ha modelizado en el modelo una variable que cuantifica que parte de la demanda de Neodimio y Disproso que es proporcionada por el flujo de reciclaje anual. Este indicador es la variable auxiliar Demand Supplied from Recycling y es una relación del flujo de reciclado entre la demanda total de Neodimio o Disproso en energía eólica entre. Así se ha trasladado a VENSIM:

$$\text{Demand Supplied from Recycling} = \text{Recycling} / \text{Nd Demand in Wind Power}$$

4.5. Síntesis general del modelo

La lectura del modelo se realiza desde la parte superior hacia la inferior y de izquierda a derecha. Las variables de entrada son el GDP y la Intensidad Energética que determinan la demanda global de energía mundial, de ella una parte corresponde a demanda eléctrica que es la que cubre inmediatamente después en una parte la energía eólica con un factor de capacidad (CF) determinado. A partir de la demanda de energía eléctrica, las estimaciones de penetrabilidad de la energía eólica y el factor de capacidad, se calcula la capacidad eólica instalada anual. Con el flujo de entrada anual

de nuevas instalaciones se calcula a partir de la cantidad de Neodimio y Disprosio por KW instalada, las necesidades a extraer anualmente de la reserva de ambos materiales, además a la reserva hay que extraerle debido a los otros usos cuantificados que tienen estos materiales en otros mercados. En la última parte el mineral se industrializa, en este proceso existen pérdidas ya que en su conformado no todo es aprovechable, este flujo junto con el de fin de vida del mineral en aerogeneradores y el de otros usos forman un stock de material de desecho, del cual una pequeña parte se consigue recuperar y poner en uso. Para realizar este proceso de recuperación se emplea una cantidad de energía anual directamente proporcional a la cantidad recuperada. Al igual para realizar la extracción de la reserva hay que emplear una energía anualmente que depende de la cantidad extraída y a su vez de la abundancia y escasez del mineral por cantidad procesada que se define por el concepto de Exergy Replacement Cost, de forma que a medida que se consume el stock de la reserva sea más caro energéticamente extraer mineral de la misma.

CAPITULO 5.

SIMULACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5. CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En esta parte del TFM se describen los principales resultados de la simulación con el modelo descrito en el anterior capítulo, a lo largo de éste se ha introducido como en algunas variables de tipo constante o auxiliar debido a la propia escasez de información, a previsión futuras o la propia complejidad de definir de forma precisa su valor, se ha estimado o previsto ciertos valores.

En el modelo se simula unas proyecciones de penetrabilidad de la energía eólica alta junto con un desarrollo BAU de las condiciones de entrada al modelo, esto se traduce en mantener expectativas de crecimiento económico actuales y tendencia a la baja de la intensidad energética estabilizándose a partir de 2040. En cuanto al desarrollo de la tecnología e industria, en éste escenario se cuenta con una de las condiciones más desfavorable de recursos minerales, pues la tasa de nuevos descubrimientos es nula es decir se dispone de solamente los recursos registrados en 2010, además de estos no se dispone, pues la tasa de transformación de recursos a reservas es nula también, luego solamente se realiza extracción de éste stock. A su vez, la tasa de reciclado durante toda la simulación se considera la conocida en 2010 comienzo de la simulación sin producirse ninguna mejora. Este escenario es un modelo con unas perspectivas favorables de demanda eléctrica y optimista en imposición en el mercado eléctrico de la energía eólica pero con un estancamiento en las perspectivas de extracción y de reciclado.

A continuación se realiza un análisis con las principales conclusiones obtenidas en la simulación de este escenario.

5.1. Demandas Energéticas

En este primer análisis se comentan los resultados obtenido para las principales demandas e indicadores que se utilizan en esta parte del modelo, siendo los más destacados la demanda global de energía primaria, la demanda global de energía eléctrica y la capacidad de energía eólica instalada.

5.1.1. Demanda Energía Primaria Mundial

La demanda de energía primaria mundial para el año 2010 se estima en $1.11 \cdot 10^{14}$ KW*h o lo que lo mismo 111 TWh en coherencia con las estimaciones de entidades como la compañía BP. Si se toman las estimaciones de éste último para el año 2015, la energía primaria mundial ascendió hasta los 13147.3 millones de toneladas equivalentes de petróleo, lo que equivale a $1.52 \cdot 10^{14}$ KW*h, ligeramente superior a los $1.18 \cdot 10^{14}$ KW*h del modelo, es decir, 118.327 TWh.

CAPÍTULO 5. Simulación y análisis de resultados

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Global Primary Energy Demand [KW*h]	1,11E+14	1,18E+14	1,28E+14	1,54E+14	1,85E+14	2,21E+14	2,7E+14	3,31E+14	4,13E+14	5,12E+14	6,67E+14

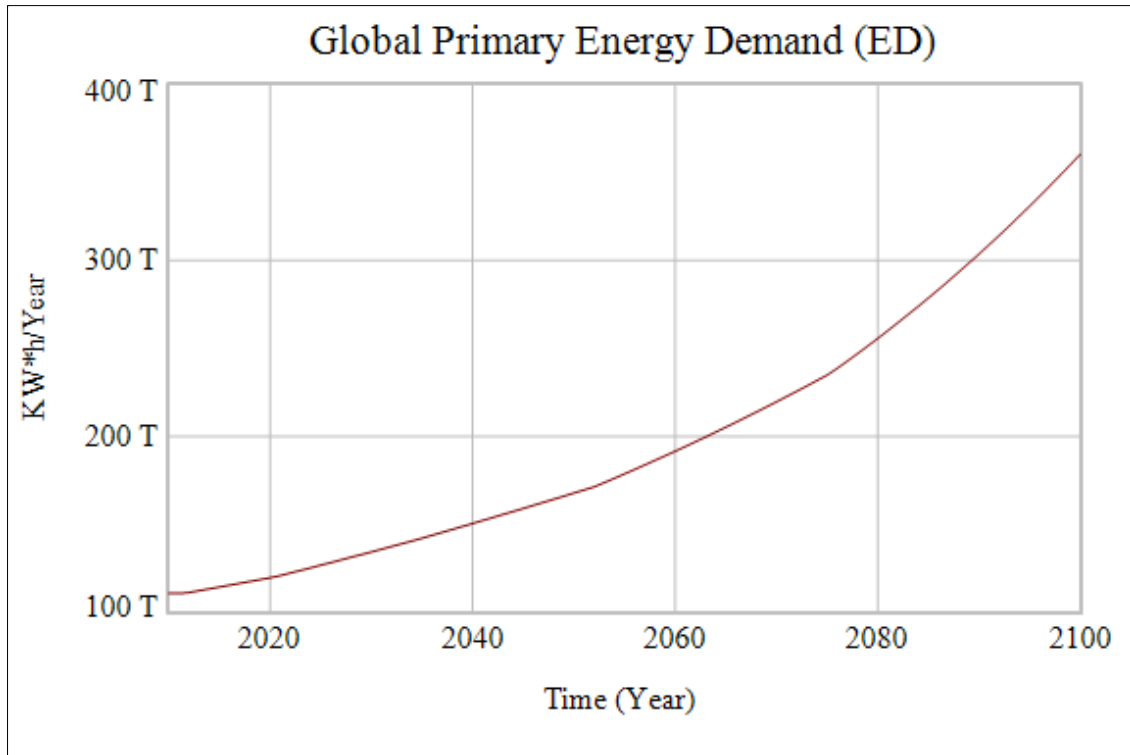


Figura 5.1. Resultado en Vensim. Demanda de energía primaria mundial. Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Demanda Energía Eléctrica Mundial

La demanda de energía eléctrica por su parte, para el año 2010 correspondía según las principales estimaciones en 2012 a $21.6 \cdot 10^{12}$ KW*h lo que equivale a 21600 TWh (32) con un horizonte de hasta 30000 TWh en 2030 (30). Como se puede observar en los resultados del modelo justifican la buena representación de la realidad:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Global Electric Energy Demand [KW*h]	2,2139E+13	2,51E+13	2,88E+13	3,85E+13	5,54E+13	8,82E+13	1,26E+14	1,74E+14	3,03E+14	3,03E+14	3,87E+14

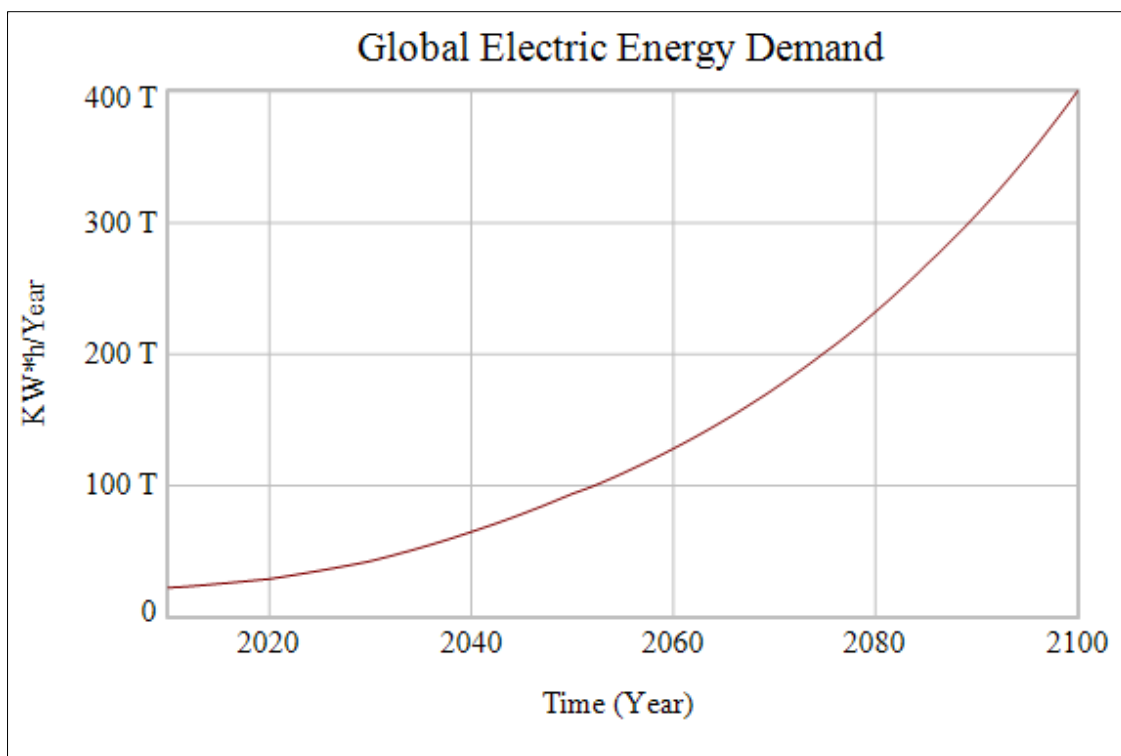


Figura 5.2. Resultado en Vensim. Demanda de energía eléctrica mundial. Fuente: elaboración propia.

Para 2050 la demanda de energía eléctrica mundial alcanza los $8.82 \cdot 10^{13}$ KW*h y en 2100 según las previsiones de éste escenario de crecimiento BAU de la economía mundial de hasta $3.87 \cdot 10^{14}$ KW*h, lo que supone un incremento del 300% y del 1600% aproximadamente, que representan valores coherentes dentro de las previsiones de incrementos del 50% de esta demanda en eléctrica cada década. Se puede destacar a la luz de los resultados gráficos un cambio de tendencia en 2020-2030 hacia una aceleración de la demanda de energía eléctrica mundial, que corresponde a las expectativas de introducción y desarrollo del vehículo eléctrico, que puede sustituir a partir de esta fecha hasta el 30% del consumo mundial de crudo proveniente del transporte, lo que significaría el 50% del consumo en el sector (53).

5.1.3. Capacidad Eólica Instalada

En cuanto a la evolución de la capacidad eólica instalada simulada:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Total WP Capacity Installed [GW]	191	346,341	560,222	1182,465	2275,889	4576,421	7966,88	12902,76	19843,16	29258,02	41630,84
Variación [%]		81,3	61,8	111,1	92,5	101,1	74,1	62,0	53,8	47,4	42,3

Por otra parte, si se observan los resultados obtenidos para la capacidad eólica instalada se pasa desde los 191 GW que se estiman en la actualidad hasta los 560GW en 2020 y 2275.89 GW en 2040 de capacidad eólica instalada, que corrobora las estimaciones de hasta 800 GW en 2021(32),3305 GW en 2040 y hasta 4028 GW en 2050 (33)de capacidad eólica instalada y dentro de los límites superiores e inferiores de diferentes autores (54).

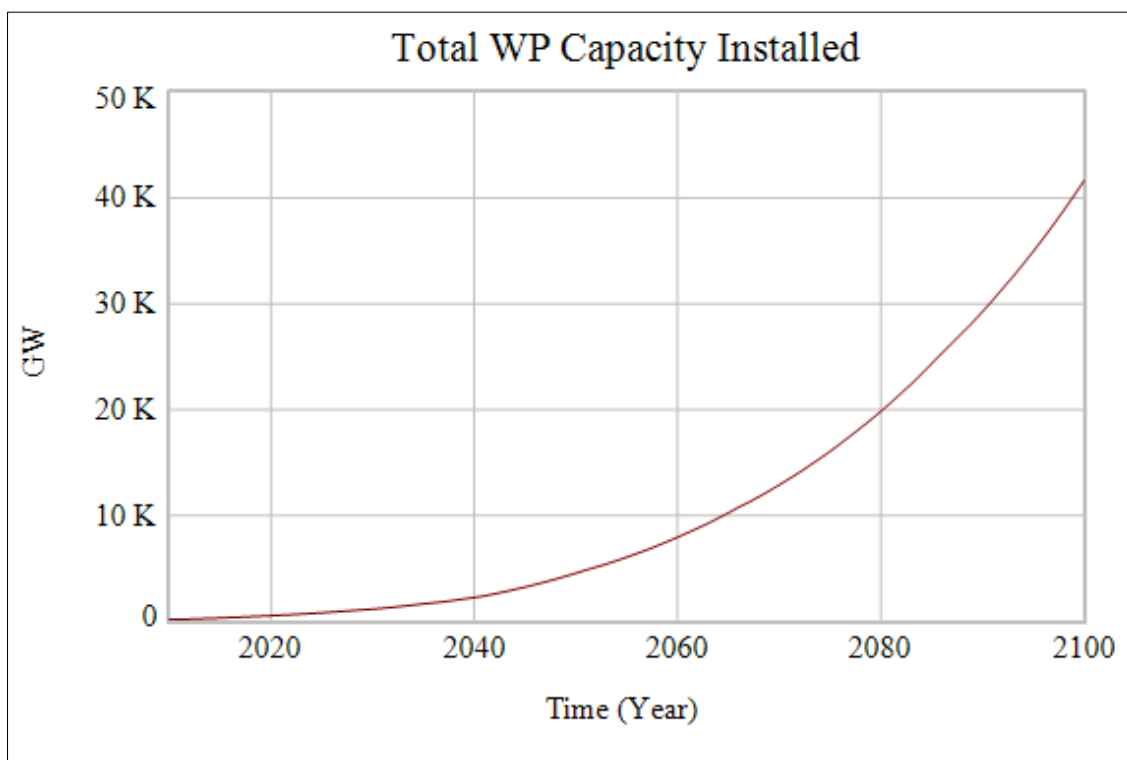


Figura 5.3. Resultado en Vensim. Capacidad eólica instalada a nivel mundial. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar la gran evolución de la capacidad eólica instalada que se sufre en 2040 es debido al aumento de la demanda de energía eléctrica que sufre una variación desde la década precedente del 43.89%, que se refleja en un 92.5% de la capacidad eólica instalada en el mismo período. Respecto a los valores alcanzados en 2100 de 41.630 GW instalados parece poco probable su desarrollo. Esta discusión ha sido objeto de diferentes estudios y autores que estiman el potencial de las energías renovables desde 2.7 TW hasta 16 TW como límites físicos de implementación, lo que supondría factible hasta el horizonte de 2075 en el más favorables de los casos, algunos estudios teniendo en cuenta restricciones que limitan la cantidad de energía a convertir en 1TW pese al potencial físico de hasta 40 TW (33) de la energía eólica.

En el término de las emisiones de CO₂ no emitidas por el uso de energías renovables, como indicador de eficiencia energética se prevee alcanzar las 10¹² Toneladas de CO₂ no emitidas por el uso de fuentes de energía convencionales en 2057:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
CO ₂ Non Emitted by Fossil Fuels [Ton]	1,25E+09	1,02E+10	2,93E+10	1,11E+11	2,85E+11	6,38E+11	1,26E+12	2,18E+12	3,47E+12	5,25E+12	7,61E+12

En término relativos en 2010 se emitieron a nivel mundial según los datos del World Bank 33505379000 Toneladas de CO₂ a la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles y producción de cemento, lo que supone la no emisión anual en 2010 del 3.75% de estas emisiones mundiales.

