



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**Análisis de flujos de energía mediante
diagramas Sankey para escenarios de
transición energética mundial**

Autor:

García Cuenca, Jose María

Tutor(es):

Miguel González, Luis Javier

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Parrado Hernando, Gonzalo

Grupo de Investigación Reconocido – Grupo de Energía, Economía

y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid

Valladolid, septiembre 2021.



RESUMEN

En la realización de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se ha estudiado el modelo en dinámica de sistemas denominado MEDEAS-World realizado por el grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid. En concreto, se ha realizado el análisis del sector energético mediante diagramas Sankey, siguiendo los flujos energéticos desde las fuentes de generación hasta los sectores de uso final, incluyendo las pérdidas del proceso. Se analizan comparativamente diagramas que correspondan con años y escenarios distintos del modelo, obteniendo una serie de conclusiones sobre las tendencias del sector energético en función de las políticas elegidas en el modelo. Estas conclusiones reflejan la potencialidad de aplicación de este tipo de diagramas a Modelos de evaluación integrada (IAMs, siglas en inglés).

ABSTRACT

In carrying out this Final Degree Project (FDP), system dynamics model called MEDEAS-World has been studied, developed by Energy, Economics and System Dynamics group of the University of Valladolid. Specifically, the analysis of the energy sector has been carried out using Sankey diagrams, following the energy flows from the generation sources to the final use by the economic sectors, including losses in transformation and transport processes. Diagrams corresponding to different years and scenarios of the model have been comparatively analysed, obtaining a series of conclusions about the trends in the energy sector based on the policies chosen in the model. These conclusions reflect the potential for applying this type of diagram to IAMs. These conclusions reflect the potential application of this type of diagrams to Integrated assessment models (IAMs).





PALABRAS CLAVE

Sankey, Python, Vensim, energía, Modelo de Evaluación Integrada.

KEYWORDS

Sankey, Python, Vensim, energy, Integrated Assessment Model.





ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.	ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	13
1.2.	OBJETIVOS.....	13
2.	CONTEXTO DEL ESTUDIO	15
2.1.	INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	15
2.2.	INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE SISTEMAS E IAMS.....	19
2.3.	MODELO DE ESTUDIO - MEDEAS_World	22
2.4.	DIAGRAMAS SANKEY	24
3.	DESARROLLO DE LOS DIAGRAMAS SANKEY	27
3.1.	PROCEDIMIENTO.....	27
3.1.1.	EXTRACCIÓN DE LOS DATOS	30
3.1.2.	REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS EN PYTHON	35
4.	RESULTADOS	41
4.1.	DIAGRAMAS DESAGREGADOS	41
4.2.	DIAGRAMAS DE SANKEY DEL SECTOR ENERGÉTICO COMPLETO..	44
4.3.	DIVULGACIÓN	47
4.4.	DETECCIÓN ERRORES	48
5.	CONCLUSIONES.....	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	ANEXOS 53	
	ANEXO I: CÓDIGO DE PLOTLY	54
	ANEXO II: VARIABLES CREADAS.....	57
	ANEXO III: DIAGRAMAS DESAGREGADOS	60
	ANEXO IV: DIAGRAMAS SANKEY DEL SECTOR ENERGÉTICO	65
	ANEXO V: CÓDIGO EN PYTHON	68



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 CAMBIO DE LA TEMPERATURA MEDIA GLOBAL HASTA 2017 Y PREVISIONES FUTURAS ESTIMADAS.	16
FIGURA 2 CONTRIBUCIÓN DE LOS GEIS MÁS IMPORTANTES INCREMENTADOS DESDE LA ERA PREINDUSTRIAL.	17
FIGURA 3 EMISIONES DE CO2 EN GTC/YR POR LAS FUENTES FÓSILES	17
FIGURA 4 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA UE EN 2015	18
FIGURA 5 CAMBIO ANUAL DE LAS EMISIONES DE CO2 EN GTCO2/YR.....	18
FIGURA 6 ESTRUCTURA BÁSICA DE LOS IAMS	21
FIGURA 7 ESTRUCTURA DE MEDEAS-WORLD	23
FIGURA 8 DIAGRAMA DE SANKEY DE LA EFICIENCIA DE UNA MÁQUINA DE VAPOR EN 1898 REALIZADO POR EL INGENIERO QUE DARÍA NOMBRE AL DIAGRAMA, MATTHEW HENRY PHINEAS RIAL SANKEY	25
FIGURA 9 MUESTRA DE NOMBRES DE VARIABLES INTRODUCIDOS EN UN ARCHIVO LST.....	28
FIGURA 10 VARIABLE INSERTADA EN ARCHIVO LST ENTRE COMILLAS POR CONTENER UN CARÁCTER PROBLEMÁTICO PARA VENSIM.....	28
FIGURA 11 ARCHIVO CSV (11 PRIMERAS LÍNEAS).....	29
FIGURA 12 OPCIONES DE EXPORTACIÓN EN VENSIM.....	30
FIGURA 13 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL DIAGRAMA SANKEY	30
FIGURA 14 ESQUEMA DEL SECTOR ENERGÉTICO DE MEDEAS-WORLD DONDE SE COMPARA LA ENERGÍA REQUERIDA Y DISPONIBLE PARA DETERMINAR LA ENERGÍA SUMINISTRADA.....	31
FIGURA 15 BLOQUE DE BOTONES DE DIAGRAMAS DE INFLUENCIA.....	32
FIGURA 16 ARCHIVO CSV DE LA VARIABLE “FINAL ENERGY CONSUMPTION BY UNIFIED SECTOR AND FINAL FUEL” PARA EL DIAGRAMA SANKEY DEL SECTOR ENERGÉTICO COMPLETO	38
FIGURA 17 RESULTADO DE LA AUTOMATIZACIÓN	38
FIGURA 18 MUESTRA DE UNA PARTE DEL MODELO MEDEAS-WORLD EN FORMATO DE TEXTO.....	39
FIGURA 19 ESTRUCTURA MODELO DE UN IFRAME	47



FIGURA 20 CÓDIGO PARA GENERAR DIAGRAMA SANKEY EN EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON	55
FIGURA 21 DIAGRAMA DESAGREGADO DE ELECTRICIDAD.....	60
FIGURA 22 DIAGRAMA DESAGREGADO DE CALOR.....	61
FIGURA 23 DIAGRAMA DESAGREGADO DE SÓLIDOS	62
FIGURA 24 DIAGRAMA DESAGREGADO DE LÍQUIDOS	63
FIGURA 25 DIAGRAMA DESAGREGADO DE GASES.....	64
FIGURA 26 DIAGRAMA DEL SECTOR ENERGÉTICO (BAU, 2015)	65
FIGURA 27 DIAGRAMA DEL SECTOR ENERGÉTICO (BAU, 2050)	66
FIGURA 28 DIAGRAMA DEL SECTOR ENERGÉTICO (SCEN4, 2050)	67



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 FUENTES DE ENERGÍA PARA CADA TIPO DE ENERGÍA DEL MODELO MEDEAS-WORLD.....	32
TABLA 2 VARIABLES AUXILIARES CREADAS EN MEDEAS-WORLD PARA EL SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD.....	57
TABLA 3 VARIABLES AUXILIARES CREADAS EN MEDEAS-WORLD PARA EL SUMINISTRO DE CALOR.....	58
TABLA 4 VARIABLES AUXILIARES CREADAS EN MEDEAS-WORLD PARA EL SUMINISTRO DE SÓLIDOS.....	59
TABLA 5 VARIABLES AUXILIARES CREADAS EN MEDEAS-WORLD PARA EL SUMINISTRO DE LÍQUIDOS.....	59
TABLA 6 VARIABLES AUXILIARES CREADAS EN MEDEAS-WORLD PARA EL SUMINISTRO DE GASES.....	59



1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

El grupo de investigación de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS) de la Universidad de Valladolid trabaja en varios proyectos, entre los que se encuentra el proyecto europeo H2020 denominado “*Modelling the Energy Development under Environmental And Socioeconomic constraints*” (“Modelización del desarrollo energético bajo limitaciones ambientales y socioeconómicas”, MEDEAS en adelante). MEDEAS utiliza una serie de modelos homónimos de evaluación integrada basados en dinámica de sistemas que tienen como objetivo elaborar una serie de orientaciones políticas para alcanzar una economía baja en emisiones de carbono.

El Trabajo de Fin de Grado (TFG) ha sido realizado fruto de las prácticas de empresa realizadas en el grupo de investigación donde surgió la necesidad de elaborar los diagramas Sankey para representar los datos correspondientes al sistema energético. La asignatura optativa de 4º curso Dinámica/Modelado de sistemas complejos servirá de iniciación para trabajar con los modelos de MEDEAS. En concreto, MEDEAS-World ha sido el modelo utilizado en este TFG (versión 167_4). Este modelo corresponde con la versión mundial.

1.2. OBJETIVOS

Según se ha explicado anteriormente, la motivación del trabajo es responder a la necesidad de utilizar los diagramas Sankey en el proyecto MEDEAS. Para poder cumplir con este requerimiento se han planteado los siguientes objetivos en este TFG.

Primeramente, una revisión bibliográfica de la relación del consumo energético con las emisiones de gases de efecto invernadero. De esta revisión, también reflejar la importancia de los modelos de evaluación integrada (IAMs) en el ámbito político y el origen y los usos más comunes de los diagramas Sankey.

Análisis del modelo energético en Vensim para conocer sus características e información necesaria para los diagramas.

Búsqueda y estudio de herramientas para la creación de diagramas Sankey, así como su programación para relacionar la información procedente del modelo de MEDEAS.



Aplicación de los diagramas para conocer su estructura y componentes, así como conclusiones del análisis comparativo entre distintos escenarios, fruto de los diversos comportamientos del modelo.

Como último objetivo, nos hemos propuesto la realización de un artículo de divulgación científica para el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid, afín de diseminar los contenidos aportados por este grupo en general, y este trabajo en particular.