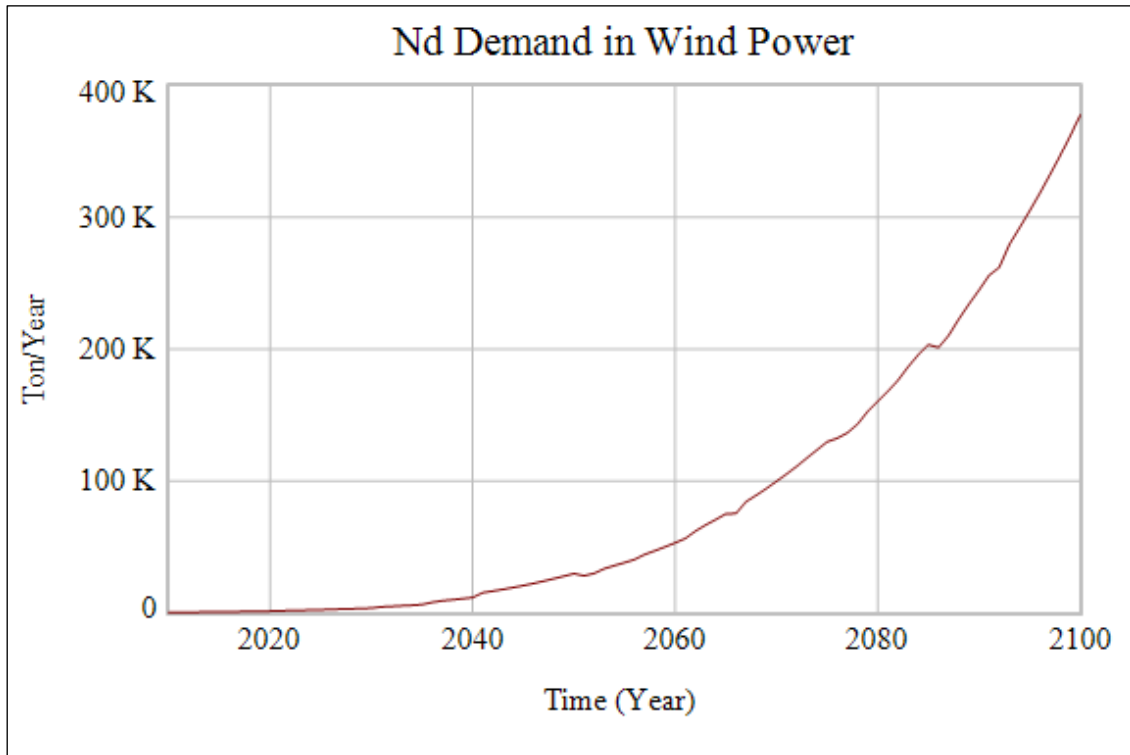


Figura 5.4. Resultado en Vensim. Demanda de Nd en energía eólica a nivel mundial. Fuente: elaboración propia.

5.2. Simulación del Neodimio

Uno de los principales objetivos de este TFM es como su propio nombre indica vislumbrar la disponibilidad de minerales críticos en la generación eólica, para con ello vislumbrar las limitaciones que podría sufrir la expansión de la energía eólica. Los principales indicadores en este sentido son en primer término el estado de la reserva de Neodimio y en segundo lugar el porcentaje de consumo de la misma.

Derivada de la demanda energía eléctrica y la cobertura que pretende suministrar la energía eólica con su capacidad, se traslada a la parte de recursos minerales el ratio de producción a extraer, proveniente de la demanda de Nd en energía eólica. Hay que destacar que la demanda en el modelo se satisface a través de dos flujos. Por un lado el flujo que se extrae a través de la reserva y por otro lado a través de la cantidad de material que se recicla anualmente y que cubre proporcionalmente esta demanda.

CAPÍTULO 5. Simulación y análisis de resultados

5.2.1. Demanda de Neodimio en Energía Eólica

En primer término si se analiza la demanda de Neodimio en energía eólica:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Nd in Wind Power [Ton/Year]	402,33215	996,1157	1570,18	3823,77	11837,95	30005,82	53412,28	99929,27	160540,7	245034,6	377697,6
Variación [%]		147,6	57,6	143,5	209,6	153,5	78,0	87,1	60,7	52,6	54,1

Se puede observar como el despegue desde 2010 a 2020 la demanda crece un 290.5% se precede de décadas de al menos el doble de demanda hasta 2050, fruto de cambio de modelo energético y la subida de la demanda eléctrica mundial procedente del aumento del GDP y de la electrificación del transporte, con lo que la sociedad con cada vez mayores GW de potencia eólica instalada requiere de mayores cantidades de Neodimio para las instalaciones.

Por otra parte del pequeño ratio de utilización del Nd en energía eólica correspondiente en 2010 a un 2.12% se alcanzará en 2030 el 11.22% para situarse en 2050 a un 29.64% de los usos totales del mineral:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Rate of WP in Nd Market [%]	2,128	4,423	6,011	11,22	16,741	29,638	41,617	58,04	68,106	1000,754	81,597

Éstos datos son ligeramente superiores a otras estimaciones donde se estima en 2050 el uso de Nd en energía eólica en un 14% de la producción mundial (54) con horizontes para ese período de tiempo por debajo de los 2500 GW de capacidad instalada, frente a los 4576 GW para el mismo período en este escenario. Lo que para la misma capacidad instalada prevista en este escenario se alcanza en 2042, equivaldría a un ratio del mercado de Nd del 17%, lo que sugiere valores similares para las mismas previsiones de expansión y que confirma la propia validez del modelo.

Este desplazamiento del ratio de uso de Neodimio en energía eólica se desarrollará en detrimento del espacio ocupado por otros sectores y que hoy en día concentran más actividad que la propia energía eólica (16).

5.2.2. Extracción de Neodimio

A su vez, la extracción anual de Nd para uso de generación energía eólica sigue la siguiente evolución:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Nd Extraction in WP [Ton/Year]	402,3	971,8	1502,6	3600,6	6732,9	16208,6	40191,9	67043,6	114166,3	179283,9	281352,3
Variación [%]		141,5	54,6	139,6	87,0	140,7	148,0	66,8	70,3	57,0	56,9

Como se observa la evolución actual de Toneladas totales a nivel mundial para aplicaciones de energía eólica sufre un aumento más pronunciado en el primer cuarto

del siglo, ligada por otra parte al uso de imanes permanentes con contenido de tierras raras, desde 2010 a 2050 se produce un aumento del 3932% de las extracciones.

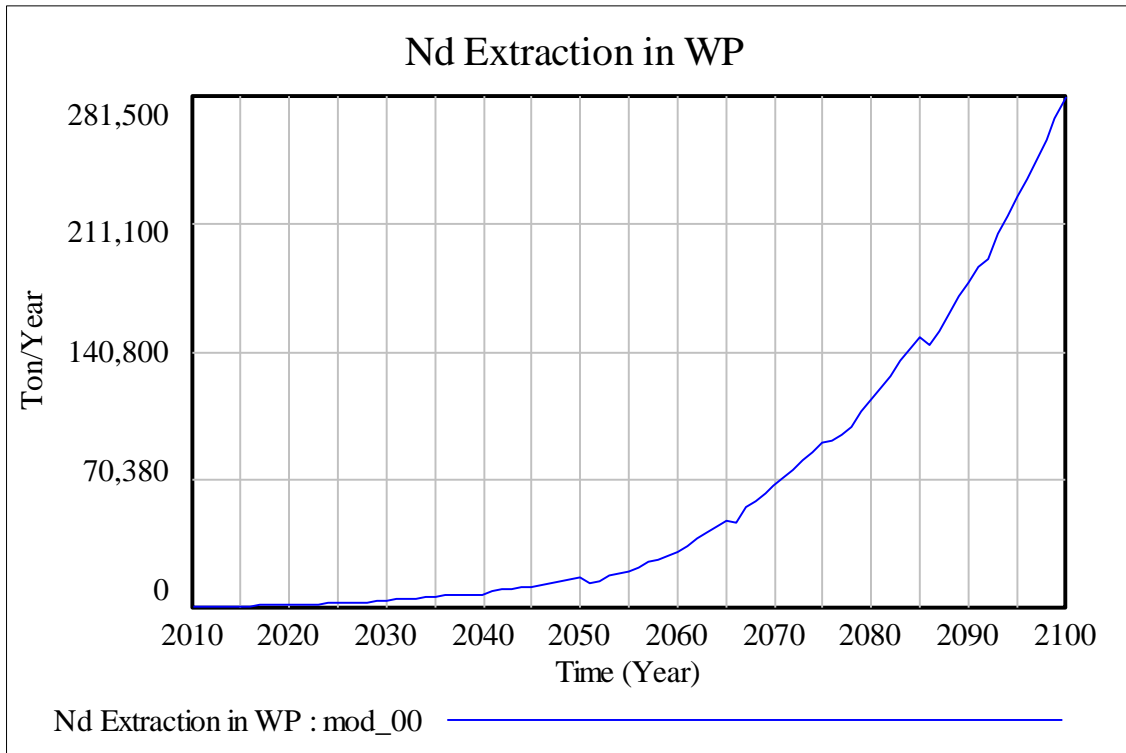


Figura 5.5. Resultado en Vensim. Extracción de la reserva de Nd para generación de energía eólica. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte como ya se ha introducido el Neodimio tiene múltiples aplicaciones, y aunque se ha centrado el objeto de estudio de este TFM es la disponibilidad de éste material en energía eólica, conviene prestar atención a toda la extracción mundial de la reserva, siguiendo la misma la siguiente evolución:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Nd Extraction in WP [Ton/Year]	402,3	971,8	1502,6	3600,6	6732,9	16208,6	40191,9	67043,6	114166,3	179283,9	281352,3
Total Extraction [Ton/Year]	18902,3	21969,26	24997,55	32090,61	40217,91	54688,58	74465,31	115513,5	167631,2	237743,8	344807,2

En la actualidad el principal productor de éstos elementos parte de las denominadas REE's es China la cuál concentra el 95% de la producción mundial con cerca de 129400 Toneladas. Éstos datos están muy próximos a las estimaciones anuales que proporciona la USGS con 18816.3 Toneladas de producción en 2010 y 23101.2 en 2015 (Minerales UVA).

Si tal como se ha tomado en este TFM la concentración en material de Neodimio es del 18.63% en Tonelada de REE esto supondría en 2050 tener una producción mundial de 293393 Toneladas anuales y en 2100 de hasta 1850815 Toneladas anuales, los aumentos de capacidad de explotación fuera de China para 2015 ascenderían hasta 170000 Toneladas, relegando a China hasta el 64% de la producción mundial (41). Si se tienen además los cerca de 20000 Toneladas de producción ilegal (55), existiría un problema

de limitación de producción en torno a las 350000 Toneladas anuales de REE de los cuales que se alcanzaría en torno a 2055 para lo que con los datos actuales de Total Extraction de Neodimio, o lo que es lo mismo surgirían serias dudas de poder desarrollar más de 6000 GW de capacidad eólica instalada.

5.2.3. Consumo de la reserva de Neodimio

El consumo de la reserva de Neodimio seguiría la siguiente evolución ante las sucesivas extracciones:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Consumption of the Reserve [%]	2,182	2,538	3,152	4,27	6,044	8,148	10,881	14,985	21,129	29,961	42,59

Como se puede observar no será hasta 2079 cuando se consuma el 20% de las reservas de Neodimio, por lo que parece concluyente que en ningún caso hasta 2100 va a producirse una situación de escasez del elemento Neodimio bajo las condiciones que representa este escenario.

Así mismo el estado de la reserva con las sucesivas extracciones ampliando sus horizontes a 2100 para analizar con la producción acumulada hasta esa fecha, nos permite observar cómo antes de 2105 se cruzan la demanda y la oferta de Nd:

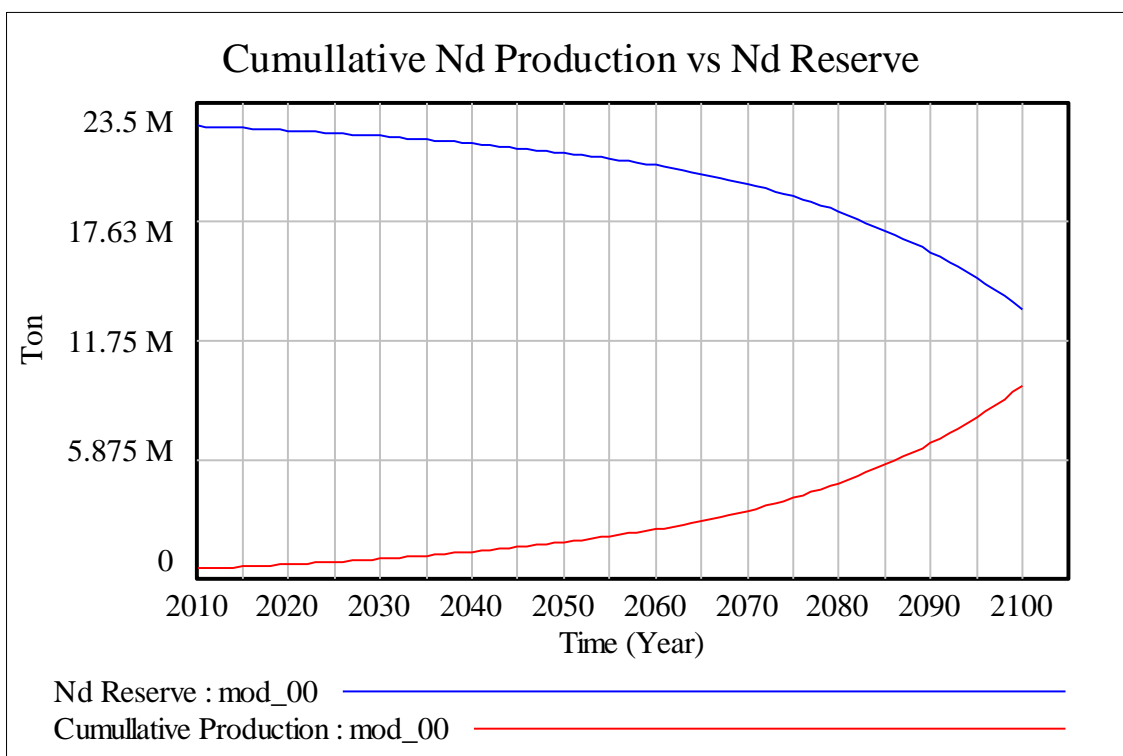


Figura 5.6. Resultado en Vensim. Evolución del estado de la reserva de Nd frente a la producción mundial de Nd. Fuente: elaboración propia.

5.2.4. Análisis energético de la extracción de Neodimio

Por otra parte el consumo acumulado de energía en la extracción de mineral de la reserva de Neodimio sigue la siguiente distribución:

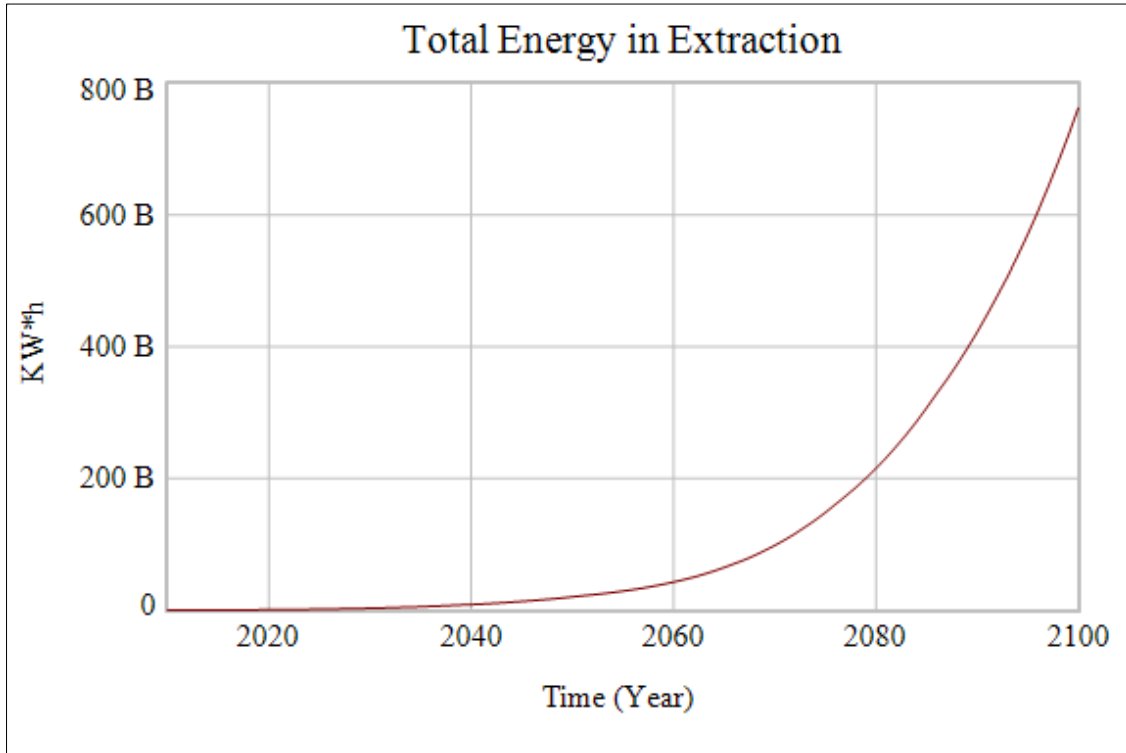


Figura 5.7. Resultado en Vensim. Energía mundial de extracción de Nd para generación de energía eólica. Fuente: elaboración propia.

Si se analizan las cantidades extraídas de la reserva con la energía empleada para ello entre los años 2010 y 2050 se obtiene que cuesta un 10.1% extraer la misma cantidad que en 2010 y en 2080 llega esta cifra al 45.8% de coste extra en la extracción:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Energy Extraction Input/Nd Extraction in WP [KW*h/Ton]	9,67E+04	9,67E+04	9,67E+04	9,67E+04	9,99E+04	1,06E+05	8,86E+04	1,28E+05	1,41E+05	1,57E+05	1,58E+05
Variación [%] desde 2010		0,0	0,0	0,0	3,3	10,1	21,8	32,0	45,8	62,6	63,3

Esto es debido al empeoramiento de la calidad del mineral definido por el ore grade, ya que según se va consumiendo la reserva del material más accesible y de mayor concentración en piedra base (bastnasita, xenotima ó monacita) la energía en la extracción se dispara, tal como se explicó en el capítulo anterior. Así este aumento en el consumo de energía de extracción de un 45.8 % coincide con el empeoramiento del ore grade en 2080, debido a este empeoramiento deriva en un aumento del requerimiento de energía de aproximadamente 1.45 veces respecto a 2010:

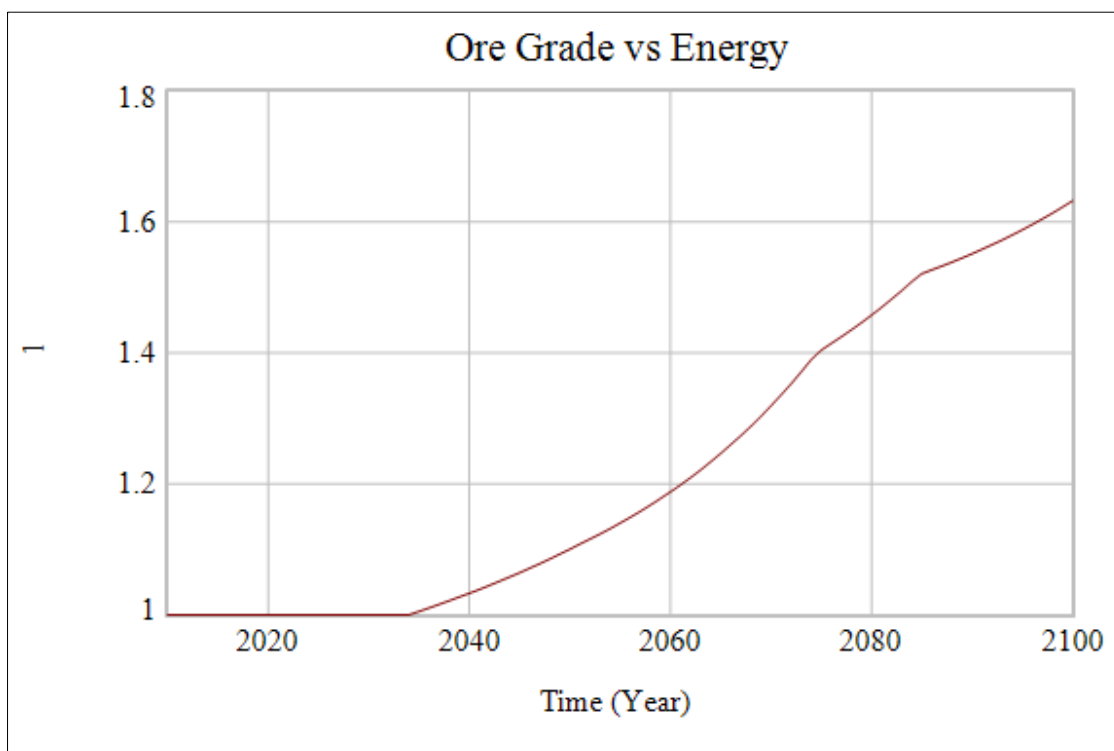


Figura 5.8. Resultado en Vensim. Evolución del sobrecoste de la energía de extracción debido a las variaciones en el ore grade Nd. Fuente: elaboración propia.

5.2.5. Reciclado de Neodimio

En cuanto al stock total de material Neodimio que se acumula tras el fin de vida de las instalaciones de generación eólica, sabemos que la variación del fin de vida de las instalaciones sigue un aumento progresivo desde los 25 años en 2010 hasta los 40 años en 2100 debido a la mejora de la tecnología, fiabilidad de equipos y reducción progresiva de operaciones de mantenimiento:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Life Cycle [Year]	25	25,625	26,25	27,5	28,75	30	32	34	36	38	40

Por otra parte la cantidad de material que es desechado anualmente pasa a un stock de material que ha llegado al final de su vida, del cual un porcentaje será posible de reciclar, este está compuesto por la entrada de material de desecho de la etapa de industrialización, una entrada por el desmantelamiento de aerogeneradores típicamente definida por la vida útil anterior y a su vez por una tercera entrada proveniente del material de desecho de las otras aplicaciones de Neodimio que no son para instalaciones eólicas. En términos absolutos en 2050 con las nuevas instalaciones que se han realizado desde 2010 se habrá generado:

CAPÍTULO 5. Simulación y análisis de resultados

Time (Year)	2020			2050			2100				
Nd Scrap [Ton]	1352,41748			275944,1875			1926906,125				
Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Recycling [Ton/Year]	0	24,35451	67,62087	223,1455	5105,015	13797,21	22421,92	32885,68	46374,41	65750,74	96345,3
Total Energy in Nd Extraction [KW*h]	3,01E+06			1,35E+09			2,91E+10				
CO2 Non-Emitted due to Recycling [Ton CO2]	17825,42			7,98E+06			1,72E+08				
Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Recycling [Ton/Year]	0	24,35451	67,62087	223,1455	5105,015	13797,21	22421,92	32885,68	46374,41	65750,74	96345,3

De los cuáles en 2040 se reciclarán cerca de 5105 Toneladas de Neodimio que se utilizaron en las instalaciones de nueva generación de 2010 para en 2100 llegar a los 96345.3 Toneladas anuales de flujo de reciclado, que no será necesario extraer de la reserva, y como ya se comentó esto supone cerca del 25% de las necesidades anuales de Neodimio. Los gastos energéticos en procesamiento de todo este flujo de reciclado es directamente proporcional a la cantidad reciclada tal como se puede observar en la tabla en KW*h.

Como se estudió en el desarrollo del modelo, si se toman como referencia los valores de la explotación de Bayan Obo de Tonelada de CO₂ emitida por Tonelada de material procesado en la planta para su explotación industrial, se salvan de su emisión cerca de 17830 Ton de CO₂ para llegar en 2050 hasta 7.98 millones de Toneladas de CO₂ y en 2100 el cúmulo se sitúa en 172 millones de Toneladas de CO₂ no emitidas en la extracción. Estas cantidades supondría no emitir a la atmósfera hasta 2050 cerca del 0.022% y el 0.48% hasta 2100 de las emisiones de CO₂ en el año 2015 (28).

Por otra parte la evolución de cuánta demanda de Nd en energía eólica proporciona el flujo de reciclado anual se puede observar cómo tras el fin de uso de los aerogeneradores con una vida útil de aproximadamente 25 años de vida útil, contribuirán a partir de 2035 de manera más significativa, llegando a su pico de contribución a partir de 2050 donde éste flujo dará cobertura hasta el 50% de la demanda de Neodimio en eólica. A medida que pasemos la mitad de siglo XXI este porcentaje irá estabilizándose debido al mayor volumen instalado a partir de 2050 y que tiene más vida útil:

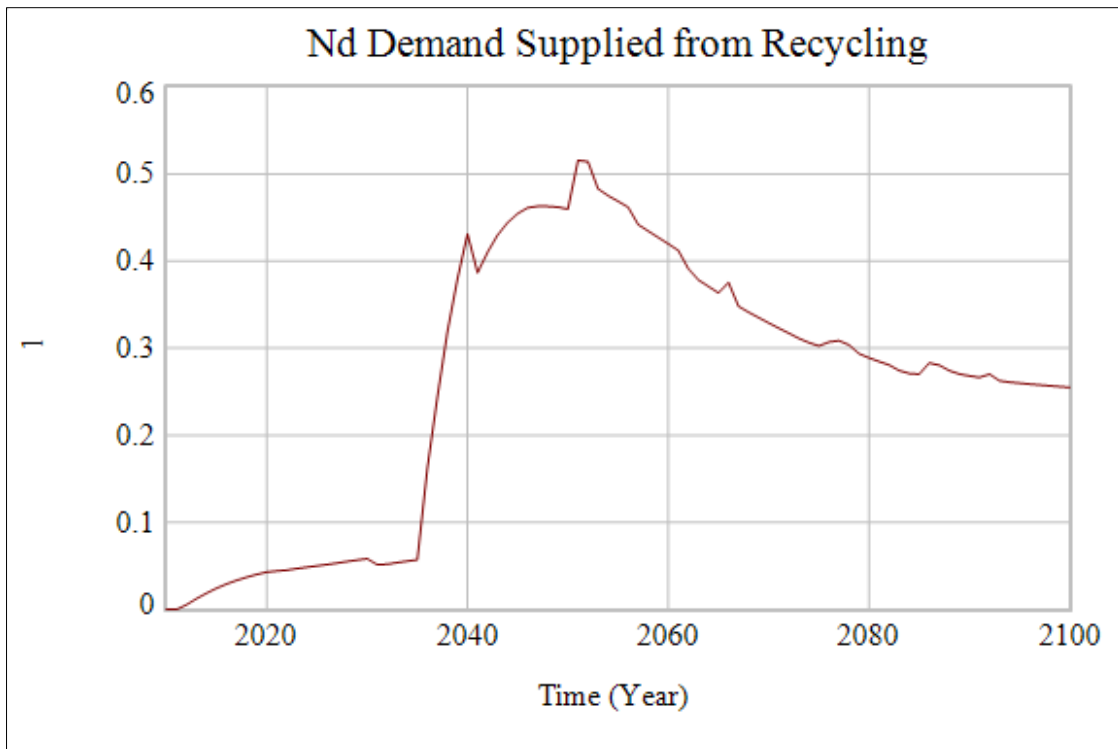


Figura 5.9. Resultado en Vensim. Demanda de Nd mundial cubierta por la tasa de reciclado. Fuente: elaboración propia.

5.2.6. Análisis de sensibilidad del modelo de Neodimio

Aunque parece razonable pensar que dadas las condiciones que se han ido explicando a lo largo del desarrollo del modelo de análisis de disponibilidad futura del Neodimio, algunas de sus variables y datos de entrada están basados en estimaciones con los datos de distintos organismos internacionales y estudios de autores independientes. Una de las variables de entrada y que más profundamente determinan los resultados del modelo es el Growth Rate, es decir, la tasa de crecimiento anual del GDP y que tal como se explicó en capítulos anteriores se ha supuesto un modelo de desarrollo BAU donde se mantiene hasta 2100 las previsiones de crecimiento del 2.7%, sin embargo si se revisan los datos existentes de puede comprobar como en el año 2000 la tasa de crecimiento fue del 1.96% y en el 2005 del 4.3. Dado que del crecimiento del GDP mundial se deriva la demanda de energía primaria, demanda de energía eléctrica y en consecuencia los GW de capacidad eólica instada, se va a realizar un test de sensibilidad a las principales variables e indicadores del modelo para ver su respuesta a una incertidumbre en el valor del Growth Rate entre 2% y el 3%.

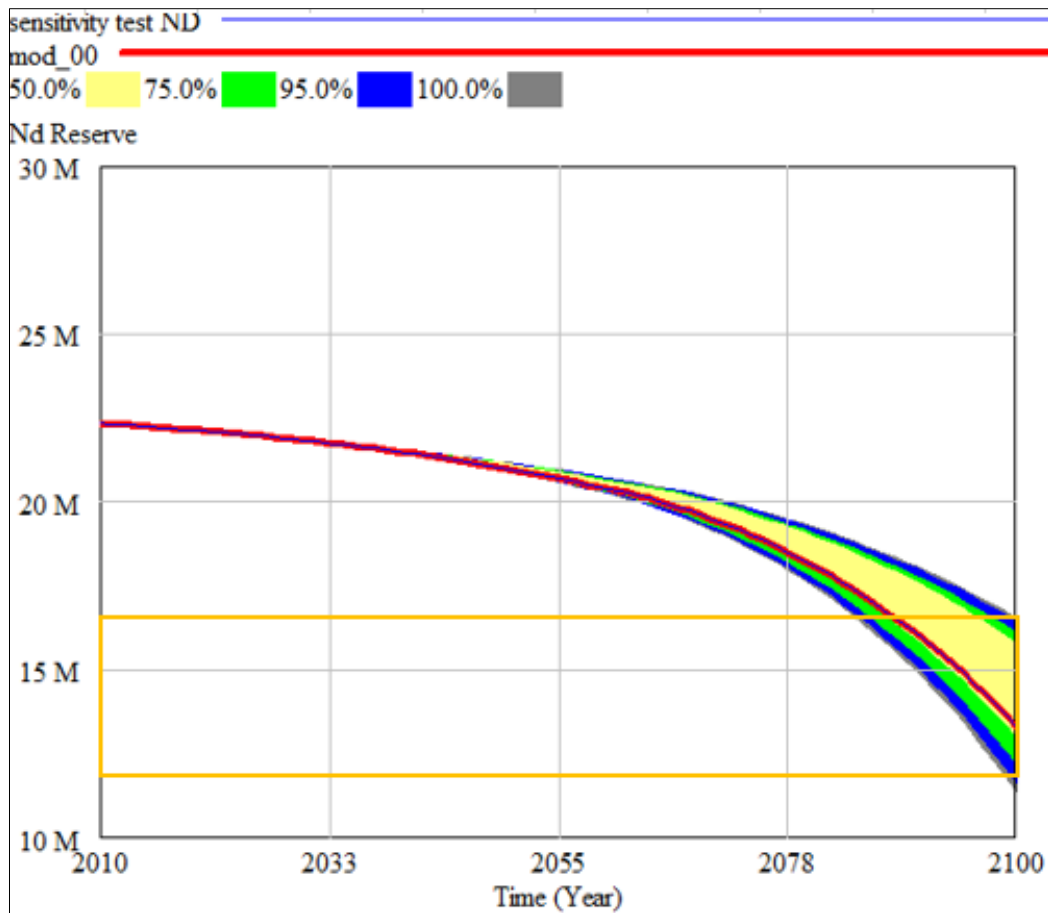


Figura 5.10. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación de la reserva para la incertidumbre del GDP [2% , 3%]. Fuente: elaboración propia.

Para el estado de la reserva de Nd, se puede afirmar con una seguridad del 95% que el estado de la misma al finalizar la simulación en 2100 estará contenida entre 11.67 y 16.67 millones de Toneladas, respecto al estado del modelo inicial de 13.32 millones de toneladas remanentes en 2100, el margen de incertidumbre es moderado.