2. CONTEXTO DEL ESTUDIO

2.1. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

El efecto invernadero es un proceso natural del planeta generado por determinados gases en la atmósfera. Estos transforman la radiación solar extraterrestre en infrarroja, cambiando su longitud de onda. El equilibrio neto de los flujos de radiación infrarroja entre el exterior y la corteza terrestre (oceánica y continental), así como entre la corteza y el flujo exotérmico proveniente del núcleo, ha permitido unos rangos de temperatura habitables para la vida durante millones de años. No obstante, las diferencias locales en el clima toman diferentes comportamientos para cada situación geográfica. Existe una contribución anómala a la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEIs) de fuente antropogénica, como alerta, por ejemplo, el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) con la publicación de un nuevo informe en este 2021 [1]. Esta contribución se ha traducido en un incremento de 1° C de la temperatura global desde la era preindustrial [2].

El cambio climático antropogénico es uno de los mayores problemas de la sociedad actual. En la comunidad científica prolifera la preocupación, puesto que llevan décadas alertando de la gravedad de esta situación. La razón principal es la actividad desenfrenada de la población humana debido a una política económica con una producción, un uso de suelo y una extracción de recursos naturales a gran escala. La insuficiente energía específica de los recursos renovables impuso los combustibles fósiles para satisfacer un sistema económico de crecimiento exponencial y extractivista. Esta producción “se disparó” durante la revolución industrial fruto de unas condiciones socioeconómicas concretas. A partir de entonces, el desarrollo de la producción ha sido – de forma simplificada – exponencial a lo largo de los años. En lo que a energía se refiere, la creciente demanda para la producción de bienes y servicios fue posible por la concatenación de combustibles cada vez más potentes en poder calorífico inferior (PCI). Así, por ejemplo, aunque coexistan los recursos, la explotación histórica ha seguido la cadena madera (19 Gt/t) - carbón (30 Gt/t) – petróleo (42 Gt/t) – gas natural (48 Gt/t).

El uso masivo de estos combustibles conlleva al aumento de la temperatura media del planeta ocasionando el desequilibrio de los ecosistemas. Esta situación está provocando la extinción de miles de especies y pone en riesgo al resto de seres vivos, incluyendo a la especie humana. Este efecto se conoce como la “sexta extinción” ya que posiblemente sea el sexto evento extinto masivo del planeta [3].

En la Figura 1 se muestra el aumento de la temperatura desde 1850 hasta 2017 (en gris), así como el rango de calentamiento antropogénico estimado (en naranja). A partir de 2017 se establecen rangos de posible respuesta a esta tendencia creciente. El rango azul corresponde con la reducción más rápida de los gases de efecto invernadero para tratar de limitar el crecimiento de la temperatura media a un 1,5° C como se habían propuesto los 195 países en el Acuerdo de París [4] mitigando las emisiones de GEIs.

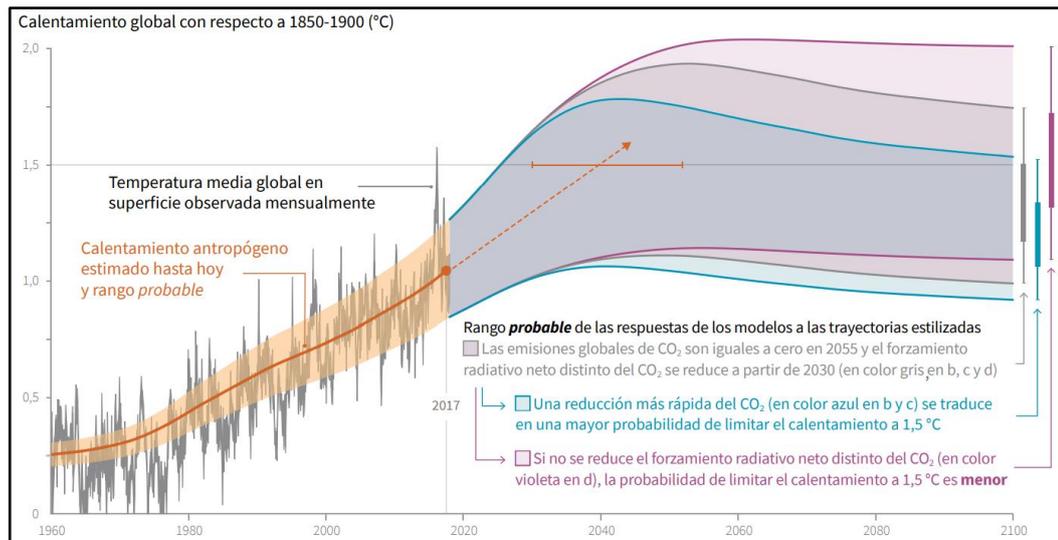


Figura 1 Cambio de la temperatura media global hasta 2017 y previsiones futuras estimadas. [2]

Los principales gases de efecto invernadero emitidos por la actividad humana son [5]:

- Dióxido de carbono (CO_2): es el más conocido, representa el 66% del total de las emisiones de GEIs. Su crecimiento ha sido del 148% desde la era preindustrial (1750). Por esta razón, las emisiones del resto de gases son traducidos a CO_2 equivalente para los estudios científicos.
- Metano (CH_4): es el segundo gas con mayor porcentaje de emisiones totales de GEIs, con el 16%. Es mayoritariamente producido por la ganadería y ha tenido un crecimiento del 260% desde la era preindustrial. La importancia del metano no se debe únicamente al volumen de sus emisiones, sino también al impacto que provocan. El metano tiene 21 veces más potencial para el calentamiento global que el dióxido de carbono [6].
- Óxido nitroso (N_2O): corresponde con 7% de las emisiones totales de GEIs y ha sufrido un crecimiento equivalente al 123% desde la era preindustrial. Sus emisiones son originadas por el uso de fertilizantes y en diversos procesos industriales.
- Otros gases de efecto invernadero: corresponde con 11% de las emisiones de GEIs totales. Son principalmente clorofluorocarbonos (CFC) y gases

halogenados. Mientras estos gases están disminuyendo, algunos hidroclorofluorocarbonos (HCFC) e hidrofluorocarbonos (HFC) están aumentando rápidamente, aunque aún son de baja abundancia. También, en menor abundancia se encuentra el hexafluoruro de azufre (SF_6).

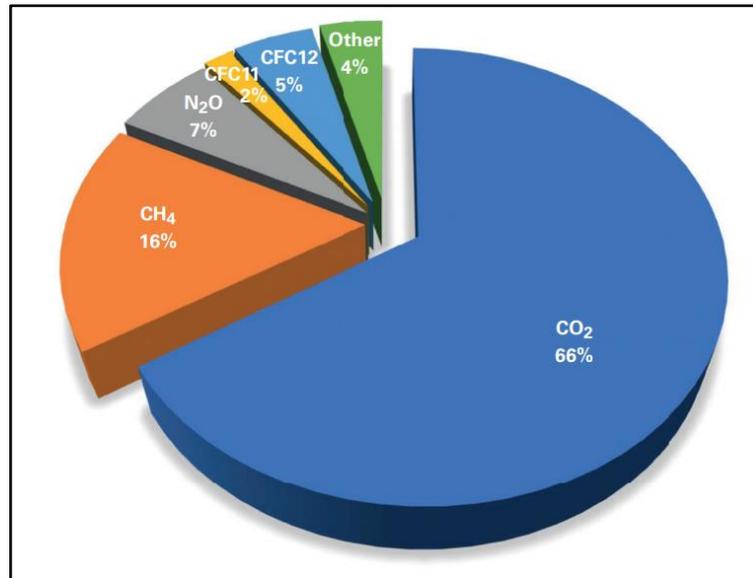


Figura 2 Contribución de los GEIs más importantes incrementados desde la era preindustrial. [5]

Las emisiones de CO_2 han incrementado cada década desde los 60's con un promedio de 3.0 ± 0.2 GtC/yr hasta un promedio de 9.4 ± 0.5 GtC/yr durante 2010-2019. Las emisiones de carbono a la atmósfera son causadas por las emisiones fósiles en un 81% y los cambios de uso de la tierra el restante 19% [7]. Se ilustra en la Figura 3 el crecimiento de las emisiones derivado del uso de los combustibles fósiles.

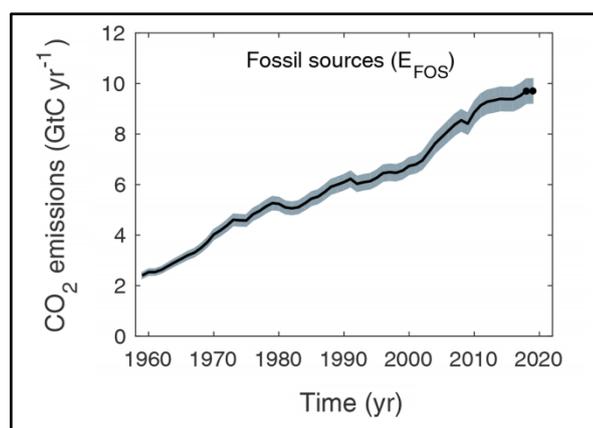


Figura 3 Emisiones de CO_2 en GtC/yr por las fuentes fósiles [7]

El uso de los combustibles fósiles está fuertemente relacionado con el sector energético. Como veremos a continuación, el consumo de energía representa la mayor fuente de emisiones derivado de las actividades humanas.

Específicamente en la Unión Europea, en 2015, el 79% de las emisiones correspondieron al sector energético (Figura 4). Consecuentemente, este sector es la principal causa del cambio climático.

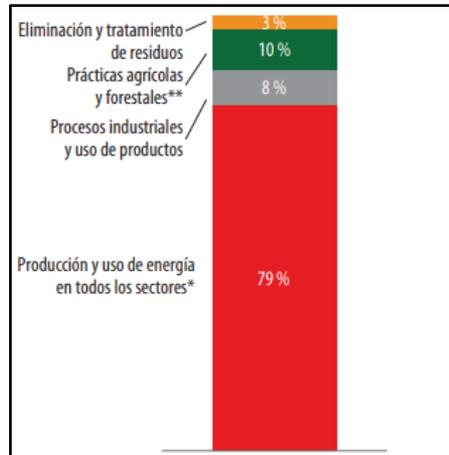


Figura 4 Emisiones de gases de efecto invernadero de la UE en 2015 [8]

Un ejemplo que clarifica la relación del consumo con las emisiones ha sido la actual situación derivada por el COVID-19. Las restricciones de movilidad han disminuido las emisiones de carbono considerablemente. Notándose sobre todo la reducción en el sector transporte. Como nos muestra la Figura 5, desde el 1 enero hasta el 30 junio de 2020 comparado con el 2019, las emisiones se redujeron en 1,6 GtCO₂ [9]. Si observamos en el resto de los años que contienen datos negativos, todos coinciden con las mayores crisis de la historia reciente, debido a la reducción de la producción y el consumo por los efectos que estas provocan.