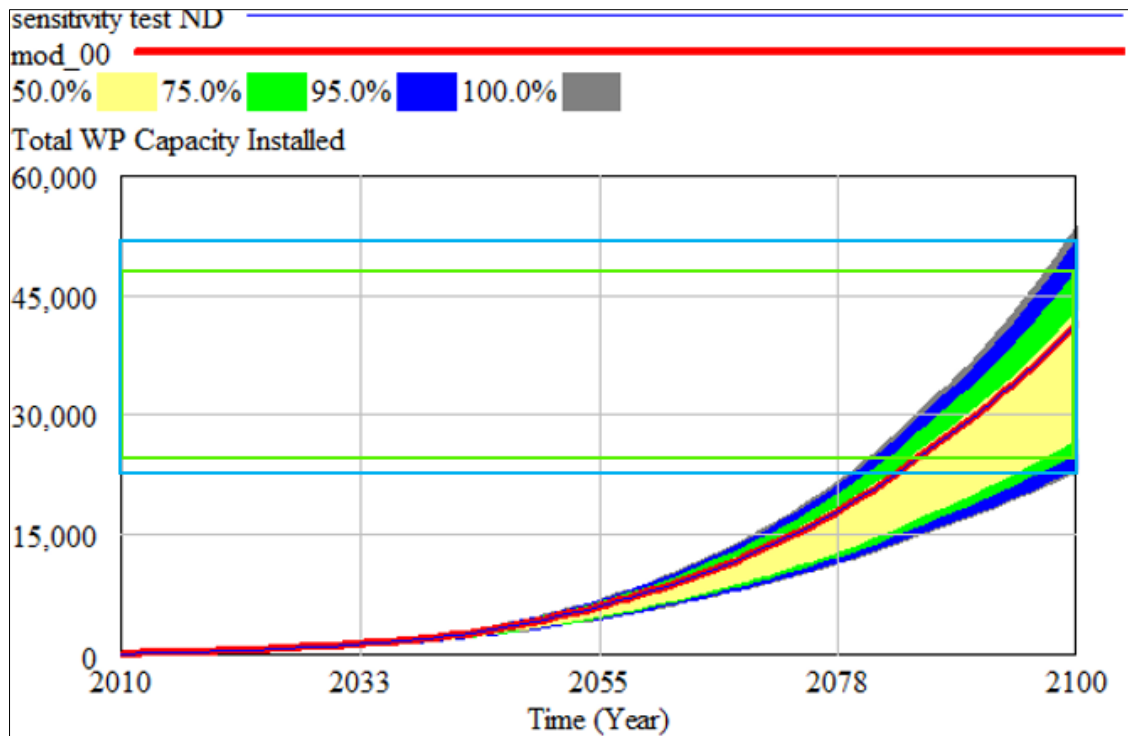


Figura 5.11. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación de la capacidad eólica instalada en GW para la incertidumbre del GDP [2% , 3%]. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar la sensibilidad de la potencia eólica instalada a nivel mundial sufre una gran variabilidad respecto a la incertidumbre del GDP. Se puede afirmar como los limites se sitúan en torno a 52500 y 22500 GW de potencia eólica instalada a nivel mundial con un 95% de la probabilidad y entre 48750 GW y 25000 GW con el 75% de confianza, frente a los 41.630 del modelo inicial con un crecimiento del GDP del 2.7%, se puede por tanto afirmar la estrecha relación de estas variables y su elevada sensibilidad.

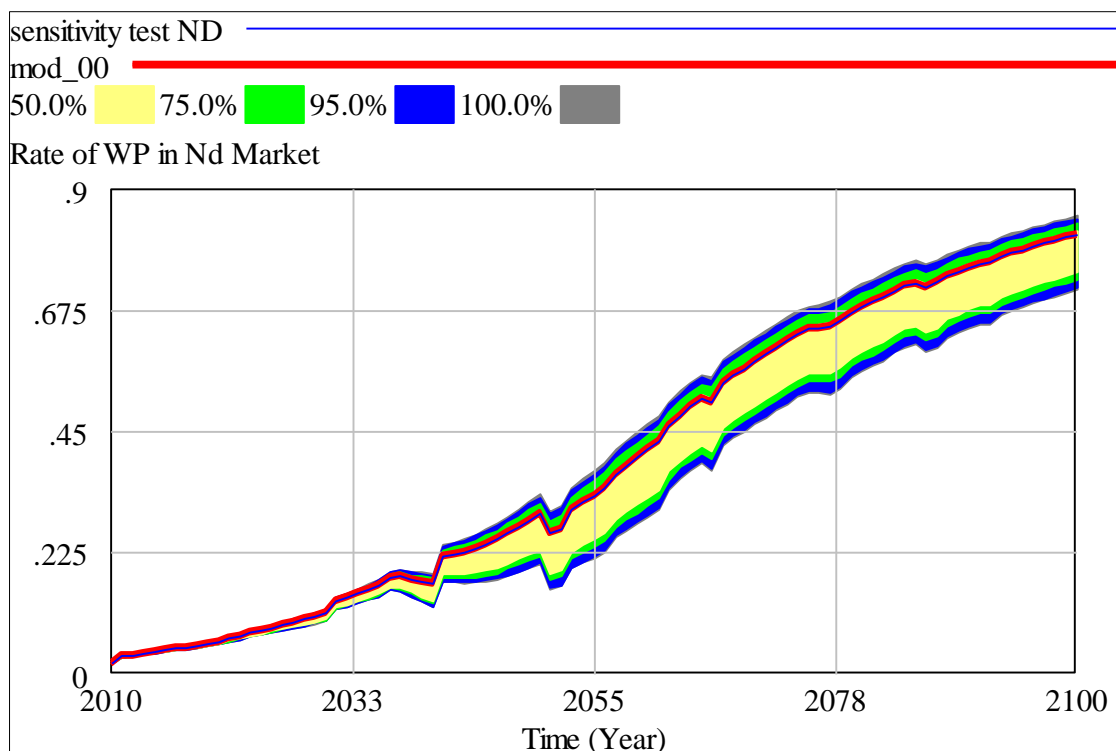


Figura 5.12. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación del ratio de la energía eólica en el mercado de Nd para la incertidumbre del GDP [2% , 3%]. Fuente: elaboración propia.

Del test de sensibilidad al ratio que supone el uso de Nd en energía eólica varía aproximadamente para los límites de variación del crecimiento del GDP en torno a 70 y 87.5 % de mercado, se confirma así la fuerte dependencia en el futuro del Neodimio en energía eólica.

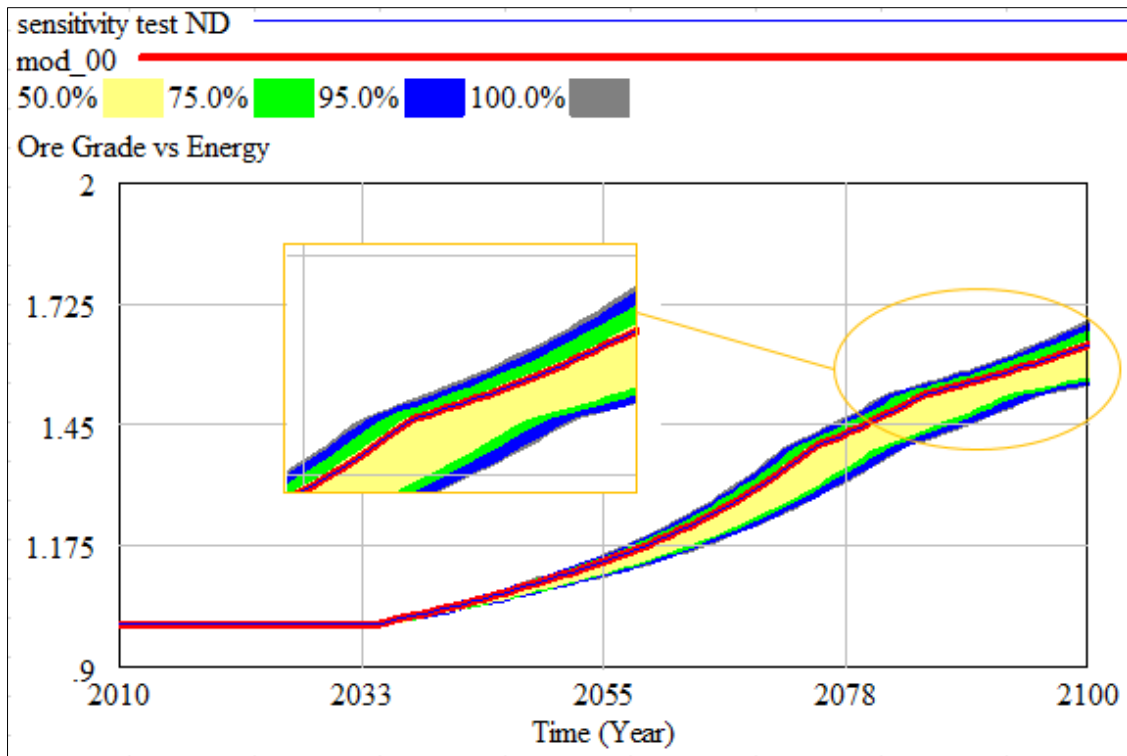


Figura 5.13. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación del sobrecoste de la energía de extracción para la incertidumbre del GDP [2% , 3%]. Fuente: elaboración propia.

Como se observa para el estudio de sensibilidad de la degradación del ore grade y el sobre coste de la energía de extracción definida por la variable Ore Grade vs Energy, se puede afirmar que para la variación en la estimación del crecimiento del GDP con un 95% de la probabilidad, en 2100 el sobrecoste por tonelada extraído será entre 1.68 y 1.5 veces superior a 2010. Este análisis nos permiten concretar bastante los sobre costes que tendrán que hacer frente las empresas dedicadas a la minería de REE para plantear su política estratégica.

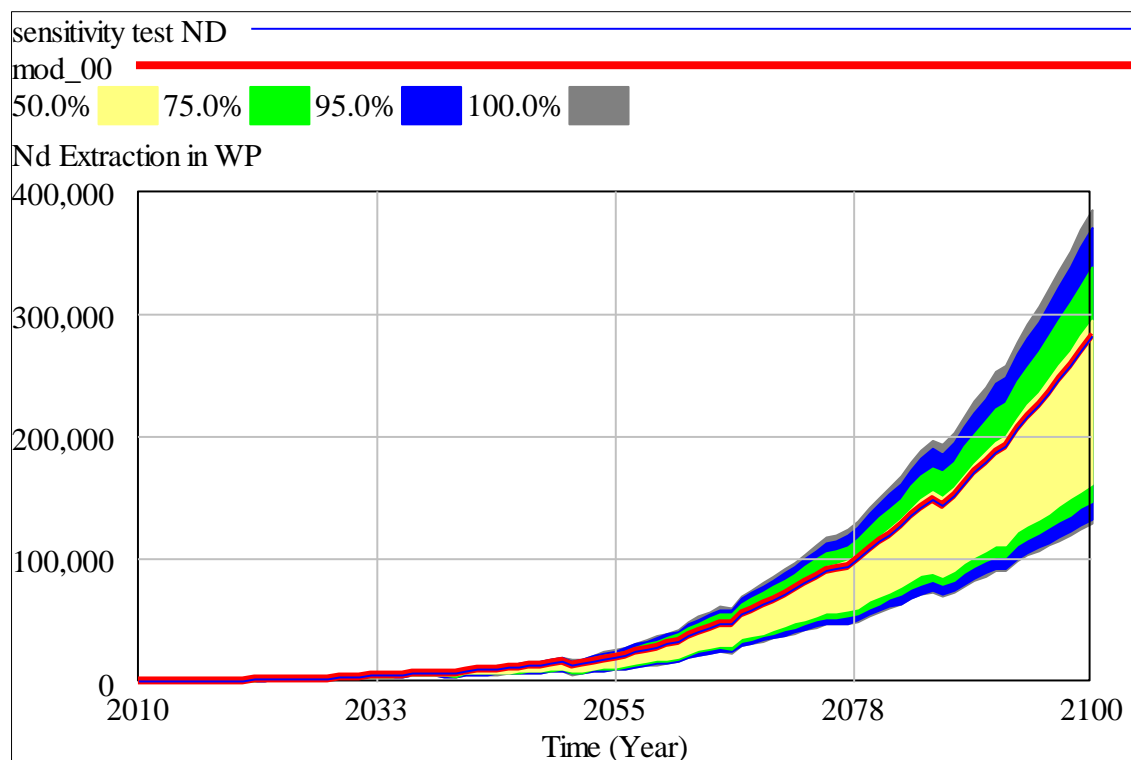


Figura 5.14. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación de la extracción de Nd para generación de energía eólica para la incertidumbre del GDP [2% , 3%]. Fuente: elaboración propia.

Por último, el ratio de producción de Nd en energía eólica definida por Nd Extraction in WP tiene una gran sensibilidad respecto a la variabilidad del GDP, como era de esperar debido a su conexión directa a los GW instalados, pudiendo situarse sus valores en 2100 entre 125000 y 340000 Toneladas extraídas de la reserva con un 75% de probabilidad, frente a las 281400 Toneladas. Si pretende acotar este intervalo de estimación pero con una seguridad del 50% aproximadamente la extracción de Nd para uso en energía eólica se sitúa entre 150000 y 300000 Toneladas en 2100.

5.3. Simulación del Disprosio

Al igual que se realizó para el estudio de la extracción de del Neodimio se va a realizar lo mismo lo mismo con para el otro elemento en discusión en este estudio que es el Disprosio. Como ya se ha introducido las demandas energéticas y de capacidad eólica instalada son iguales en ambos modelos, la diferencia está en la cantidad de elemento Disprosio que se requiere por KW instalado de energía eólica, a través de este dato y con la entrada anual de nuevas instalaciones que son necesarias anualmente para cubrir la demanda de la energía eléctrica que tiene como objetivo la expansión de la energía eólica, se determina el ratio de producción a extraer anualmente de la reserva junto con los otros usos que tiene el Disprosio y que son de menor proporción que en el Neodimio.

5.3.1. Demanda de Disproisio

Primeramente se analiza el requerimiento a lo largo del tiempo de Disproisio en energía eólica, proveniente directamente de las necesidades anuales a suplir con nuevas instalaciones Onshore y Offshore:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Dy Demand in Wind Power [Ton/Year]	21,17538	53,41771	84,24109	205,2301	635,3192	1610,828	2827,996	5289,853	8071,134	13102,61	20362,42
Dy Demand Supplied from Recyling	0	0,04557	0,07238	0,08833	0,21569	0,21673	0,21514	0,20918	0,2322	0,2346	0,24926

Se puede observar como desde las 21.17 Toneladas de demanda de Disproisio en 2010 se pasan en 2050 a 1610.828 Toneladas y en 2100 llegar a 20362.42 Toneladas, de las cuales cerca del 21.7% y 24.926% pueden ser suministradas por el flujo anual reciclado, en este caso recuperando el 10% del material de desecho (45).

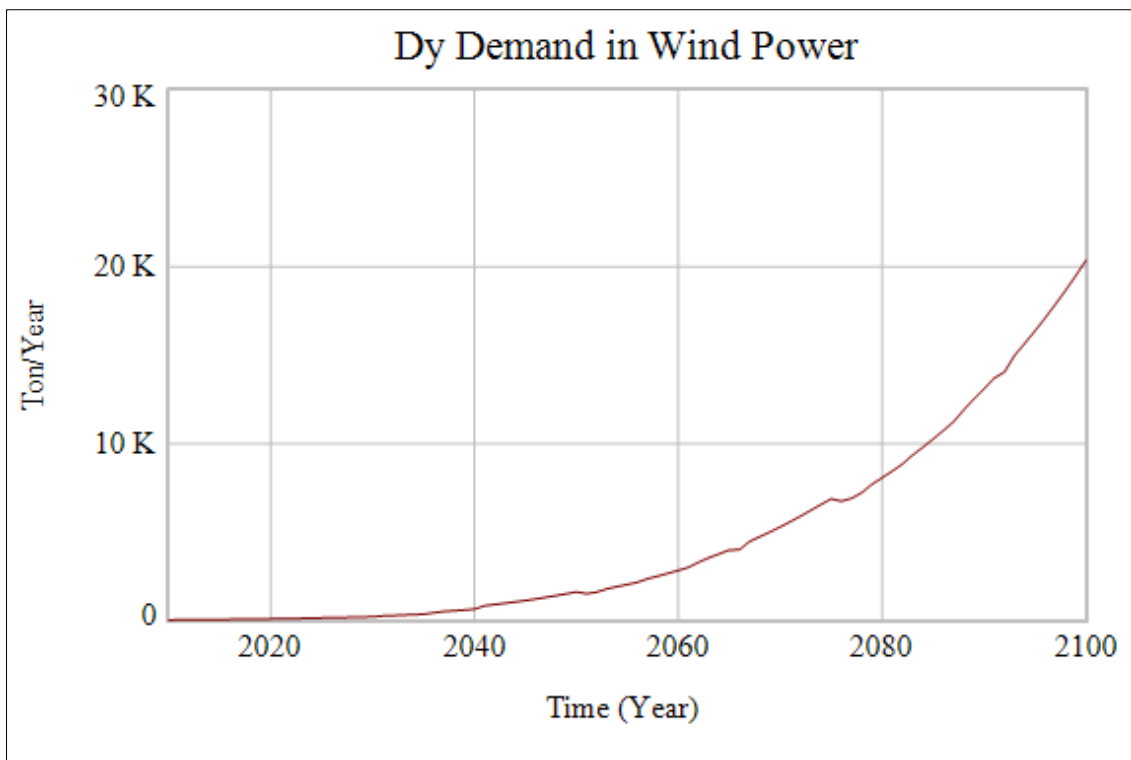


Figura 5.15. Resultado en Vensim. Demanda de Dy mundial para generación de energía eólica Fuente: elaboración propia.