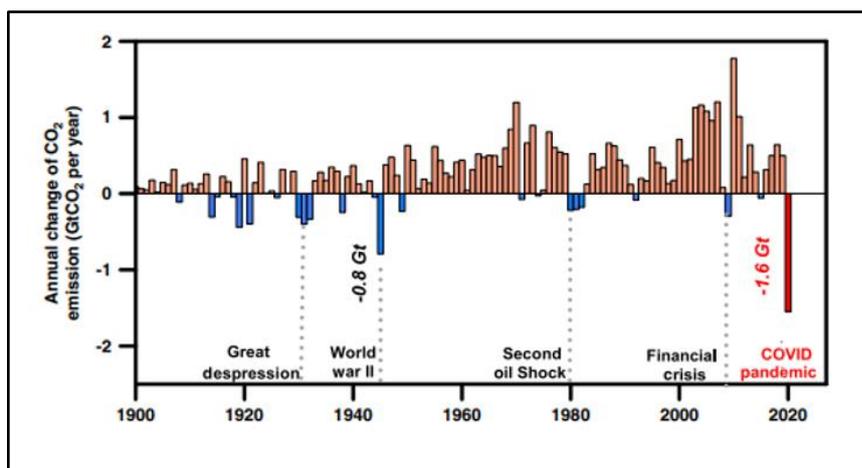


Figura 5 Cambio anual de las emisiones de CO₂ en GtCO₂/yr [9]

Las causas y efectos del cambio climático han generado numerosa literatura dentro de la comunidad científica. En este ámbito, el proyecto europeo H2020

MEDEAS ofrece una serie de orientaciones políticas para conseguir una economía baja en emisiones de carbono basada en fuentes de energía renovables. Para ello, MEDEAS utiliza un conjunto de modelos como herramienta para el estudio no solo del sector energético, sino también de otros ámbitos como la economía, la sociedad y el medio ambiente.

2.2. INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE SISTEMAS E IAMS

La dinámica de sistemas es una metodología orientada al modelado y simulación por ordenador de sistemas reales complejos en los cuales se busca tomar una serie de decisiones en base a los resultados obtenidos de la simulación. Está formada por dos conceptos: dinámica y sistemas. Los sistemas son un conjunto de elementos independientes con interacciones entre sí, formando una unidad. Los sistemas de estudio son muy variados, abarcando desde organizaciones industriales, políticas, económicas o medioambientales. Por otra parte, el concepto de dinámica se debe al estudio de sus componentes a lo largo del tiempo como consecuencia de la interacción entre ellos y los efectos que esto provoca. El objetivo básico de la dinámica de sistemas es llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema [10].

Surgió en la década de los 50 en el sector industrial, concretamente de la aplicación de la teoría de los bucles de realimentación, en un caso de gestión industrial para una empresa norteamericana dirigido por Jay. W. Forrester perteneciente al *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Forrester continuó desarrollando la aplicación originalmente industrial a sistemas urbanos, denominada dinámica urbana. Posteriormente, a finales de los 60, se elaboró el informe “Los límites del crecimiento” para el Club de Roma, que difundiría el concepto, más general, de dinámica de sistemas [11]. El modelo planteaba un estudio global de la población, la contaminación y los recursos. Su divulgación fue muy polémica, generó numerosos debates, pero en la actualidad siguen siendo vigentes las conclusiones del informe. Hoy en día, la dinámica de sistemas es ampliamente empleada en diversos campos, pero es conocido su desarrollo para los estudios ambientales, siguiendo los pasos del informe “Los límites del crecimiento”.

La evolución de la dinámica de sistemas ha dado lugar al lenguaje de programación DYNAMO, base de los programas de software actuales. Todos ellos son entornos de simulación gráficos porque permiten construir el modelo mediante iconos, formando los diagramas de Forrester. Una vez obtenidos los diagramas, se implementan las ecuaciones. Para la construcción de los modelos en estos entornos gráficos se debe seguir un proceso de elaboración



del modelo. El proceso de modelado no es unidireccional, sino que las etapas pueden realimentarse unas a otras con el objetivo de mejorar el diseño o ganar precisión en los resultados.

El proceso de modelado consta de varias partes: definición del problema, conceptualización del sistema, formalización, comportamiento del modelo, evaluación del modelo y explotación del modelo. La realización de este TFG se encuentra dentro de la última etapa del modelado.

Los modelos de evaluación integrada (IAMs) abarcan y combinan diferentes ramas de conocimiento. Sirven de herramienta para comprender la relación de un gran número de factores tecnológicos, económicos, sociales y ambientales que caracterizan nuestra sociedad. Su principal aplicación es ofrecer soluciones al cambio climático y alternativas de transición energética. Es importante no confundirlos con los modelos climáticos, son completamente diferentes. Los modelos climáticos modelan los sistemas desde el punto de vista físico, sin contemplar, por ejemplo, decisiones políticas que modifiquen los usos de combustible y las emisiones.

El primer IAM desarrollado llamado World3, basado en dinámica de sistemas, daría lugar al informe originario, previamente comentado, “Los límites del crecimiento”. Algunos IAMs están relacionados a la dinámica de sistemas, ya que recurren a ella para analizar sus comportamientos a lo largo del tiempo.

Existen en la literatura gran variedad de IAMs, a pesar de ello, todos comparten una estructura similar (Figura 6). Los modelos parten de unas entradas comunes: población, producto interior bruto (PIB) y las políticas que determinarán los comportamientos de cada escenario. Las salidas de los modelos corresponden con los resultados económicos, las emisiones o la producción. En la parte central de la estructura del esquema se interrelacionan los campos de estudio que lo conforman.

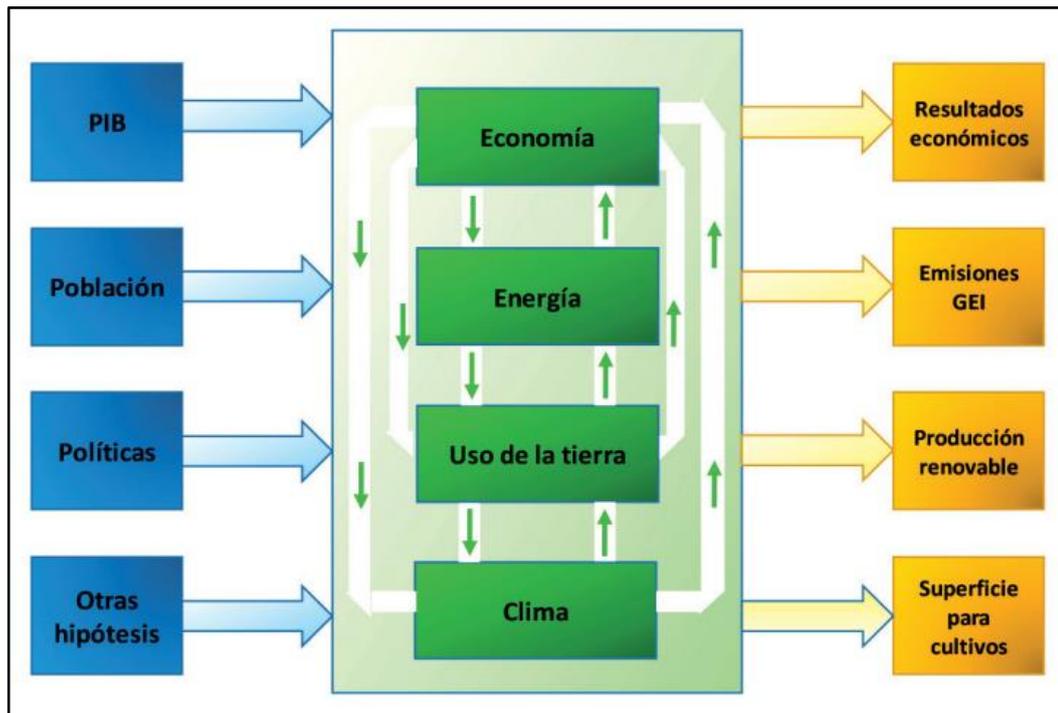


Figura 6 Estructura básica de los IAMs [12]

Históricamente, World3 recibió numerosas críticas aunque en la actualidad sigan vigentes algunas de las consideraciones que planteaba. El problema y las críticas de los IAMs, como World3, son debidas a la incertidumbre con la que trabajan. Los IAMs estipulan posibles tendencias futuras de un sistema, siendo algunos parámetros inciertos a largo plazo. Por ejemplo, se desconoce el desarrollo de posibles nuevas tecnologías. Además, existen algunos términos complejos de interpretar en el modelado, es el caso del comportamiento social. Otra situación compleja es la equidad de los modelos, siendo por ejemplo en modelos mundiales, diferentes las consecuencias climáticas entre países.

Para otorgar veracidad a los resultados, se realizan las pruebas de sensibilidad y trayectoria en la etapa de evaluación del modelo para minimizar la incertidumbre. A pesar de estas limitaciones, la evolución de los IAMs es cada vez mayor y los buenos resultados que ofrecen hacen que sean utilizados por grupos intergubernamentales como el IPCC para la mitigación del cambio climático, son el caso de IMAGE, MESSAGEix, AIM / GCE, GCAM, REMIND-MAgPIE y WITCH-GLOBIOM [13]. También El Grupo de Trabajo Interagencial de EE. UU. utiliza este tipo de modelos, DICE, PAGE y FUND son utilizados para calcular el coste social y económico de las emisiones de carbono. En dinámica de sistemas los modelos más importantes son: World3, EN-ROADS, FeliX3, iSGD model y MEDEAS [12].