5.3.2. Extracción de Disproso

Por otra parte la extracción anual de Dy para uso de generación eólica junto con los otros usos se resume en el siguiente extracto del modelo:

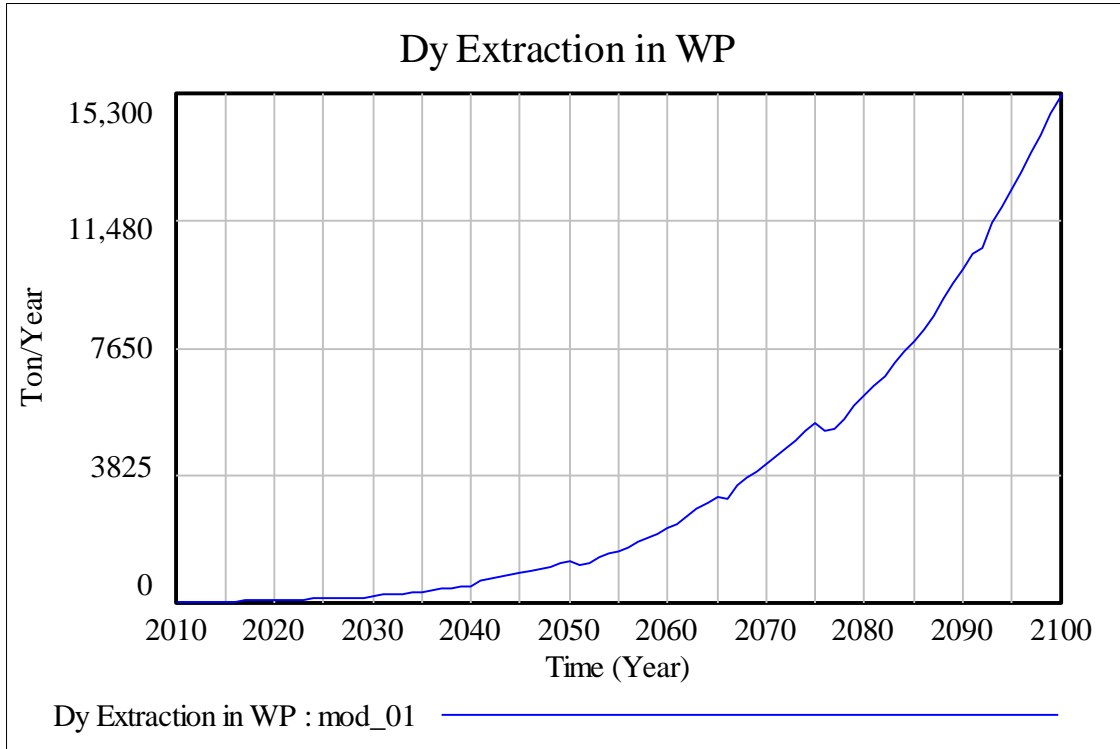


Figura 5.16. Resultado en Vensim. Extracción mundial de Dy para generación de energía eólica. Fuente: elaboración propia.

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Dy Extraction in WP [Ton/Year]	21,17538	50,98367	78,14368	187,1016	498,2875	1261,72	2219,578	4183,322	6197,021	10028,73	15286,79
Variación [%]		140,8	53,3	139,4	166,3	153,2	75,9	88,5	48,1	61,8	52,4
Other Extraction [Ton/Year]	180	204,3	228,5999	277,1998	325,7997	374,3997	422,9995	471,5995	520,1994	568,7993	617,3992
Total Extraction [Ton/Year]	201,17538	255,2836	306,7436	464,3014	824,0873	1636,119	2642,578	4654,921	6717,22	10597,53	15904,19
Rate of WP in Dy Market [%]	10,526	19,971	27,306	40,297	60,465	77,117	83,993	89,869	92,256	94,633	96,118

Por una parte la extracción de Disproso para generación de energía eólica sufre una fuerte subida hasta 2050 con una media de 128% de subida y una demanda acumulada desde 2010 a 2050 de 5858% superior, siendo aproximadamente 1.7 veces superior al crecimiento que sufre el Neodimio en el mismo período de tiempo, esto es fruto de la mayor exposición que tiene el Disproso en % de uso de energía eólica como se puede comprobar en el Rate of WP in Dy Market, que representa el porcentaje de uso en energía eólica que tiene el Disproso y que en 2050 será superior al 75%, para en 2070 ocupar el 90% de usos del mercado del mismo, en detrimento de los otros usos que actualmente son conocidos . Los valores de la extracción total representan con gran

CAPÍTULO 5. Simulación y análisis de resultados

similitud los datos de producción mundial de Dy en el año 2010 y 2015, con 202 y 248 Toneladas de Dy respectivamente.

Si se tiene en cuenta que el contenido en Tonelada de REE producida en Dy es del 0.2% para el año 2050 supondría mantener una producción de mundial de Tierras Raras de 818059 Toneladas y de 7952093 Toneladas en 2100, es decir si tenemos en cuenta las estimaciones que se hicieron con la capacidad de producción mundial en el Neodimio, el tope de 350000 Toneladas de REE's permitiría cubrir las necesidades de Dy por debajo de 2040 poniendo en riesgo el desarrollo de 2275 GW de capacidad eólica instalada, o lo que es lo mismo un 11.7% de demanda eléctrica mundial suministrada por energía eólica.

5.3.3. Consumo de la Reserva

Otro de los principales indicadores a tener en cuenta para dar a una de las principales preguntas de este TFM es el estado de la reserva, es decir la velocidad en la que se vacía la misma según la demanda que disponemos de Dy anualmente. Este horizonte de disponibilidad de Disprosio se puede observar analizando el consumo de la reserva:

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Consumption of the Reserve [%]	2,182	2,654	3,227	4,788	7,418	12,46	20,608	35,21	58,305	92,927	100

Se puede observar como entre 2090 y 2100 se agota en la simulación el elemento Dy, debido principalmente a la creciente demanda energética mundial, a los horizontes del 30% de energía eólica en 2100 y lo que le caracteriza su alta dependencia del uso en aerogeneradores que desde 2050 acumula un 75% de sus usos.

Si analizamos la producción acumulada de Disprosio con el estado de la reserva, se pueden corroborar estas informaciones:

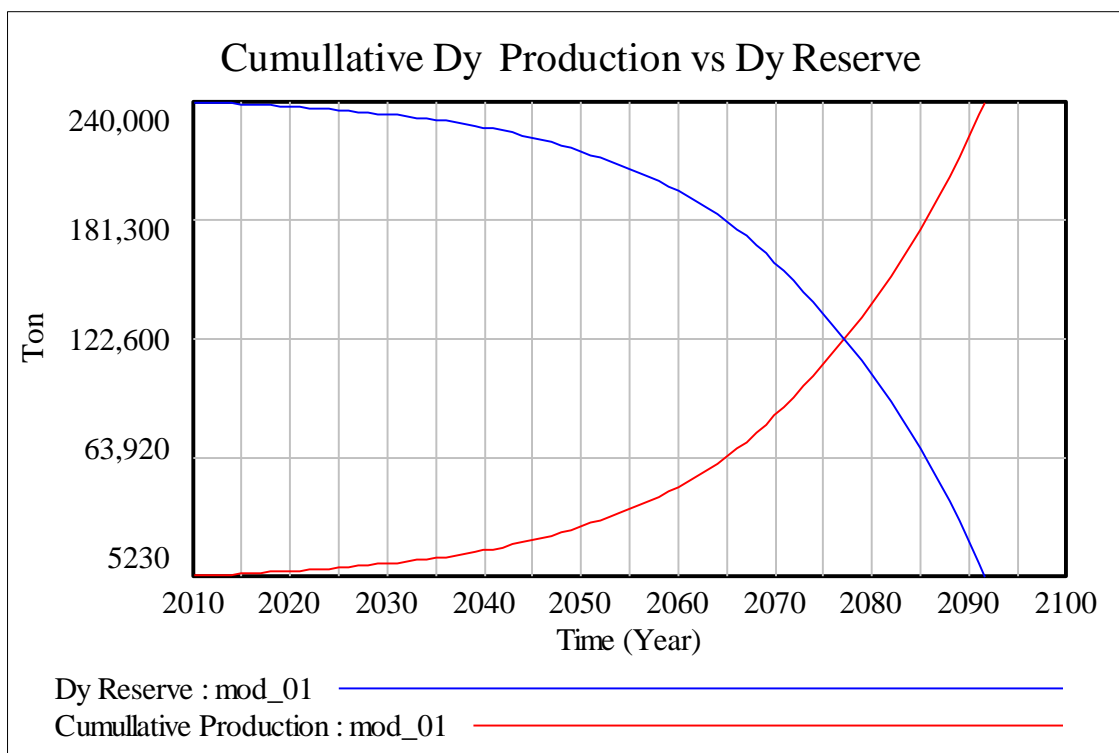


Figura 5.17. Resultado en Vensim. Evolución del estado de la reserva de Dy frente a la producción mundial de Dy. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar como la demanda y la oferta mundial de Disproso se encuentra en torno al 2077, donde rápidamente la demanda supera a la reserva existente para agotarse esta definitivamente en 2092.

5.3.4. Análisis de sensibilidad del modelo de Disproso

Si recapitulamos las condiciones de este escenario eran a parte de una previsión de demanda energética BAU es decir de crecimiento a lo largo del siglo según el Growth Rate actual y de una expansión de la energía eólica hasta del 30% en 2100, fundamentalmente en la parte de recursos minerales se había supuesto las condiciones más desfavorables con una tasa de transformación de recursos a reservas del 0%, sin nuevos descubrimiento de yacimientos y con una tasa de reciclado constante del 10% para el Dysproso. En este sentido vamos a analizar qué ocurriría en la reserva con la modificación en alguna de estas variables como son la tasa de reciclado, la tasa de transformación de recursos en reserva y la el crecimiento del GDP.

Vamos a comprobar que sucede si se aumenta a lo largo del tiempo la tasa de reciclado del Disproso desde el 10% actual hasta un 40% y un 75%, para comprobar su evolución en el tiempo respecto a la cantidad de material reciclado:

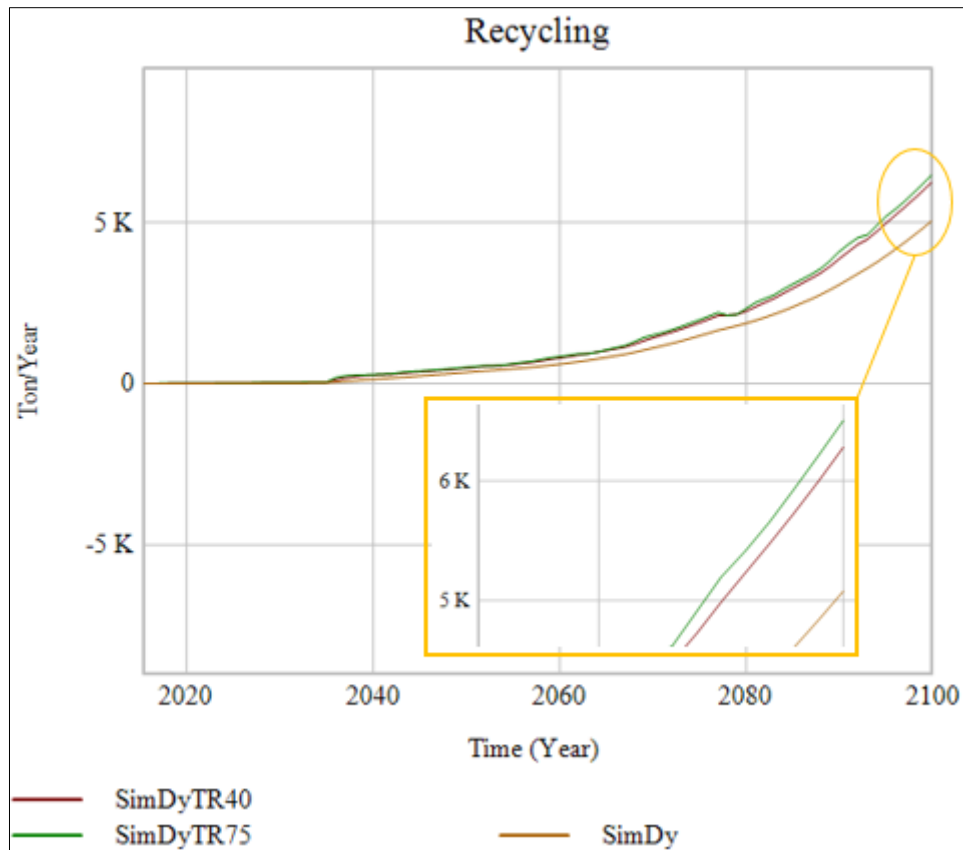


Figura 5.18. Resultado test sensibilidad en Vensim. Evolución del flujo de Dy reciclado para Tasa de Reciclado: [10% , 40% , 75%] . Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la imagen, se pueden distinguir 3 zonas en el tiempo de simulación, por un lado el período hasta 2040 donde las diferencias son mínimas de flujo reciclado debido al bajo stock de GW de energía eólica instalados hasta el momento, a partir de 2040 debido al crecimiento del porcentaje de energía eólica hasta 2080 las diferencias en flujo reciclado anual son más evidentes, para finalmente en 2100 llegarse a reciclar hasta cerca de 1200 y 1500 Toneladas al año más que respecto a la tasa de reciclado de 2010. Con esta diferencia se podrían suplir las necesidades de Dy en energía eólica desde 2010 hasta 2025.

A continuación se va a analizar la sensibilidad de la reserva de Dy concretamente del consumo de la reserva ante las variaciones en las estimaciones de la tasa de reciclado, que representa la variable que más estrechamente se ven afectadas.

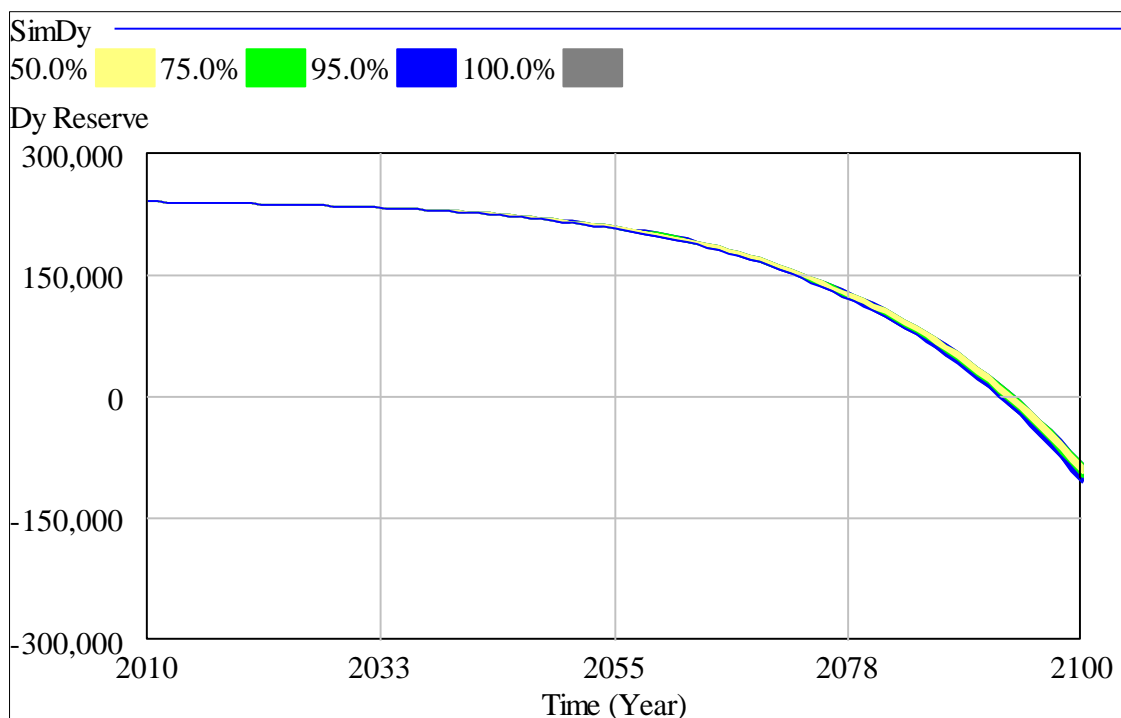


Figura 5.19. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación de la reserva de Dy para la incertidumbre de la tasa de reciclado [10% , 40%].

Como se puede observar en la imagen la influencia de la tasa de reciclado no permite observar un intervalo de confianza que permita alargar la vida de la misma de forma clara, este es debido al elevado volumen de instalaciones que se requieren en el modelo a partir de 2075. Hay que tener en cuenta que desde 2070 a 2080 hay que realizar la misma instalación de aproximadamente el equivalente a todo lo instalado hasta 2060 y esto en el espacio temporal del modelo no se ve reflejado.

Otra prueba de sensibilidad es suponer una tasa de transformación de recursos a reserva del 5% anual. En otras palabras, desde 2010 se va conseguir por mejora tecnológica y de las técnicas extractivas transformar en mineral económicamente explotable por valor del 5% anual de los recursos estimados mundiales.