2.3. MODELO DE ESTUDIO – MEDEAS_World

El proyecto MEDEAS presenta una serie de modelos de evaluación integrada homónimos al mismo. Cada uno de ellos es referido a diferentes áreas geográficas, existiendo MEDEAS-World, MEDEAS-EU y MEDEAS-país. Los modelos han sido desarrollados con el objetivo de informar en la toma de decisiones para contextos de transición energética bajo el paradigma actual y teniendo en cuenta las restricciones biofísicas, económicas, sociales y tecnológicas, así como abordar algunas de las limitaciones de los IAMs. Las características más relevantes que presentan son [14]:

- La representación de las limitaciones biofísicas a la disponibilidad energética.
- Modelado de las inversiones en minerales y energía para la transición energética, permitiendo la evaluación dinámica de la escasez de los minerales y la energía neta disponible para la sociedad.
- Representación adecuada de los daños causados por el cambio climático.
- Integración de una estructura económica sectorial detallada.
- Cambios de energía debidos a la escasez física.
- Indicadores de impacto socioeconómico y ambiental.

La estructura de MEDEAS-World, está compuesta por 9 módulos (Figura 7):

1. Economía
2. Agua
3. Uso de la tierra
4. Clima
5. Minerales
6. Demanda de energía
7. Disponibilidad de energía
8. Infraestructura energética y tasa de retorno energético (EROI)
9. Indicadores de impacto social y medioambiental.

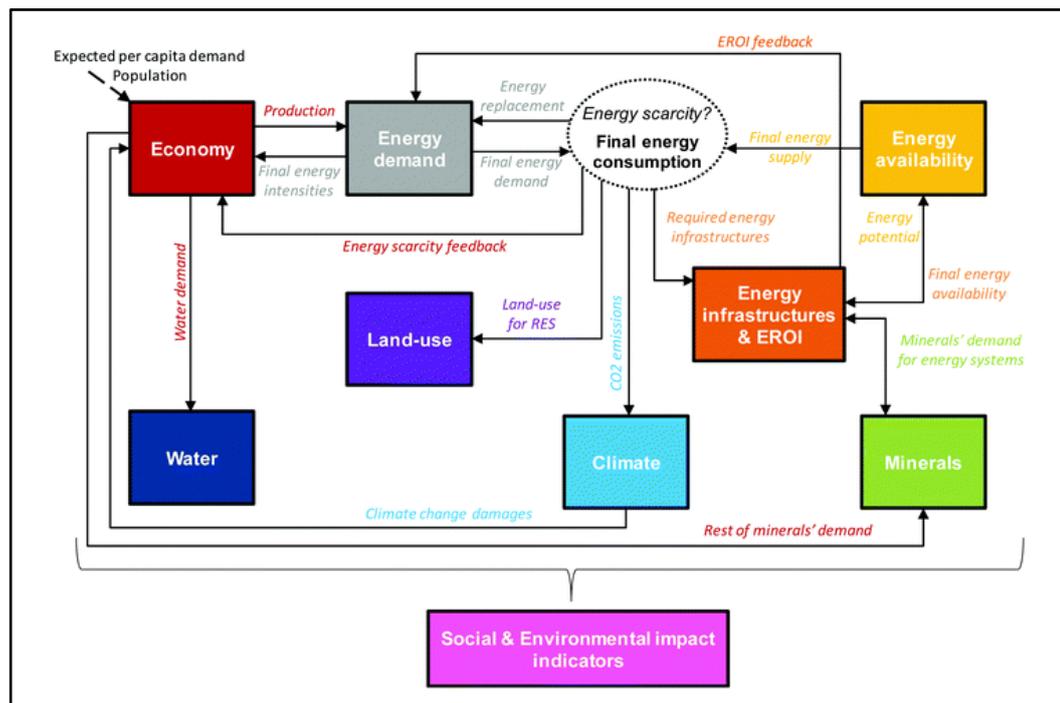


Figura 7 Estructura de MEDEAS-World [14]

La energía final es un parámetro fundamental en el sistema. Si observamos en la Figura 7 la representación de la estructura de MEDEAS-World, los módulos dependen directa o indirectamente del modelado energético, siendo por tanto núcleo principal del modelo. Se encuentran relacionados directamente: la economía; el uso de la tierra; el clima; la demanda de energía; la disponibilidad de energía; y la infraestructura energética y el EROI. La economía se vincula con la energía mediante la escasez de ella misma, ya que en el caso de que exista, se verán reflejados daños negativos sobre la economía. La energía depende del módulo de uso de la tierra, ya que la implementación de tecnología renovable se ve limitada por el espacio disponible en tierra y mar (caso de la eólica marina, la undimotriz y la mareomotriz). El clima está relacionado con la energía mediante las emisiones de CO_2 . Los diferentes módulos energéticos (demanda de energía, disponibilidad e infraestructura energética y EROI) se comunican para establecer la escasez de la energía, si la hubiese, diferenciando entre la energía disponible y la energía requerida, que además no solo es necesitada por los agentes de consumo, sino también para las propias infraestructuras que la proporcionan. En este sentido, la tasa de retorno energético (EROI, siglas en inglés) es un concepto fundamental. Resulta del cociente entre la cantidad de energía suministrada por una fuente de energía, y la energía necesaria para extraer y utilizar el recurso, según abarca la definición matemática del EROI. Indirectamente, el resto de los módulos están también vinculados formando bucles y realimentaciones. De esta forma, la influencia de la energía en el modelo es determinante para su comportamiento global.

El software empleado en la construcción de MEDEAS-World ha sido Vensim DLL. En su versión libre, el modelo está publicado en Python, gracias a la librería PySD.

Todos los datos exógenos – parámetros, series históricas y escenarios de políticas – necesarios para la simulación del modelo son modificables y están almacenados en un fichero Excel.

2.4. DIAGRAMAS SANKEY

Como hemos visto, el sector energético es de vital importancia. Su estudio es necesario para entender el funcionamiento global del sistema. Para este trabajo se ha utilizado el diagrama Sankey para el análisis de la estructura del modelado energético en MEDEAS-World.

Los diagramas Sankey son representaciones simbólicas formadas por nodos y flujos relacionados entre sí. Este tipo de diagrama posee como característica principal una anchura proporcional de los flujos y de los nodos a los valores que representan. Cada flujo se representa entre dos nodos, mostrando también la estructura y distribución del sistema representado. La representación gráfica generalmente es unidireccional, de izquierda a derecha y horizontal. En algunos casos aparecen realimentaciones, de forma que un flujo parte de un nodo posterior a un nodo anterior o al propio nodo.

Los diagramas de Sankey hacen honor a Matthew Henry Phineas Riall Sankey, un ingeniero que en 1898 fue el primero que los utilizó en una publicación para un caso de eficiencia energética en las máquinas de vapor (Figura 8) [15]. Aunque, previamente a su implementación en las máquinas de vapor su uso no sería común, existe algún caso como es el mapa de Charles Joseph Minard que muestra las pérdidas sufridas por el ejército de Napoleón durante la campaña de Rusia, sus características los pueden describir como una representación de Sankey. Tras Riall Sankey, los diagramas han sido una práctica estándar en ciencia e ingeniería [16].

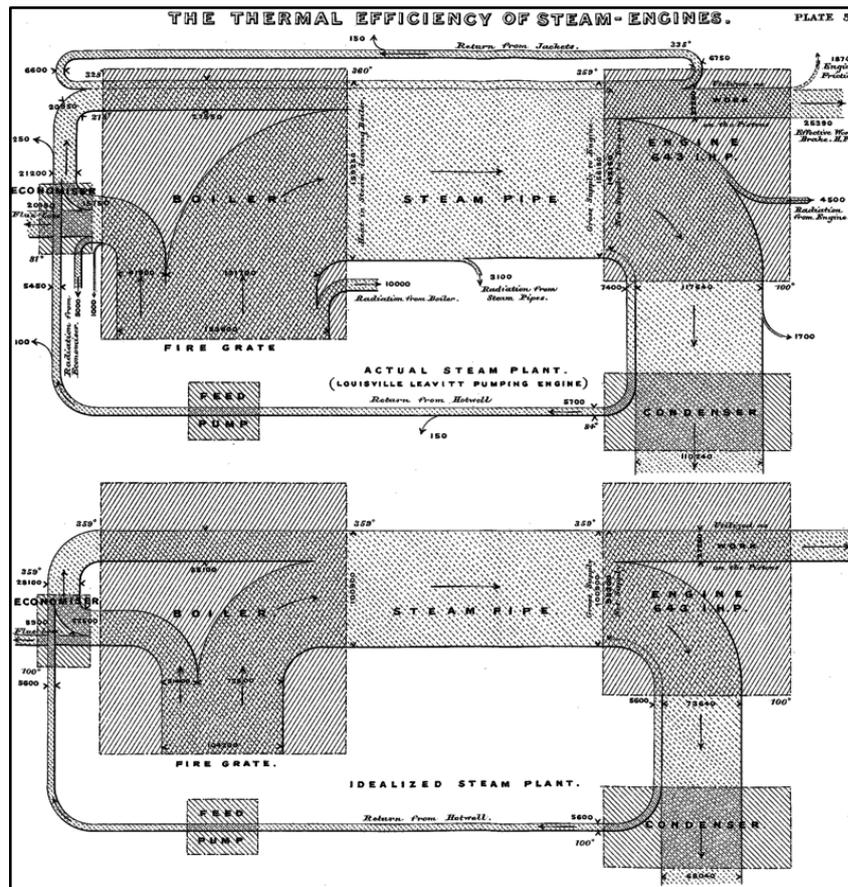


Figura 8 Diagrama de Sankey de la eficiencia de una máquina de vapor en 1898 realizado por el ingeniero que daría nombre al diagrama, Matthew Henry Phineas Riall Sankey [17]

En la actualidad, los datos y la información han aumentado exponencialmente. El efecto del *Big Data*, que consiste en el tratamiento y manipulación de los macrodatos, ha impulsado esta herramienta para la visualización de la información almacenada.

Tienen una labor pedagógica, pues permite simplificar un modelo complejo y ver las tendencias de este sin necesidad de tener conocimientos técnicos del sector. La creación de un mismo diagrama para situaciones distintas facilita la comparativa de cada una de las situaciones sin necesidad de recurrir al análisis de tablas o conjuntos de datos. Otro uso interesante de los Sankey es la detección de errores en los modelos. Los valores que utiliza requieren de un seguimiento en el modelo. Este seguimiento puede ayudar a la corrección de posibles fallos. Las variables que se relacionan en el modelo deben trabajar con las mismas unidades, de lo contrario el diagrama se deformaría visualmente facilitando la detección del dato incorrecto. Asimismo, en el sector energético no puede existir valores negativos, la producción, el consumo... deben ser mayores o iguales a cero. En el diagrama un flujo negativo no puede ser representado, de existir un flujo negativo, en los nodos intermedios se



observaría una diferencia entre el flujo total entrante y saliente, aspecto no contemplado en el uso dado a este tipo de diagramas. El principio de estos diagramas es que la suma total de las partes ha de ser igual a ambos lados del nodo.

Para la visualización de información, otros ejemplos de este diagrama son la migración poblacional, el seguimiento de las páginas web visitadas por usuarios o los costes y beneficios de un negocio. Son ejemplos de áreas muy diversas, pero el principal campo en el que se implementan sigue siendo el sector energético. En este ámbito, su funcionalidad principal es la visualización de las transformaciones y las eficiencias durante los procesos energéticos.

3. DESARROLLO DE LOS DIAGRAMAS SANKEY

Dadas las características de los diagramas Sankey y su concurrencia aplicación en el ámbito energético es la herramienta elegida para el análisis del sector energético del modelo MEDEAS-World.

El modelo contempla 5 tipos de energía: electricidad, calor, sólidos, líquidos y gases. Esta clasificación se ofrece al estado en el que se entrega la energía a los agentes de consumo. Generando un diagrama para cada categoría y uno conjunto se puede tener una visión específica (desagregada) o global (agregada) del sistema, respectivamente. A continuación, se explica el proceso de elaboración de los diagramas.

3.1. PROCEDIMIENTO

Antes de la explicación debemos tener en consideración los siguientes archivos, todos ellos necesarios para lograr una comprensión del procedimiento a seguir para la visualización de los resultados en diagramas Sankey.

ARCHIVO VDFX

El archivo VDFX es obtenido al simular el modelo y contiene los valores de todas las variables en el periodo de tiempo establecido en los ajustes de la simulación.

El modelo contiene datos históricos a partir del año 1995, año establecido como inicio de la simulación. En el caso de la finalización de la simulación se puede elegir cualquier año, pero se ha establecido el año 2100 como referencia máxima futura.

ARCHIVOS LST

Los archivos LST contienen el nombre de las variables que se desean extraer y los elementos de los subíndices. Todos los archivos LST se generan manualmente. Se ejemplifica en la Figura 9 varios nombres de variables y su correspondiente elemento del escenario introducidos en un archivo LST.

```
FE Elec generation from bioE EJ[BAU]  
FE Elec generation from oceanic EJ[BAU]  
FE Elec generation from onshore wind EJ[BAU]  
FE Elec generation from offshore wind EJ[BAU]
```

Figura 9 Muestra de nombres de variables introducidos en un archivo LST

La creación de los LST es manual y debe cumplir estrictamente con unos requisitos. Se debe introducir el nombre completo de todas las variables y el elemento del subíndice que se desee. Por un lado, existen algunas variables con caracteres problemáticos para Vensim. Para estas variables Vensim las introduce entre comillas (Figura 10), por tanto, estas deben tenerse en cuenta a la hora de añadirlas en el archivo LST. Por otro lado, la variable debe incluir el elemento específico del subíndice, no el nombre general del subíndice. Es decir, un subíndice es Escenarios (*Scenarios*) y los elementos del subíndice son BAU, SCEN1, SCEN2, ... No se puede utilizar el nombre general del subíndice porque se extraería el valor de cada elemento que contenga ese subíndice. En el caso de querer extraer dos elementos del mismo subíndice en el mismo archivo, se repetirá la variable en el archivo cambiando el nombre del elemento del subíndice. Además, como se verá en la parte de programación, las variables de los archivos LST deben contener el mismo número de subíndices. En nuestro caso, únicamente uno y es el correspondiente al escenario.

```
"FE Elec generation from geot-elec EJ"[BAU]
```

Figura 10 Variable insertada en archivo LST entre comillas por contener un carácter problemático para Vensim

Este tipo de archivos se pueden editar con el Bloc de notas. El Bloc permite buscar y reemplazar palabras de manera rápida, una función muy utilizada para generar un LST con las mismas variables, pero con el elemento de subíndice Escenario distinto. De esta forma se obtendrán los LST de escenarios distintos para evaluar las diferencias de los diagramas.

ARCHIVOS CSV

Los archivos CSV son producto de los listados de las variables generadas (archivos LST). El funcionamiento de la extracción se limita a escoger los valores de las variables para los años seleccionados, datos que se encuentran en el VDFX y los guarda con el formato indicado. Este formato tiene toda la información separada por comas. La primera fila del archivo está reservada para la variable tiempo con el año que se ha seleccionado de extracción. Las siguientes filas corresponden con los nombres de las listas junto con su subíndice y su valor (Figura 11).

1	Time,2015			
2	PE losses uranium for Elec EJ[BAU],17.8057			
3	nuclear generation nuclear elec EJ[BAU],8.90285			
4	FE Elec generation from hydro EJ[BAU],13.9489			
5	FE Elec generation from geot-elec EJ[BAU],0.227208			
6	FE Elec generation from bioE EJ[BAU],1.30369			
7	FE Elec generation from oceanic EJ[BAU],0.00343941			
8	FE Elec generation from onshore wind EJ[BAU],2.80735			
9	FE Elec generation from offshore wind EJ[BAU],0.130648			
10	FE Elec generation from solar PV EJ[BAU],1.17761			

Figura 11 Archivo CSV (11 primeras líneas)

Vensim contiene una función para la extracción de los datos (*Export Dataset*). Esta función la podemos encontrar en el desplegable Modelo (*Model*). El primer paso de exportación es seleccionar la simulación guardada en el formato VDFX. A continuación, debemos seleccionar las opciones de exportación (Figura 12):

- Exportar a (*Export to*): se escribe el nombre del archivo a exportar.
- Exportar como (*Export as*): se selecciona el formato en el cual queremos extraer los datos. La opción elegida es CSV debido a su optimización en la extracción de los datos en comparación con un archivo de Excel (XLS o XLSX). Los datos en CSV también se pueden abrir con Excel, tienen una eficiencia de escritura alta igual a los archivos txt y el tamaño del contenido generado es mucho menor que el de los archivos Excel.
- Lista guardada (*Save list*): se selecciona el archivo LST con las variables que se quieren extraer. En el caso de disponer de más de un LST, se debe repetir el proceso completo.
- Tiempo de ejecución (*Time running*): se puede seleccionar recorrer los datos de forma ascendente o descendente en el tiempo.
- Posición subíndices (*Put subscripts*): se puede seleccionar la colocación del subíndice junto con la variable o en otra columna.
- Tiempo desde/hasta/con el intervalo (*Time from/to/with interval*): se puede seleccionar el rango y el paso de la extracción. Los diagramas solo se pueden implementar en un año de la simulación. Por tanto, se debe seleccionar el rango de un año y el paso mayor que uno.
- Selección de otras características: se puede añadir datos, eliminar el tiempo, escribir las unidades o escribir los números en el formato europeo.

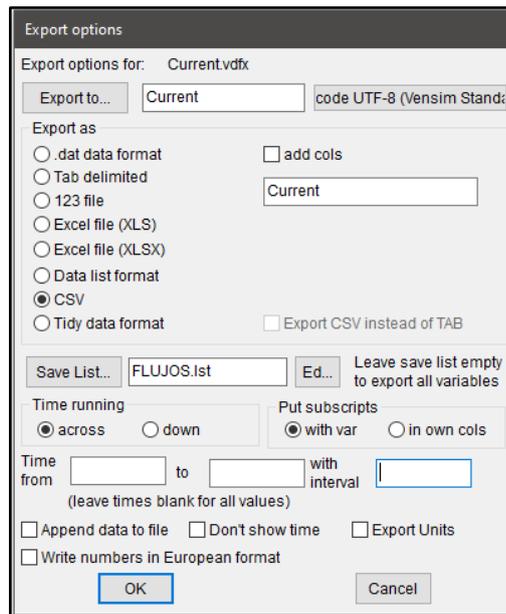


Figura 12 Opciones de exportación en Vensim

Conocidos todos los archivos necesarios, la elaboración de cada diagrama es común y se divide en dos partes: extracción y representación de los datos. En la Figura 13 se ilustra un esquema del procedimiento a seguir para obtener los diagramas. Para cada representación se necesita un archivo VDFX y los archivos LST correspondientes a los nodos y los flujos, que juntos generan los archivos CSV que se importan en el código desarrollado en Python para obtener los diagramas en código HTML.

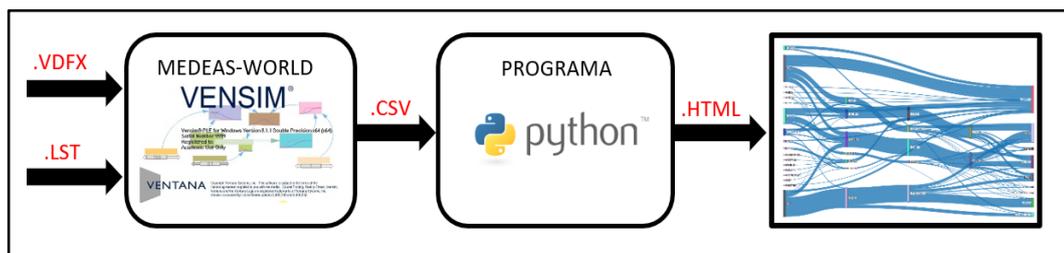


Figura 13 Procedimiento para obtener el diagrama Sankey

3.1.1. EXTRACCIÓN DE LOS DATOS

En Vensim, se construyen manualmente dos archivos LST para extraer los datos de los flujos y nodos salvados durante la simulación en el archivo VDFX. Los datos extraídos en los archivos CSV tienen la información de los flujos que se emplea para la creación del diagrama Sankey, mientras que la de los nodos

nos permitirá comprobar que la suma de flujos entrantes y salientes es la misma e igual al valor del nodo. La extracción de estos archivos debe hacerse en la misma carpeta que el código *Python*

SELECCIÓN DE LAS VARIABLES

La selección de variables en los archivos LST requiere de un perfecto conocimiento del modelado energético en MEDEAS-World, seguimiento realizado desde las fuentes primarias de energía hasta los consumos finales de energía en los sectores económicos. El modelo consta de miles de variables distribuidas en más de un centenar de pestañas.