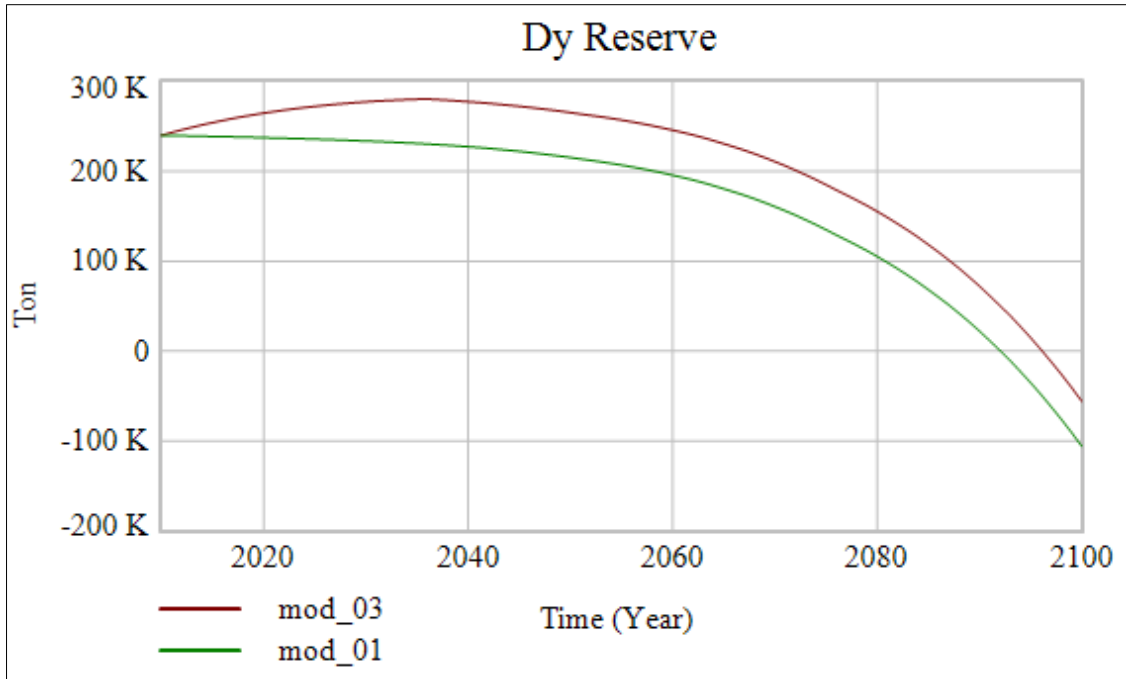


Figura 5.20. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación de la reserva de Dy para tasa de transformación de recursos en reserva [0% , 5%].

Como se puede observar con una conversión de los recursos a reservas del 5%, se consigue alargar aproximadamente 5 años la vida de la reserva hasta 2096.

Además se va a comprobar la sensibilidad de la variable Transformation Rate ($R \rightarrow R$), que representa el porcentaje de recursos que a través de la tecnología disponible y económicamente viable pasan anualmente a engrosar la reservar:

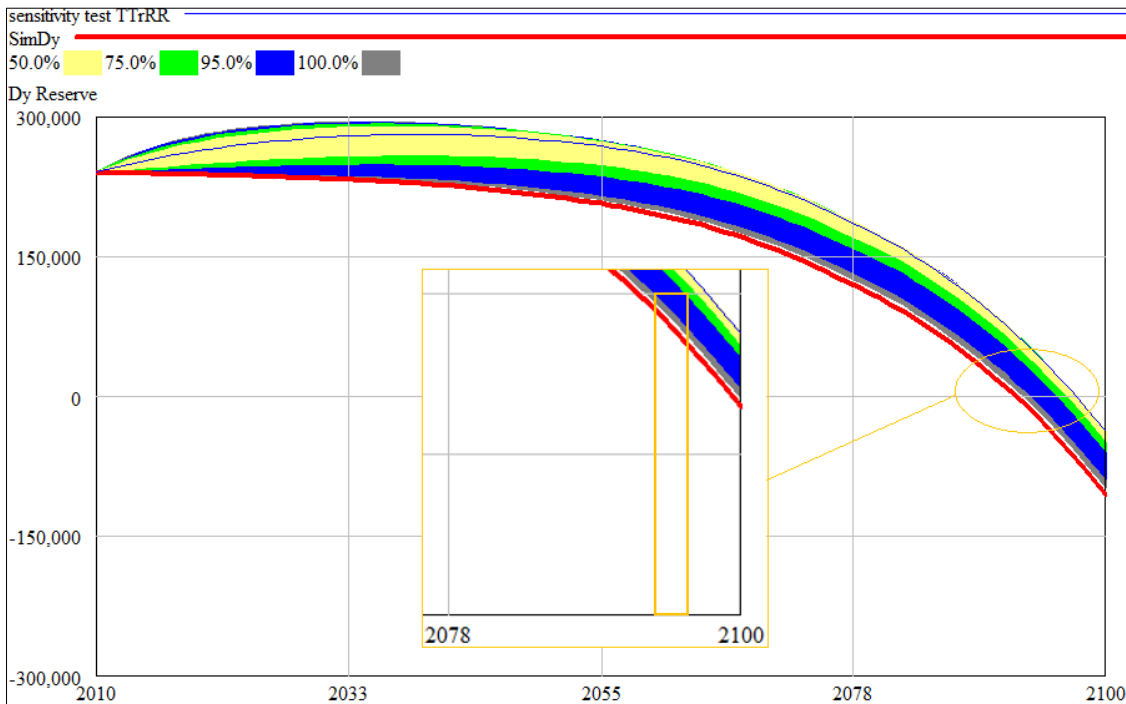


Figura 5.21. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación de la reserva de Dy para la incertidumbre de la tasa de transformación de recursos en reserva [0% , 1%].

CAPÍTULO 5. Simulación y análisis de resultados

Como se puede observar en el test de sensibilidad realizado a la reserva de Dy respecto a la variación del valor de la tasa de transformación de recursos a reservas con un intervalo de valor nominal entre 0 a 1%, se puede asegurar que con una confianza del 95% la vida de la reserva se alarga en 2.75 años y con un 75% de confianza en 3.14 años.

Si se analiza detenidamente los valores que se obtuvieron para la evolución de la reserva de Dy, podemos calcular el material que nos falta para suplir las necesidades de la demanda de Dy hasta 2100, efectivamente solo se podría alargar la vida de todos los recursos disponibles a nivel mundial de Dy hasta 2096:

Time (Year)	2010	2090	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
Dy Reserve [Ton]	240000,0	22211,46	11613,93	574,0068	-10635,4	-22633,3	-35130	-48138,4	-61678,9	-75772,6	-90440,9	-105716,6
Dy Resource	68000,0	68000,0	68000,0	68000,0	57364,6	34731,3	-398,6	0	0	0	0	0

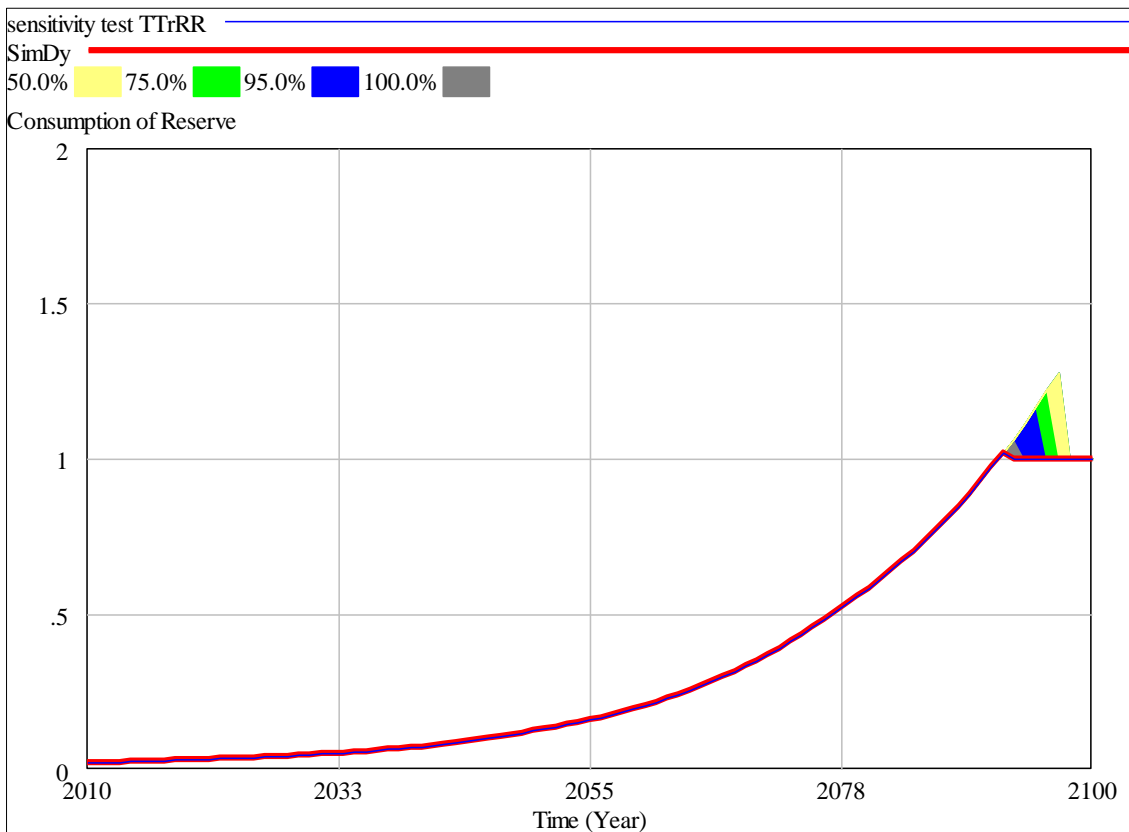


Figura 5.22. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación del estado de consumo de la reserva de Dy para la incertidumbre de la tasa de transformación de recursos en reserva [0% , 1%]

Si tenemos en cuenta los recursos de la reserva base, efectivamente para las anteriores tasas de transformación podríamos alargar hasta 2096 la vida de la misma con hasta un 75% de confianza.

Por último al igual que se ha realizado para el Neodimio, la variabilidad en la evolución de la tasa de crecimiento del GDP, Growth Rate, permitiría hacer distintas estimaciones de la disponibilidad de la reserva de Dysprosio, como se puede observar en la captura siguiente del modelo, con un 75% de probabilidad para la estimación de Growth Rate del 2% la reserva no se consumiría por completo hasta después de 2100, para las estimación del 3% de crecimiento de la economía mundial al 75% de seguridad esta se consumiría en torno a 2090, ligeramente por debajo de la estimación del modelo original al 2.7% de crecimiento.

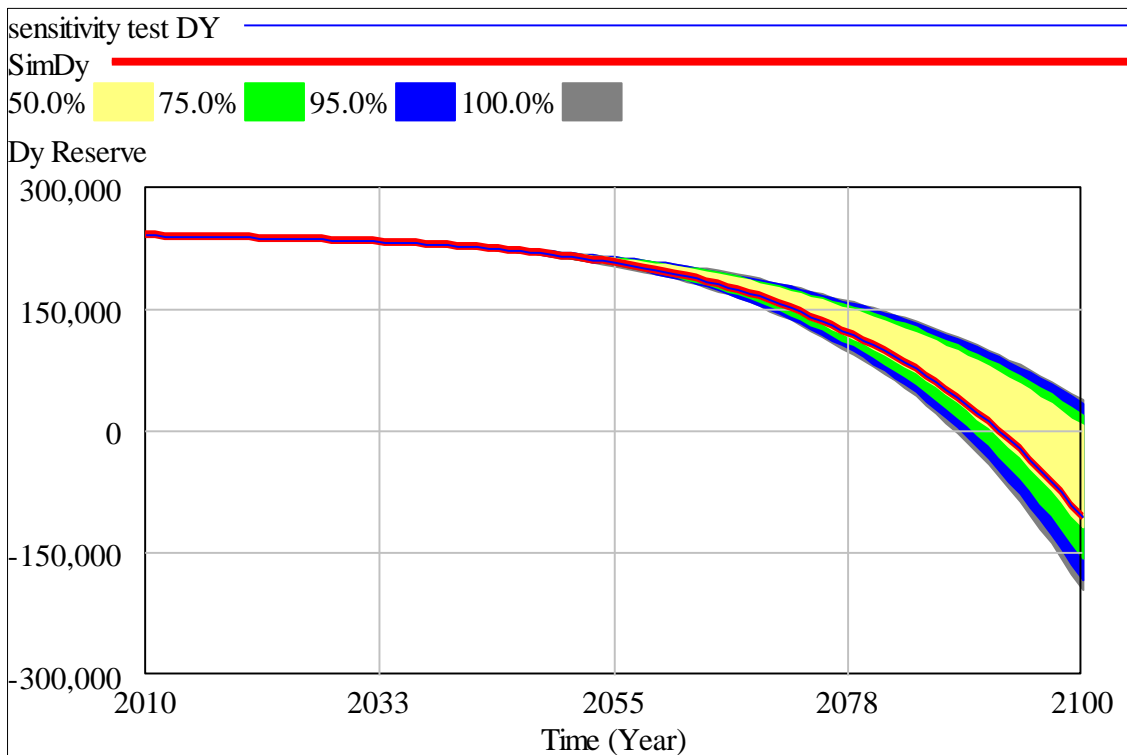


Figura 5.23. Resultado test sensibilidad en Vensim. Estimación del estado de la reserva de Dy para la incertidumbre del GDP [2% , 3%]

Es decir, para el más conservador de las estimaciones de crecimiento mundial del GDP, la reserva de Dysprosio podría contar a finales de 2100 con hasta 44115 Toneladas con una confianza del 95%.

5.3.6. Análisis energético de la extracción de Disprosio

En cuanto al consumo de energía derivado de la extracción del mineral por suplir las necesidades de Disprosio en energía eólica, podemos observar como para el año 2020 ya se habrán consumido 50.06 millones de KW*h en 2050 se alcanzan los 1600 millones de KW*h para situarnos en un consumo total hasta 2100 de $5.27 \cdot 10^{10}$ KW*h.

CAPÍTULO 5. Simulación y análisis de resultados

Time (Year)	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Total Energy in Extraction [KW*h]	-	1,90E+07	5,06E+07	1,83E+08	5,54E+08	1,60E+09	3,70E+09	8,22E+09	1,63E+10	3,00E+10	5,27E+10
Energy Extraction Input/Dy Extraction in WP [KW*h/Ton]	102066,1022	103234,8	104652	108516,6	115022,8	127501,9	141498,4	153249,7	167538,1	183412,2	185600,1
Variación respecto 2010[%]		1,1	1,4	6,3	12,7	24,9	38,6	50,1	64,1	79,7	81,8

En cuanto al gasto anual dividido entre la cantidad extraída, se puede observar como en el año 2050 el consumo por Tonelada extraída es un 25% más elevado que en 2010 para finalmente en 2100 ser la tonelada extraída un 80% más costosa energéticamente que en 2010, éste sería buen momento para tomar decisiones estratégicas debido al inminente fin de la reserva.

El motivo fundamental detrás de este sobrecoste a lo largo del consumo de la reserva es el ore grade, podemos ver como el descenso de este supone un encarecimiento energético del mineral extraído en los mismos espacios temporales:

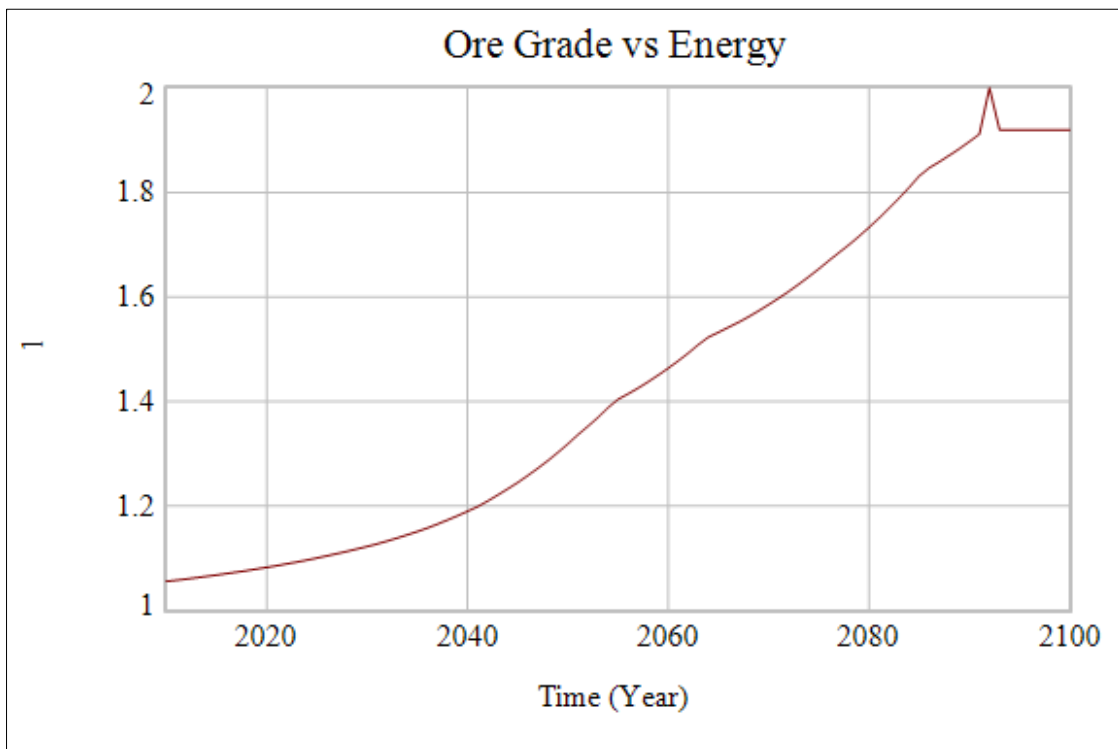


Figura 5.24. Resultado en Vensim, Evolución del sobrecoste de la energía de extracción debido a las variaciones en el ore grade Dy. Fuente: elaboración propia.