El modelado energético de MEDEAS-World se desarrolla en tres esferas diferentes: energía requerida, disponible y suministrada (bajo el prefijo “real” en el modelo). La primera viene determinada por las necesidades de los agentes de consumo. La segunda es dependiente de la capacidad de máxima extracción de los recursos energéticos (infraestructuras). Finalmente, la tercera depende de si existe o no escasez, situaciones representadas en la Figura 14. Si la energía requerida es mayor a la disponible, la energía suministrada es igual a la disponible. En el caso contrario, si la energía requerida es menor que la disponible, la suministrada es igual a la requerida.

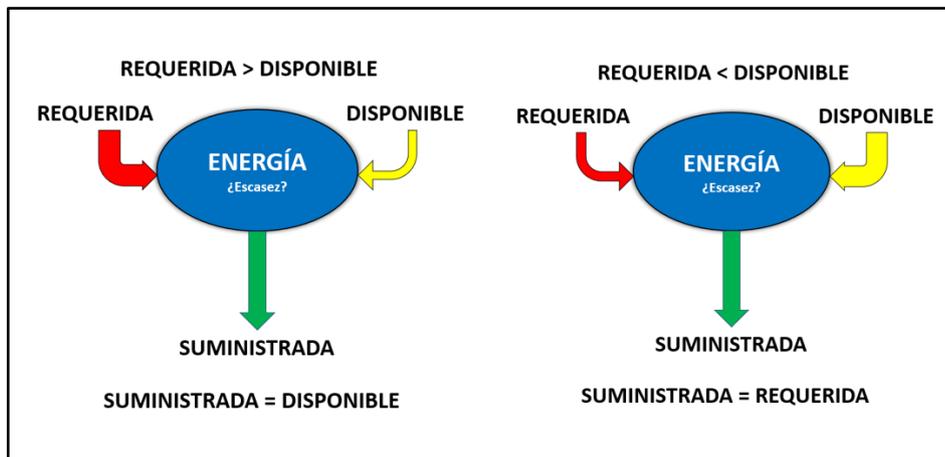


Figura 14 Esquema del sector energético de MEDEAS-World donde se compara la energía requerida y disponible para determinar la energía suministrada

Este detalle es importante para la selección de las variables, siendo necesaria en esta ocasión las variables de energía suministrada, normalmente nombradas como “*real generation*”.

Vensim ofrece herramientas para facilitar la tarea de seguimiento. La opción *Find* permite buscar una variable por su nombre y *Find Again* permite buscarla en todas las pestañas en las que aparece. El seguimiento causal, clasificando las variables en diagramas de árbol según sus dependencias, pueden visualizarse mediante los botones de la Figura 15, en función de si queremos visualizar las dependencias previas o posteriores a la variable seleccionada, respectivamente.



Figura 15 Bloque de botones de diagramas de influencia

El modelo clasifica la energía en 5 tipos: electricidad, calor, sólidos, líquidos y gases. Para cada tipo existen una serie de fuentes de energía, que en algunos casos son comunes. En la Tabla 1 se muestran todas las fuentes que considera el modelo.

Tabla 1 Fuentes de energía para cada tipo de energía del modelo MEDEAS-World

FUENTE DE ENERGÍA	TIPO DE ENERGÍA
<ul style="list-style-type: none"> • Hidráulica (<i>hydro</i>) • Geotérmica (<i>geot-elec</i>) • Biomasa (<i>bioE</i>) • Oceánica (<i>oceanic</i>) • Eólica de interior (<i>onshore wind</i>) • Eólica marina (<i>Offshore wind</i>) • Solar de paneles fotovoltaicos (<i>solar PV</i>) • Solar de concentración (<i>CSP</i>) • Carbón (<i>coal</i>) • Petróleo (<i>oil</i>) • Gas natural (<i>nat. gas</i>) • Cogeneración mediante combustibles fósiles (<i>CHP</i>) • Nuclear • Biogás (<i>biogas</i>) • Residuos (<i>waste</i>) 	<p>ELECTRICIDAD</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Solar (solar-heat) • Geotérmica (geot-heat) • Biomasa (bioE-heat) • Biogás • Carbón • Petróleo • Gas natural • Cogeneración mediante los combustibles fósiles • Cogeneración mediante el calor producido en las centrales nucleares • Residuos 	<p>CALOR</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Carbón • Carbón vegetal (charcoal) • Biomasa tradicional (PE traditional biomass EJ delayed 1yr) • Turba (peat) • Residuos 	<p>SÓLIDOS</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Petróleo • Otros líquidos suministrados (Other liquids supply) 	<p>LÍQUIDOS</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Gas natural • Biogás 	<p>GASES</p>

Para algunos casos como el petróleo (*oil*), su forma de extracción queda reflejada en la división de esta fuente energética entre convencional y no convencional (*fracking*). Esta subdivisión se ofrece a la importancia de diferenciar entre distintas fuentes de emisiones de efecto invernadero. Por otra parte, el calor se subdivide a su vez entre comercial (sujeto a las reglas del mercado de la energía) y no comercial (estimación del consumo informal de calor). Otro criterio en el modelado ha sido la subdivisión de las fuentes energéticas entre renovables y no renovables, agrupándose bajo estos términos variables de energías finales, generadas, electricidad o de calor. Sólidos, líquidos, y gases se agrupan directamente en la energía final consumida.

El modelo estudia el proceso de generación y transformación hasta los agentes de consumo, estimando las pérdidas durante los procesos de transformación entre energías primarias y finales, así como las debidas a la distribución y

transporte. Se tienen las energías finales de electricidad, calor, sólidos, líquidos y gases. En la economía de este modelo, la energía es consumida por 35 sectores, congregados en 7 sectores unificados (*unified sectors*): industria, eléctrica, hogares, servicios, agricultura, industria de la construcción y transporte.

Los modeladores utilizan un enfoque *top-down* (de arriba hacia abajo) que abarca hasta el consumo de energías finales, sin contemplar el rendimiento que puedan tener en sus sectores de consumo, tales como el rendimiento de calderas en el sector de la metalurgia o de baterías de maquinaria eléctrica. El modelado bebe de las intensidades energéticas de las tablas input-output económicas para calcular las necesidades energéticas. Es un caso excepcional el sector transporte, ya que parte de las necesidades sociales de los diferentes medios de transporte para ir agregando consumos hasta el cálculo de las energías finales en el transporte, de abajo a arriba (método *bottom-up*).

CREACIÓN DE VARIABLES

Una vez realizado el seguimiento, el modelo nos aporta toda la información para generar el Sankey. Sin embargo, los datos en algunos casos vienen implícitos, es decir, no existe la variable concreta que contenga el valor requerido o la variable que lo contiene no se puede extraer. Existen dos posibles soluciones. La primera opción utilizada fue el cálculo de aquellas variables que se necesitasen mediante el programa de *Python* con la importación de aquellas de las que sí se dispone. La segunda opción, finalmente utilizada, ha sido crear las variables necesarias en el propio modelo a partir de las ya dadas, optimizando el código, evitando realizar un exceso de importaciones por la diferencia de subíndices de las variables y evitando los cálculos en el programa. Existen varias razones que causen esta situación:

- **Unidades:** las variables energéticas del modelo pueden venir en Exajulios (EJ) o en Teravatios-hora (TWh). La extracción debe ser para todas las variables con las mismas unidades. Están extraídas en Exajulios, por lo que algunas han sido creadas a partir de las variables deseadas en TW-h. La relación de unidades es $1 \text{ EJ} = 277,78 \text{ TW-h}$.
- **Pérdidas:** en el modelo se multiplican las variables por la eficiencia para obtener la variable final, siendo en algunas situaciones obviada la cantidad restante de pérdidas.

- Agrupaciones: se crean variables que contienen la suma de otras, estas variables creadas son nodos del diagrama.
- Subíndices: las variables pueden contener varios subíndices. Para la programación, las variables deben tener el mismo número de subíndices, por lo que se crean las variables necesarias para no utilizar aquellas con diferente número de subíndices. Esta situación es dada en las fuentes de energía renovables de electricidad y calor, agrupadas en los subíndices “RES elec” y “RES heat”.
- Variable *share*: un concepto muy interesante para la partición de la energía entre las diferentes categorías. El modelo utiliza estas variables de forma que los recursos se reparten dinámicamente en función de las necesidades del sistema. Las funciones que utilizan las variables *share* dependen de la energía requerida. En el caso de sólidos, líquidos y gases, la utilización de estas variables solamente aparece en la ecuación de la variable de energía final consumida. Es decir, las variables previas que la componen no están multiplicadas por el *share*. Por ello, se han creado aquellas variables previas que se veían afectadas por esta variable.

Todas las variables creadas se encuentran en las tablas 2-6 ubicadas en el ANEXO II.

3.1.2. REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS EN PYTHON

Existían varias opciones para el diseño del diagrama. La opción elegida ha sido mediante el lenguaje de programación *Python*. Las razones son varias. Es una opción gratuita y solamente requiere del software libre para compilar y ejecutar el código desarrollado, descartando cualquier software de pago para diseñar los diagramas, como podría haber sido e!Sankey [18]. Además, dentro de los lenguajes de programación existentes, *Python* es un lenguaje interpretado que se caracteriza por su sencilla legibilidad. Por ello, se descartaron otros lenguajes como R. En este lenguaje se ha encontrado un objeto gráfico para implementar este diagrama concreto, desarrollado por *Plotly*, un conjunto de librerías gráficas. Los diagramas Sankey se obtienen de la modificación del código fuente mostrado en los ejemplos de la página oficial de *Plotly* [19]. El código modificado queda expuesto en el ANEXO I.

El código del programa se desarrolló en *Jupyter Notebook*. Es una aplicación web de código abierto que permite crear documentos que contienen código en vivo, ecuaciones, visualizaciones y texto narrativo. Los usos incluyen: limpieza y transformación de datos, simulación numérica, modelado estadístico,

visualización de datos [20]. Es la opción elegida por su sencilla manejabilidad para ejecutar particiones de código y mostrar las variables que se utilizan durante el programa.