Por su parte el stock de material Dy reciclado en sintonía con los flujos de extracción de mineral de la reserva sigue la siguiente distribución:

Time (Year)	2020	2030	2040	2050	2100
Dy Scrap [Ton]	60,97404	181,2853	1370,317	3491,087	50756,3
Total Energy in Recycling [KW*h]	289379,9688	1,68E+06	7,76E+06	3,74E+07	1,19E+09
CO2 Removed by Nd Recycling [Ton]	1711,12183	9906,646	45894,45	220947,1	7,03E+06

Se puede observar cómo para el año 2040 y 2050 ya se habrán generado 1370 y 3491 Toneladas de material de desecho respectivamente, que permitiría cubrir de tener unas técnicas de reciclado más eficientes las necesidades proyectadas de Dy en energía eólica desde 2010 a 2026 y desde 2010 hasta 2035 respectivamente. El consumo energético acumulado evoluciona desde 289380 KW*h anuales en 2010 hasta 1190 millones de KW*h anuales en 2100, es decir un 4112% de aumento debido a las grandes instalaciones de GW de energía eólica que tienen lugar en el modelo en la última parte del siglo.

Por su parte las emisiones de CO₂ no emitidas debido al material que se recicla y que no es extraído ya en 2050 acumula 220947.1 Toneladas de CO₂. Si se supone una media de 148 g/km recorrido de media y 6650 km recorridos anuales por vehículos supone 1 Tonelada por vehículo (56) por lo que se contrarrestaría en 2050 el efecto de cerca de 22 000 vehículos como valor indicativo.

Por último se muestra la evolución de la demanda de Disprosio que el flujo de material reciclado conseguir dar respuesta que en 2100 alcanzará un 24.93% de la demanda anual de Disprosio en energía eólica:

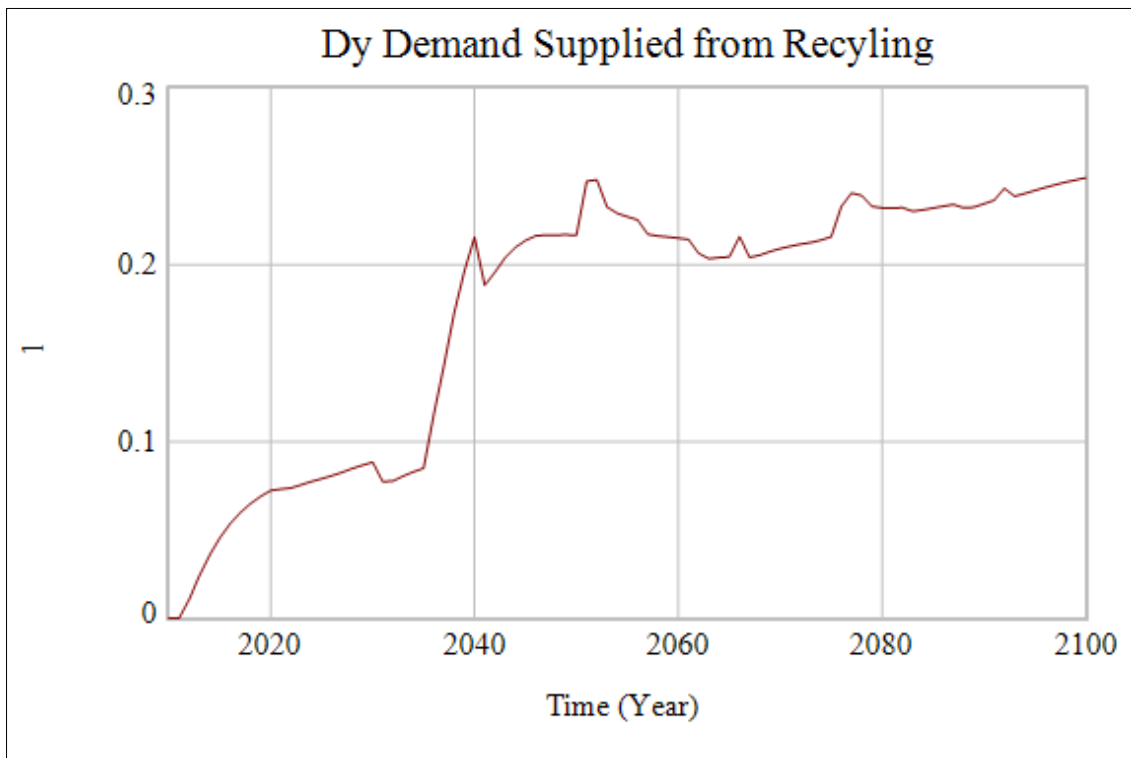


Figura 5.25. Resultado en Vensim. Demanda de Dy mundial cubierta por la tasa de reciclado. Fuente: elaboración propia.

CAPITULO 6.

CONCLUSIONES

6. CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

6.1. Visión global

Durante este proyecto se ha realizado una aproximación para conocer las limitaciones tecnológicas, energéticas y fundamentalmente materiales a la expansión de la generación de energía eólica dentro del contexto de la transición energética que va a tener lugar durante el siglo XXI. Mediante la simulación con VENSIM se ha explorado el horizonte desde 2010 a 2100 basándose en las perspectivas mundiales de energía de los principales organismos y departamentos internacionales centrados en la disponibilidad de dos elementos, el Neodimio y el Disproso por su criticidad y exposición en energía eólica. El uso de la dinámica de sistemas mediante la simulación de un modelo en VENSIM, permite construir y estudiar modelos dinámicos de una forma intuitiva, permitiendo observar los resultados variable a variable, gráficamente muy potente.

La energía eólica a menudo se presenta como una de las más prometedoras fuentes de energía renovables cuyo papel en mix de energías a priori se prevé preponderante en un futuro cercano de transición energética. Sin embargo no se puede olvidar el hecho de los recursos críticos empleados en la construcción de aerogeneradores eólicos. Los aumentos capacitivos de los aerogeneradores de nueva generación, requerimiento de disminución de peso, mayor eficiencia, disminución de costes de mantenimiento y la ampliación de los rangos de funcionamiento ha derivado en el uso de materiales magnéticos en la fabricación de generadores de imanes permanentes lo que conlleva el uso de apreciables cantidades de materiales de tierras raras, de las cuales el Neodimio y el Disproso tienen una especial exposición en energía eólica. Estos materiales están considerados como críticos por su elevado interés económico y tecnológico y por su riesgo de escasez.

Con esta justificación durante este proyecto se ha realizado un modelo mediante dinámica de sistemas para explorar las limitaciones tecnológicas, energéticas y fundamentalmente materiales en Neodimio y Disproso a la expansión de la generación de energía eólica dentro del contexto de la transición energética hacia mitad de siglo. La elección de la dinámica de sistemas es especialmente recomendada en entornos complejos donde se requieren análisis internos al modelo y a las variables que lo gobiernan. Mediante la simulación con VENSIM se ha explorado el horizonte desde 2010 a 2100 basándose en las perspectivas mundiales de energía de los principales organismos internacionales (OMS, GWEC, IEA, DOI, UE, UNEP, USGS) y centrado en la disponibilidad de dos elementos, el Neodimio y el Disproso por su criticidad en energía eólica.

6.2. Resultados

A partir de las estimaciones de crecimiento mundial según una perspectiva BAU, se ha determinado una estimación de demanda energética mundial desde $1.11 \cdot 10^{14}$ KWh en 2010 y con un horizonte para 2050 de $2.21 \cdot 10^{14}$ KWh para en 2100 situarse en $6.67 \cdot 10^{14}$ KWh, de esta la demanda energética a nivel mundial dentro del mix de energías la demanda eléctrica representa en la actualidad $2.214 \cdot 10^{13}$ KWh cerca del 20% que mediante una perspectiva creciente en las estimaciones pasará en 2050 al 40%, motivado por el acceso a mayor usuarios a nivel mundial y por la creciente electrificación del transporte para finalmente en 2100 situarse en $3.87 \cdot 10^{14}$ KWh la demanda mundial de energía eléctrica, un 58% de la demanda de energía primaria.

Por otra parte, uno de los principales objetos de atención de este proyecto ha sido la capacidad eólica instalada a nivel mundial que pasarán de un ratio actual de un 1.6% offshore a un 45% en 2100, de ambos tipos de instalaciones offshore y onshore en 2010 cubren un 2.5% de la demanda de energía eólica con 191 GW para en 2050 situarse en 4576.421 GW, dando cobertura a un 15% de la demanda eléctrica, finalmente en 2100 el horizonte a alcanzar se sitúan en un 30% de energía eólica sobre demanda eléctrica, alcanzando 41630 GW de capacidad eólica instalada. La principal limitación que se encuentra en estos resultados es en en alcanzar entre 1TW límite inferior y 16 TW límite superior de las estimaciones factibles, lo que limitaría la expansión de la energía eólica hasta 2075, situándose en un 22.36 % de cobertura posible de toda la demanda de energía eléctrica y no un 30%.

Respecto a los beneficios de la energía eólica, de los KWh eléctricos generados por esta se conseguiría hasta 2050 10^{12} Toneladas de CO₂ no emitidas debido al desplazamiento de la quema de combustibles fósiles. Ya en 2010 la generación que permiten los 191 GW de energía eólica instalados supone no emitir el 3.75% las emisiones mundiales de CO₂.

Por su parte las extracciones de Neodimio y Disproso en energía eólica aumentarán desde 2010 a 2050 un 3932% y un 5858% respectivamente. La producción mundial de Neodimio se estima en 18902 Toneladas en 2010 para estimar en 2050 y 2100 en 54688 y 344807 Toneladas anuales respectivamente. Para el Neodimio en 2010 se aprecia una producción mundial de 201 Toneladas, para ascender a 1636 y 15904 Toneladas en 2050 y 2100 respectivamente. En ambos casos el potencial de producción estimado se sitúan en 350000 Toneladas anuales de REE teniendo en cuenta su abundancia por Toneladas de REE extraída, para el Neodimio habría una limitación en 2055, lo que permitiría solamente desarrollar 6000GW de capacidad eólica instalada, una demanda eléctrica del 16.25%. Para el Disproso, debido a su mayor exposición a la energía eólica la falta de capacidad de producción es más alarmante, reduciendo la estimación de capacidad eólica prevista hasta 2040, limitando el desarrollo de esta fuente de energía a 2275 GW cubriendo solo un 11.27% de la demanda eléctrica. Estos dos elementos colmarán dentro de su mercado un 29.64% y un 77.12% para uso en aerogeneradores eólicos para el Neodimio y Disproso respectivamente en 2050.

Respecto a la pregunta clave: disponibilidad de estos minerales críticos desde 2010 a 2100 se extraen distintos indicadores derivados de la simulación del modelo. Para el Neodimio no existen evidencias de escasez a la vista, las curvas de producción acumulada y reserva parece encontrarse en 2105 y la reserva de Neodimio sufrir una evolución de consumo desde un 8.148% en 2050 a un 42.6% en 2100. Sin embargo para el Disproso, más raro que el Neodimio, las curva de producción acumulada y reserva se encuentran en 2077 para al finalizar 2092 alcanzar el 100% del consumo de la reserva de Disproso, sin embargo aprovechando los recursos disponibles conocidos se podría alargar hasta 2096 el uso de Disproso, ante una hipótesis sin nuevos descubrimientos.

La tasas de reciclado de éstos minerales suponen uno de los principales retos tecnológicos en la producción de las REE's. Para el Neodimio se estima una tasa del 5% y del 10% para el Disproso, pese al potencial que puede mostrar este sector ya el material de desecho acumulado alcanzará en 2100 para el Neodimio y el Disproso cerca de 96345.3 y 5076 Toneladas anuales respectivamente, permitiendo cubrir el 25.51 % y el 24.91% de las necesidades estos materiales en energía eólica en 2100, debido al cúmulo de grandes volúmenes extraídos a mitad de siglo.

Por su parte las energías de extracción sufren un progresivo encarecimiento fruto del consumo de las reservas y del empeoramiento del ore grade de los yacimientos lo que desencadenará en mayores requerimientos energéticos por Tonelada extraída. Si el referente a extraer es el Neodimio ya en 2100 se emplearán 1.633 veces más de energía que en 2010. Si se toma como referente de extracción de REE el Disproso, este sobrecoste es más acuciante, resultando ya en 2050 1.32 veces mayor consumo para extraer una Tonelada de REE y en 2100 hasta 1.92 veces más que respecto al inicio de la simulación en 2010. Estos sobrecoste representarán un indicador estratégico en muchos yacimientos de cuando abandonar la extracción.

Por último, las principales restricciones que permiten una variabilidad en estimaciones del modelo son el GDP, la tasa de reciclado y la tasa de transformación de recursos en reserva. De todas estas la que más resultados arroja es la estimación del crecimiento mundial de GDP, viendo sus resultados nítidamente en las demandas energéticas mundiales a través de una herramienta de VENSIM que permite observar la influencia de una variable en otras mediante un método de Montecarlo, esta herramienta es el test de sensibilidad. En este sentido con un 95% de probabilidad y para la menos favorecedora de las estimaciones de crecimiento del GDP mundial de un 2%, en 2100 se desarrollarán como mínimo 22500 GW frente a los 52500 GW para un crecimiento sostenido en el tiempo del 3%. Esto mismo ocurre con la reserva de Neodimio pudiendo contar con hasta 16.67 millones de Toneladas con un 95% de confianza para un crecimiento del 2%, es decir, 3.35 millones de Toneladas más. Para el Dysproso en el más conservador de los casos, podría elevar su estado de conservación de la reserva en hasta 44115 Toneladas. Todo esto arroja una cierta acotación de la variabilidad de los datos tomados de distintos autores en ciertas variables capitales.

Teniendo en cuenta los principales indicadores y variables anteriormente destacadas del estudio se arroja una idea clara de la disponibilidad de estos recursos, las limitaciones

productivas, y los costes energéticos para su desarrollo en el período de tiempo del estudio, junto con las limitaciones y estimaciones subrayadas.

6.3. Trabajos futuros

Por último cabe destacar otros futuros estudios y análisis que no son parte del alcance de este proyecto y que suponen campos de investigación para completar este análisis. Uno de ellos es modelar los otros usos que tienen el Neodimio y el Disproso para acotar más fielmente su disponibilidad, uno de ellos y de especial interés sería delimitar la relación de estos materiales ante la expansión del coche eléctrico. Además, desde el punto de vista de la disponibilidad de recursos supone de un gran interés futuro la contabilización de futuros yacimientos, la extracción en medios hasta ahora no explotables por su baja concentración como es en los océanos y el aumento y mejoras de las técnicas de reciclado.

Por otra parte, la extracción de Tierras Raras tiene serios retos tecnológicos y sobre todo medioambientales debido a su intensidad energética, recursos naturales y a las emisiones de principales gases de efecto invernadero (GHG). Más específico de la energía eólica convendría analizar en profundizar los límites tecnológicos a los que está expuesta y las zonas y tecnologías donde todavía tiene campo de extensión como es la energía eólica marina (offshore).

Además la energía eólica y el conjunto de las energías renovables están expuestas fuertemente a la inversión y decisiones políticas, así como al precio del petróleo y al surgimiento de otras tecnologías energéticas disruptivas como los motores híbridos y de hidrógeno o la explotación masiva de recursos hasta ahora marginales como la geotermia o las corrientes marinas.

En definitiva, todos estos estudios deben ir encaminados en vislumbrar las políticas a implementar en el futuro que permitan la mayor eficiencia energética y la suplementación de los recursos fósiles para conformar el mejor mix energético posible.

CAPÍTULO 7.