Pandas [21] es una librería especializada en el manejo y análisis para el tratamiento de los datos. Permite leer los archivos en CSV, acceder a los datos mediante los índices, filas o columnas y combinar los conjuntos de datos. Dispone de tres estructuras de datos (*Serie*, *DataFrame* y *Panel*), en este caso se necesita la estructura de dos dimensiones, por lo que se utiliza *DataFrame* (marco de datos). Se caracteriza por realizar las operaciones de manera muy eficiente. La importación de datos se realiza mediante esta librería. Los nombres de filas y columnas son reescritos manualmente para clarificar su significado visualmente en el diagrama. Ha de tenerse en cuenta que las variables importadas deben incluir el mismo número de subíndices (*subscript*). Es por ello por lo que se tienen tantos CSV importados como variables con diferente número de subíndices se tengan (aspecto mencionado en la siguiente subsección, AUTOMATIZACIÓN).

Las tablas de nodos poseen tres características principales: nombre, valor y color. Las tablas de flujo reflejan cuatro características: origen (*source*), destino (*target*), color y valor. Tanto el origen como el destino contienen la referencia al índice del nodo correspondiente, determinando las uniones de flujos y nodos. Este trabajo es manual mediante observación de las propias tablas.

El color de los nodos se genera aleatoriamente mediante código propio basado en la librería *Numpy*. El color de los flujos empleado es el mismo para todos los casos.

Una vez realizado este trabajo manual, el resto de los pasos en el código son automáticos, y se explican en la siguiente subsección. La figura de la representación Sankey creada puede ser exportada en formato HTML (función *fig.write_html*) para luego ser usada en sitios web de distinta índole, tales como la entrada al blog desarrollado para este TFG.

En el caso del diagrama completo, se realiza una reutilización del código utilizado para los diagramas desagregados. De esta forma la generación de las listas de origen y destino son más sencillas. En los LST, se encuentran las variables empleadas en los diagramas parciales. En el caso de los nodos, existen una serie de nodos que no se utilizan para la visualización. Por ejemplo, el carbón es utilizado en varios diagramas como fuente de energía primaria, por lo que existe un nodo de carbón por cada tipo de energía que lo emplee como recurso, pero para el diagrama completo, únicamente será necesario uno



de los nodos. En el caso de los flujos, algún dato no se incluye por su poca relevancia para no sobrecargar el diagrama.

Se muestra un código ejemplo del código de Python en el ANEXO V.

AUTOMATIZACIÓN

Esta subsección tiene el propósito de explicar el trabajo realizado sobre el código original para la automatización de la lectura de variables desde Vensim, más concretamente desde el modelo MEDEAS-World.

Los códigos escritos en Python para generar los diagramas Sankey de este trabajo siguen la misma estructura y procedimiento. La modificación manual de los nombres de los flujos en las listas de origen y destino, por una parte, y de los nombres de los nodos para su mejor visualización por otra, nos han llevado a valorar la automatización de estos pasos en el código.

Existen variables en el modelo como “Final energy consumption by unified sector and final fuel” (Figura 16), las cuales incluyen toda la información necesaria para conectar nodos de forma automática. Esto ocurre solo cuando los elementos de los subíndices son los propios nodos del diagrama. El ejemplo con esta variable puede visualizarse en la Figura 17, en la cual se observan los elementos del subíndice *final energy* a la izquierda, y los del subíndice *unified sector* a la derecha. Además, podemos nombrar los nodos con los nombres de los elementos de los mismos subíndices, automatizando del todo el diagrama. Por ello, al código se añade un tercer CSV porque al poseer esta variable tres subíndices no pueden ser importada simultáneamente con el resto de variables de un subíndice.

fragmento de este con tres variables. Puede observarse que algunos símbolos nos ayudarían a realizar el seguimiento de variables. Tal es el caso del símbolo igualdad “=”. Ante la introducción de una serie de variables, a la izquierda de este símbolo quedarían los orígenes, a la derecha los posibles destinos. La lectura y automatización en código de esta tarea requiere un trabajo no abarcado en este TFG, pero que asienta la idea para futuros desarrollos.

```
dynFEnUst_new_cap_RES_elec[RES_elec]=
  dynFEnUst_intensity_new_cap_RES_elec[RES_elec]*RES_elec_capacity_under_construction_TW\
  [RES_elec]
  ~
  ~ EJ
  ~ Dynamic energy used (in final terms) for the construction of new capacity \
  of RES elec. Dynamic variable affected by recycling policies.
  |

Embodied_FE_intensity_clean_water=
  Embodied_PE_intensity_clean_water*final_to_primary_energy_2015
  ~
  ~ MJ/kg
  ~ Embodied final energy intensity for clean water consumption in RES plants \
  for generation of electricity.
  |

Embodied_FE_intensity_distilled_water=
  Embodied_PE_intensity_distilled_water*final_to_primary_energy_2015
  ~
  ~ MJ/kg
  ~ Embodied final energy intensity for distilled water consumption in RES \
  plants for generation of electricity.
  |
```

Figura 18 Muestra de una parte del modelo MEDEAS-World en formato de texto



4. RESULTADOS

Los códigos HTML generados permiten visualizar los diagramas desagregados de electricidad, calor, sólidos, líquidos y gases. Asimismo, el conjunto de los diagramas da lugar al diagrama completo del sector.

Los datos exportados del modelo corresponden con años y escenarios diferentes. El objetivo ha sido poder comparar los diagramas y obtener una serie de conclusiones a partir de las diferencias observadas. Los años y escenarios seleccionados son los siguientes:

- Escenarios:
 - Business As Usual (BAU, siglas en inglés de Tendencias Actuales en economía): bajo la narrativa de un escenario correspondiente con el crecimiento global actual.
 - SCEN4: bajo la narrativa de un escenario de decrecimiento económico, es decir, reducción del consumo en los agentes económicos (hogares, industrias, servicios, etc) y fomento de las energías renovables.
- Años:
 - 2015: año histórico de referencia en el modelo más próximo a la actualidad. Este año es el utilizado para todos los diagramas desagregados
 - 2050: año futuro de referencia para analizar los diferentes desarrollos y tendencias energéticas de los escenarios.

4.1. DIAGRAMAS DESAGREGADOS

Los valores de los diagramas desagregados están establecidos en el año 2015. El escenario utilizado es indiferente debido a ser un año histórico de referencia y poseer todas las variables el mismo valor independientemente del escenario.

Los diagramas nos muestran todas las fuentes de energía de cada uno de los tipos de energía, cuáles son las más influyentes y la cantidad entregada a los sectores de consumo.

ELECTRICIDAD (ANEXO III, Figura 21)

Los combustibles fósiles predominan en la generación de electricidad. El carbón es el principal suministro (9514 TWh), a pesar de su baja eficiencia, menos del 50%. Sus pérdidas son superiores al nodo correspondiente a toda la energía final producida por no renovables. El gas natural es el segundo mayor recurso utilizado (4141 TWh). La obtención del gas natural por métodos convencionales es mayoritaria. Ambos métodos, también tienen una eficiencia inferior al 50%. En menor proporción se encuentran la energía por cogeneración y el petróleo con similares eficiencias.

Las fuentes renovables, aunque son 8, tienen muy baja producción a excepción de la hidráulica, la más desarrollada y empleada de todas ellas. La energía hidráulica es el tercer mayor flujo del sistema (3875 TWh). Solamente tres fuentes renovables más superan los 100 TWh, la biomasa, la eólica de interior y la solar de paneles fotovoltaicos. Todas ellas con valores inferiores a los 1100 TWh.

Entre el resto de las posibilidades, destaca la energía nuclear, representa el cuarto mayor flujo, aunque las centrales nucleares la peor eficiencia del sistema con un 33%.

La energía final entregada a los sectores de consumo es el 91% de la energía final generada, siendo el 9% restante pérdidas de distribución y transporte. El sector con mayor consumo eléctrico son la industria (8400 TWh) seguido por los hogares (5746 TWh), el sector servicios (4960 TWh) y el sector eléctrico (1936 TWh). El resto de los sectores, agricultura, transporte e industria de la construcción tienen un consumo menor de 600 TWh.

CALOR (ANEXO III, Figura 22)

Al igual que en la generación de electricidad, los combustibles fósiles predominan en la generación de calor. El gas natural es el recurso que mayor cantidad de energía suministra al sistema (10874 TWh). La energía primaria del petróleo es menor que la del carbón, pero debido a la mejor eficiencia del petróleo la energía final de calor generada es similar, ambos valores próximos a 7800 TWh. En los tres combustibles fósiles, las eficiencias para generar calor son mejores que para generar electricidad. La extracción de todos ellos, dividida en función de si es calor comercial o no comercial, es predominante para calor no comercial. La producción de energía por cogeneración, también agrupada dentro de las no renovables, en este caso dispone de dos posibles

fuentes (a diferencia de la cogeneración para la producción de electricidad), su influencia es reducida, pero mayor utilizando los combustibles fósiles.

Las fuentes renovables para obtener calor tienen valores muy inferiores, la cantidad total facilitada es 2233 TWh, siendo 27996 TWh la cantidad total mediante no renovables. Su producción en general también es no comercial y la que mayor desarrollo presenta es la biomasa. Otra fuente independiente como los residuos tampoco aportan gran cantidad de energía en comparación con los combustibles fósiles.

La energía final entregada a los sectores de consumo es el 94% de la energía final generada, siendo el 6% restante pérdidas de distribución y transporte, un porcentaje algo menor que para la electricidad. Los agentes de consumo de mayor peso en el sistema se mantienen, siguen siendo industria, hogares y servicios.

SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASES (ANEXO III, Figura 25, Figura 25, Figura 25)

Los diagramas de sólidos, líquidos y gases no presentan pérdidas por transformación de la energía, ya que las pérdidas por convertir la materia en electricidad o calor se produce dentro de los propios sectores de consumo, por lo que las pérdidas no están contempladas en el modelo.

En el caso de los sólidos (Figura 23), la proporción de los suministros es: 81,6% para el carbón, 16,5% para la biomasa tradicional, 1,65% para el carbón vegetal, 0,2% para los residuos e inferior del 1% para la turba de un total de 13135 TWh. Esta cantidad se divide entre otros requerimientos de los sólidos (1569 TWh), CTL (48 TWh) y la energía final para los sectores de consumo (11518 TWh). El consumo es realizado primordialmente por los hogares (5096 TWh) y la industria (5020 TWh).