BIBLIOGRAFÍA

7. CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

1. International Energy Association. World Energy Outlook 2016 Infographic. 2016.
2. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007- Synthesis Report [Internet]. 2007 [cited 2017 Jul 1]. Available from: <http://www.ipcc.ch/>
3. Siemens Gamesa Corp. SIEMENS Gamesa Renewable Energy [Internet]. 2017 [cited 2017 Jun 29]. Available from: http://www.gamesacorp.com/gamesa/en/siemensgamesa.html?s_kwcid=AL!462!3!190096296198!p!!g!!siemensgamesa&ef_id=WUQpGAAAAeL3D9VN:20170629084459:s
4. Wilburn DR. Wind Energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry From 2010 Through 2030. Sci Investig Rep. 2011;
5. WWEA. World Wind Energy Association [Internet]. 2016 [cited 2017 Jun 29]. Available from: <http://www.wwindea.org/>
6. Álvarez C. Manual de Energías Renovables - Energía Eólica. Idae [Internet]. 2006;1–180. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>
7. Bloomberg Corp. Bloomberg New Energy Finance | Bloomberg Finance L.P. [Internet]. 2017 [cited 2017 Jun 29]. Available from: <https://about.bnef.com/>
8. Kumar Y, Ringenber J, Depuru SS, Devabhaktuni VK, Lee JW, Nikolaidis E, et al. Wind energy: Trends and enabling technologies. Renew Sustain Energy Rev. 2016;53:209–24.
9. DOI. Department of Energy [Internet]. 2017 [cited 2017 Jun 29]. Available from: <https://energy.gov/>
10. GE Renewable Energy. GE | The Digital Industrial Company | Imagination at Work [Internet]. 2017 [cited 2017 Jul 1]. Available from: <http://www.ge.com/>
11. Coey JMD. Rare-earth magnets. Endeavour. 1995;19(4):146–51.
12. Lauson J. Which Wind Turbine Generator Will Win - Renewable Energy World.pdf.
13. EWT. EWT - EWT wind turbines, 250kW, 500kW, 750kW, 900kW, direct drive, direct wind. [Internet]. [cited 2017 Jun 29]. Available from: <http://www.ewtdirectwind.com/key-advantages.html#c524>
14. Hoenderdaal S, Tercero Espinoza L, Marscheider-Weidemann F, Graus W. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? Energy. 2013;49(1):344–55.
15. European Comission. Critical Raw Materials - European Commission [Internet].

CAPITULO 7. Bibliografía

- 2010 [cited 2017 Jun 29]. Available from:
https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
16. Goonan TG. Rare Earth Elements — End Use and Recyclability Scientific Investigations Report 2011 – 5094. US Geol Surv Sci Investig Rep 2011-5094 [Internet]. 2011;1–15. Available from: <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094>
 17. European Union. Medeas | Modeling the renewable energy transition in europe [Internet]. 2014 [cited 2017 Jun 29]. Available from: <http://www.medeas.eu/>
 18. CIRCE. EU Framework Program for Research and Innovation actions (H2020 LCE-21-2015) Guiding European Policy toward a low-carbon economy . Modelling sustainable Energy system Development under Environmental And Socioeconomic constraints. MEDEAS-UE. 2016;
 19. Kleijn R, van der Voet E. Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. Renew Sustain ENERGY Rev. 2010;14(9):2784–95.
 20. Haque N, Hughes A, Lim S, Vernon C. Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. Resources. 2014;3:614–35.
 21. Walters A, Lusty P. Rare earth elements - Commodity Profile. Br Geol Surv [Internet]. 2011;(November):54. Available from: <http://www.mineralsuk.com>
 22. Voncken JHL. The Rare Earth Elements [Internet]. 2016. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26809-5>
 23. González-Busto Múgica B. La dinámica de sistemas como metodología para elaboración de modelos de simulació. Univ Oviedo. 1998;
 24. Martín J. Ejercicios de dinámica de sistemas. 2012. 1-336 p.
 25. Alfonso D, Aurrecochea D, Javier D, Cosín D. Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria. Dep Lenguajes y Sist Informáticos Fac Informática Univ País Vasco [Internet]. 2010 [cited 2017 Jun 29]; Available from: <http://www.ehu.es/i.morlan/tesis/memoria/TesisIMcompleta.pdf>
 26. IEA. International Energy Agency [Internet]. 2017 [cited 2017 Jun 29]. Available from: <https://www.iea.org/>
 27. British Petroleum Corp. BP Statistical Review of World Energy About this review. 2016;(June):48. Available from: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
 28. The World Bank. World Bank Group - International Development, Poverty, & Sustainability [Internet]. [cited 2017 Jun 29]. Available from: <http://www.worldbank.org/>
 29. Independent Statics & Analysis. International Energy Outlook 2016 - Energy Information Administration [Internet]. 2016 [cited 2017 Jun 29]. Available from:

CAPITULO 7. Bibliografía

- <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>
30. Commission E. Chapter 5 - Electricity. 2016;2016:81–100.
 31. GWEC. Global Wind Report 2015 | Gwec. Wind energy Technol [Internet]. 2016;75. Available from: <http://www.gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status/>
 32. GWEC. Global Wind Energy Outlook. 2010;1–60.
 33. Mediavilla M, de Castro C, et al. Global Wind Power potencial, physical and technological limits. 2011;39(10).
 34. The Organisation for Economic Cooperation and Development. OECD.org - OECD [Internet]. [cited 2017 Jun 29]. Available from: <http://www.oecd.org/>
 35. European Comission. Comisión Europea : CORDIS : Servicio de Proyectos y Resultados : Baterías de litio de nueva generación [Internet]. [cited 2017 Jun 29]. Available from: http://cordis.europa.eu/result/rcn/88582_es.html
 36. Wind Europe. Wind energy scenarios for 2030. 2015;(August):1–16. Available from: <https://windeurope.org/about-wind/reports/wind-energy-scenarios-2030/>
 37. Bocard N. Capacity factor of wind power realized values vs. estimates. Energy Policy. 2009;37(7):2679–88.
 38. AEE. Asociación Empresarial Eólica - Spanish Wind Energy Association - Energía Eólica [Internet]. Eólica 16. Toda la información del sector en el año 2015. 2016 [cited 2017 Jun 29]. Available from: <https://www.aeeolica.org/>
 39. Vidolova M. Critical materials for wind power: The relevance of rare earth elements for wind turbines. 2014;2014(928694):1–9.
 40. Habib K, Wenzel H. Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling. J Clean Prod [Internet]. 2014;84(1):348–59. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.035>
 41. Chen Z. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. J Rare Earths. 2011;29(1):1–6.
 42. Paulick H, Rosa, Kalvig D. Rare Earth Element (REE) exploration potential and projects in Greenland. MiMa Rapp 2015 [Internet]. 2015 [cited 2017 Jun 29]; Available from: <http://mima.geus.dk/wp-content/uploads/MiMa-rapport-2015-2.pdf>
 43. Sverdrup HU, Ragnarsdottir KV, Koca D. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. Resour Conserv Recycl [Internet]. 2014;87:158–74. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.007>
 44. Binnemans K, Jones PT, Blanpain B, Van Gerven T, Yang Y, Walton A, et al. Recycling of rare earths: A critical review. Vol. 51, Journal of Cleaner Production.

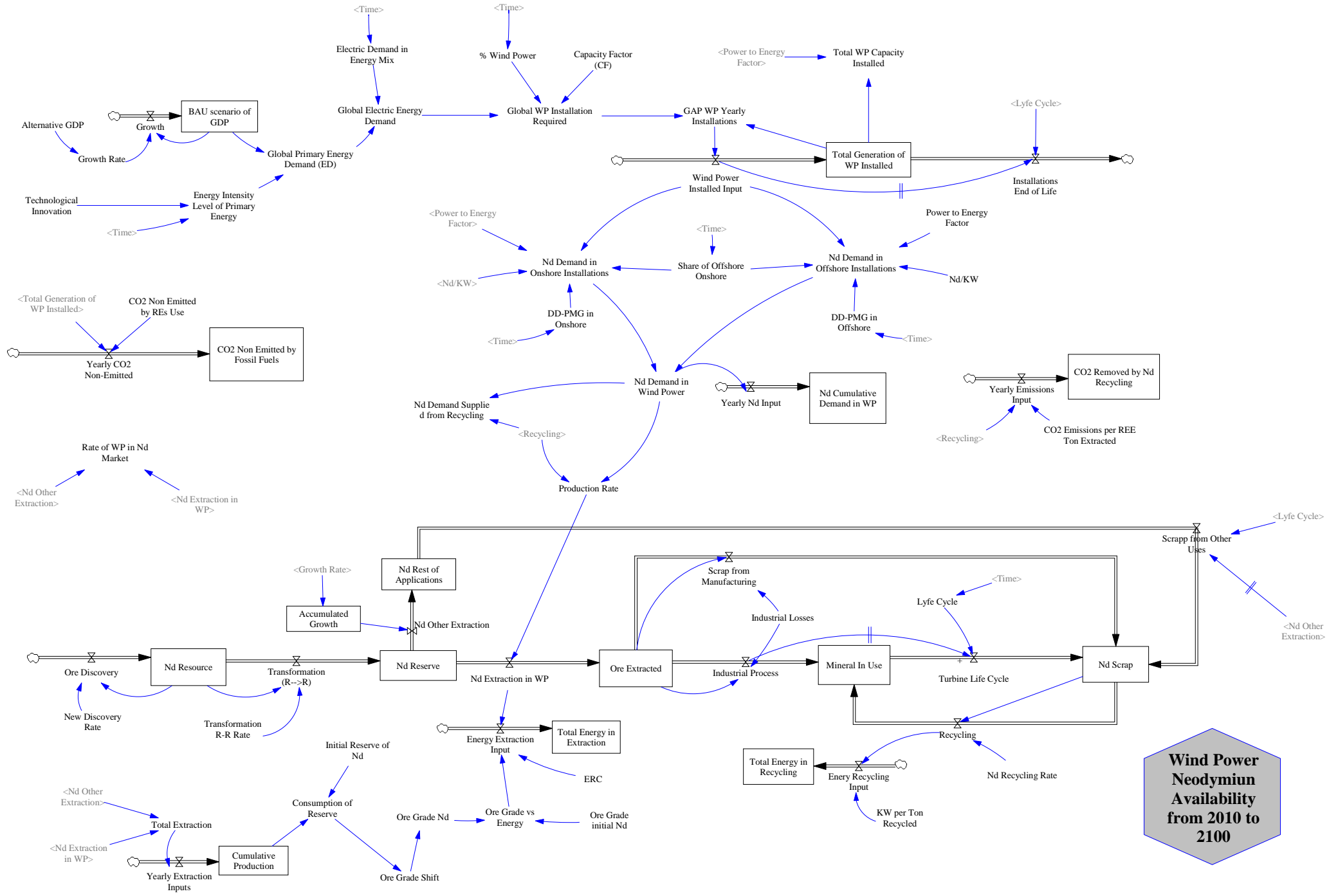
CAPITULO 7. Bibliografía

2013. p. 1–22.
45. Graedel TE, Et.Al. UNEP Recycling rates of metals - A Status Report, a Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the international Resource Panel. Group. 2011. 1-46 p.
 46. Dai AX, Lippincott CA, Nissan ME, Shim R. Recycling of neodymium and dysprosium from permanent magnets. *Sr Des Reports*. 2016;4:224.
 47. Valero A, Valero A, Martínez A. Inventory of the exergy resources on earth including its mineral capital. *Energy*. 2010;35(2):989–95.
 48. Valero A, Valero A. *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources: A thermodynamic cradle-to-cradle assessment*. World Scientific Publishing Company.; 2014. 672 p.
 49. Northey S, Mohr S, Mudd GM, Weng Z, Giurco D. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2014;83:190–201. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.005>
 50. Atocchi G. Task 2.2.c.2. Exergy extraction curves considering non-renewable resources and raw materials. 2011. p. 1–29.
 51. Laherrère JH. Copper peak. *oil drum* [Internet]. 2010;1–27. Available from: <http://europe.theoil Drum.com/node/6307>
 52. Lee JCK, Wen Z. Rare Earths from Mines to Metals: Comparing Environmental Impacts from China's Main Production Pathways. *J Ind Ecol* [Internet]. 2016;0(0). Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/jiec.12491>
 53. Mediavilla M, de Castro C, Capellán I, Javier Miguel L, Arto I, Frechoso F. The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions. *Energy Policy*. 2013;52:297–311.
 54. MEDEAS. Report with an analysis of the main limitations of variables and indicators selected to represent the pathways and scenarios. :1.
 55. Schüler D, Buchert M, Liu D, Liu R. Study on Rare Earths and Their Recycling. *Öko-Institut eV ...* [Internet]. 2011;49(January):30–40. Available from: [http://www.malaysia-today.net/wp-content/uploads/2013/02/www.oeko.de_oekodoc_1112_2011-003-en.pdf%5Cnhttp://resourcefever.de/publications/reports/Rare earths study_Oeko-Institut_Jan 2011.pdf](http://www.malaysia-today.net/wp-content/uploads/2013/02/www.oeko.de_oekodoc_1112_2011-003-en.pdf%5Cnhttp://resourcefever.de/publications/reports/Rare%20earths%20study_Oeko-Institut_Jan%202011.pdf)
 56. USGS. Lithium Use in Batteries. *US Geol Surv* [Internet]. 2012; Available from: http://pubs.usgs.gov/circ/1371/pdf/circ1371_508.pdf

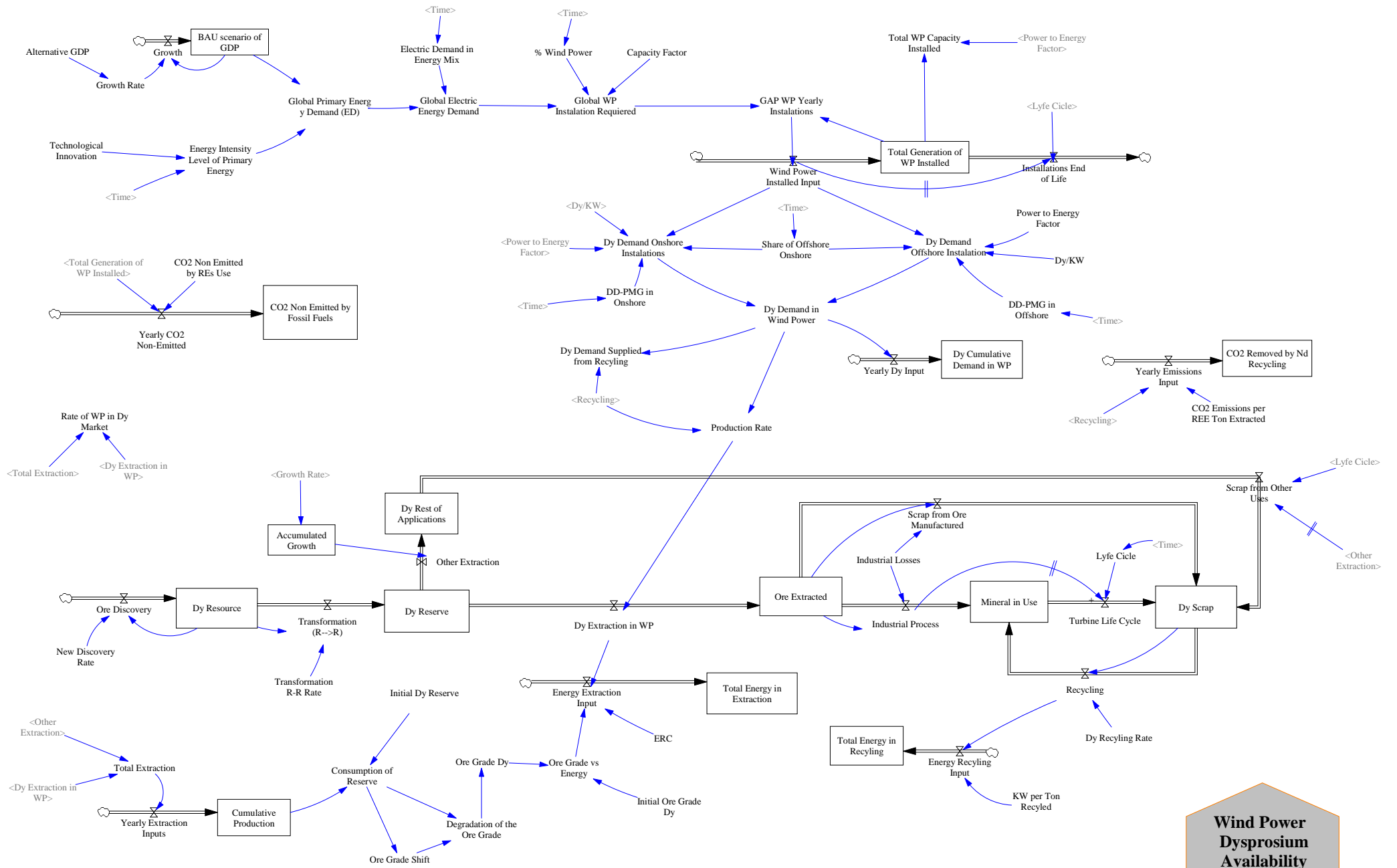
DOCUMENTOS

ANEXOS

8. DOCUMENTOS ANEXOS. MODELOS DE SIMULACIÓN EN VENSIM



Wind Power Neodymium Availability from 2010 to 2100



**Wind Power
Dysprosium
Availability
from 2010 to
2100**