En el caso de los líquidos (Figura 24), el petróleo extraído convencionalmente representa el 92% de toda la producción, el porcentaje restante se divide a partes iguales entre petróleo extraído de forma no convencional y otros líquidos. La cantidad de energía en forma de líquidos entregada a los sectores unificados es 30735 TWh de los 36684 TWh totales, la cantidad restante es entregada a otros usos no energéticos de los líquidos. En esta situación, el consumo mayoritario es realizado por transporte (15616 TWh) muy superior a industria (5214 TWh) o servicios (5007 TWh).

En el caso de los gases (Figura 25), dos únicas fuentes de energía, gas natural y biogás, siendo esta segunda apenas utilizada (21 TWh). El gas natural convencional es fundamentalmente la base de toda la producción con 3627 TWh frente al gas natural no convencional con 655 TWh. Los gases son suministrados principalmente a industria (1728 TWh) y hogares (1234 TWh). A parte de la entrega a los sectores, mínimamente se utilizan los gases para GTL (21 TWh).

4.2. DIAGRAMAS DE SANKEY DEL SECTOR ENERGÉTICO COMPLETO

Diagrama completo (BAU, 2015) (ANEXO IV, Figura 26)

Es un conjunto de los diagramas explicados anteriormente. Se muestran los nodos de la energía primaria procedente de los combustibles fósiles, las fuentes renovables, la energía nuclear, el biogás, los residuos y el resto de las posibilidades agrupadas juntas (cogeneración, biomasa tradicional, turba, carbón vegetal y otros líquidos).

El uso de los combustibles fósiles se evidencia aún más en este gráfico. El nodo de carbón representa 48564 TWh, el de petróleo 47538 TWh y el de gas natural 28255 TWh, valores altísimos que determinan la mayor parte de la producción mundial de energía.

La energía consumida clasificada en las 5 categorías se encuentra muy repartida. El principal tipo de energía utilizada es en forma de líquidos (30735 TWh), a continuación, calor (28575 TWh) y electricidad (22294 TWh). La energía en forma de sólidos (11518 TWh) y sobre todo los gases (4282 TWh) tienen menor peso en el sistema.

El consumo total de los sectores nos muestra cual es el que mayor uso energético requiere, la industria (34529 TWh). En segundo lugar, los hogares (23299 TWh), en tercer lugar, el transporte (16520 TWh) y en cuarto lugar los servicios (14555 TWh). El sector eléctrico (4781 TWh), la agricultura (2580 TWh) y la construcción (1131 TWh) se encuentra en un segundo plano con valores inferiores. En la industria y en los hogares, el flujo de mayor peso es el correspondiente al calor, a diferencia del transporte, con prácticamente la totalidad de energía perteneciente a los líquidos. Para el sector servicios, también los líquidos son el flujo de mayor valor junto con la electricidad ya que poseen valores muy próximos.

Diagrama completo (BAU, 2050) (ANEXO IV, Figura 27)

El diagrama nos permite compararlo con el sistema energético en 2015. Este diagrama nos muestra el sector energético siguiendo con las mismas políticas económicas actuales.

La primera diferencia se encuentra en la mayor influencia de las energías renovables en el sistema. En la producción eléctrica (23594 TWh), mayoritariamente se han impulsado la energía procedente de paneles fotovoltaicos (16994 TWh) y la eólica de interior (4143 TWh). En la producción calorífica, también se ha desarrollado la inversión en renovables. Las tres fuentes, solar (7044 TWh, no comercial), biomasa (4143, no comercial) y geotérmica (6135 TWh, no comercial) producen la mayor parte de la energía, 17683 TWh de los 18863 TWh que contiene el nodo de energía final de calor generada. Destaca la baja eficiencia de la energía solar para el calor, inferior al 20%.

Consecuentemente, los valores de carbón, gas natural y petróleo tienen un descenso notable. Para electricidad y calor, los nodos no superan los 1100 TWh.

En sólidos, el carbón deja de ser el recurso principal dominante (3902 TWh), debido a la evolución de la biomasa tradicional (3700 TWh, agrupada en “*PE OTHERS SUPPLY*”). En líquidos, no hay grandes cambios ya que el petróleo continua como el recurso más recurrido (21876 TWh). En gases, el gas natural (3364 TWh) sigue siendo la fuente principal a pesar de un ligero crecimiento del biogás.

La energía final consumida para cada categoría es: electricidad (20171 TWh), calor (17771 TWh), sólidos (7550 TWh), líquidos (18465 TWh) y gases (2870 TWh).

En cuanto a los agentes de consumo, el orden sigue siendo el mismo, industria (24715 TWh), hogares (13016 TWh), transporte (11455 TWh), servicios (10111 TWh), eléctrico (5309 TWh), agricultura (1408 TWh) y construcción (814 TWh). Los valores obtenidos no concuerdan con crecimiento económico y energético. Únicamente dos sectores tienen valores superiores, el sector eléctrico y la agricultura. El resto tienen valores significativamente más bajos, por ejemplo, la industria desciende 10000 TWh.

La razón reside en el comportamiento del modelo MEDEAS-World. El sistema global no puede permitirse un crecimiento exponencial constante (predominio de bucles positivos), llegando a colapsar. El sistema no soporta tan alto

consumo de recursos y las emisiones de GEIs aumentan el cambio climático antropogénico y consecuentemente sus efectos adversos, llegando a una situación de escasez energética que provoca el colapso. La aparición de las energías renovables es previsiblemente tardía y no soluciona la extracción de recursos porque las propias fuentes de energía requieren de determinados materiales para su construcción y mantenimiento. Una economía aparentemente de crecimiento se ha convertido en una economía decrecentista con un planeta gravemente deteriorado y explotado que no alienta al optimismo.

Diagrama completo (SCEN4, 2050) (ANEXO IV, Figura 28)

El diagrama nos permite ver comparativamente el desarrollo del sector energético bajo otras premisas políticas.

Las fuentes renovables predominan en el diagrama, aún más si cabe que en la situación anterior. En la generación eléctrica prima el uso de las placas fotovoltaicas (14793 TWh) y la eólica de interior (3188 TWh). Un mayor crecimiento en el uso de las renovables se observa en la generación de calor con respecto al diagrama anterior. Se observa que la energía geotérmica desarrolla un crecimiento tanto en la no comercial (8078 TWh) como en la comercial (1849 TWh). La energía solar (6629 TWh, no comercial) y la biomasa (38885 TWh, no comercial) tienen un comportamiento similar.

La generación eléctrica y calorífica mediante combustibles fósiles es todavía menor con valores inferiores a los 250 TWh.

En sólidos, la biomasa tradicional se convierte en el recurso más utilizado en la producción de sólidos (5371 TWh). La situación para líquidos y gases sigue los mismos patrones, mayor influencia del petróleo (15120 TWh) y gas natural (4802 TWh).

La energía final obtenida de cada categoría es: electricidad (17032 TWh), calor (19990 TWh), sólidos (8376 TWh), líquidos (11265 TWh) y gases (3895 TWh).

Esta energía es entregada a los sectores de consumo: industria (17816 TWh), hogares (15931 TWh), transporte (6012 TWh), servicios (12322 TWh), eléctrico (6303 TWh), agricultura (1490 TWh) y construcción (683 TWh).

Los valores obtenidos si corresponden con el comportamiento esperado, valores inferiores a los obtenidos en 2015, de acuerdo con una política de decrecimiento. Únicamente se observa un mayor valor en el sector eléctrico. En

comparación con el segundo diagrama, los valores obtenidos son superiores en el sector del hogar, en el sector servicios, en el sector eléctrico y en la agricultura. Es decir, en el ámbito energético, los valores son iguales o incluso superiores en cuanto a consumo. La gran diferencia reside en el decrecimiento de este escenario. El decrecimiento del sector no se debe a ningún colapso, es un decrecimiento controlado, en ningún momento se produce escasez energética, solamente reducción del consumo. El hecho de no producir escasez energética es fundamental, evitando graves crisis sociales y económicas. Además, desde el punto de vista global, este escenario invierte en las fuentes renovables de manera mucho más rápida y con mayor potencial. Este escenario trata de controlar las emisiones de manera mucho más optimizada al tratar de reducir el consumo en general y sobre todo el consumo más perjudicial para el medio ambiente.

4.3. DIVULGACIÓN

Los diagramas completos se han utilizado para realizar una entrada del blog del Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas para facilitar la comprensión de personas no expertas en la materia acerca de la estructura, funcionamiento y utilidad del modelo mediante los diagramas Sankey.

El blog utiliza la plataforma de Wordpress para la publicación de las entradas. Wordpress dispone de un bloque llamado “HTML personalizado” para insertar código HTML. Inicialmente se probó esta opción, pero los códigos HTML poseen también Javascript en el diseño de los diagramas, lo cual no es permitido y bloqueado por Wordpress. La solución final implementada ha sido guardar los diagramas en una carpeta de archivos externa de Wordpress (únicamente disponible en versiones de pago). Estas direcciones son llamadas mediante un *Iframe* en código HTML. El elemento HTML *Iframe* representa un contexto de navegación anidado, el cual permite incrustar otra página HTML en la página actual [22]. Se muestra un ejemplo que posee los campos de identificador, título, largo, ancho y dirección de la ubicación a adjuntar (Figura 19).

```
<iframe id="inlineFrameExample"
  title="Inline Frame Example"
  width="300"
  height="200"
  src="https://www.openstreetmap.org/export/embed.html?
  bbox=-0.004017949104309083%2C51.47612752641776%2C0.00030577182769775
  396%2C51.478569861898606&layer=mapnik">
</iframe>
```

Figura 19 Estructura modelo de un *Iframe* [22]

El enlace a la entrada de blog es el siguiente: <https://geeds.es/news/analisis-energetico-del-modelo-medeads-mediante-diagramas-sankey/>



4.4. DETECCIÓN ERRORES

Una funcionalidad que se ha descubierto de los diagramas Sankey es la capacidad de detectar errores. Durante el desarrollo de este TFG se debe hacer el seguimiento del sector energético en el modelo. Las variables a extraer deben cumplir con una serie de normas, por ello, se debe comprobar los valores de las variables. En la versión 167_4 de MEDEAS-World se han detectado dos errores:

- Variable “real generation nuclear elec”: la variable se encontraba en el modelo operando con las unidades incorrectas (EJ). Posteriormente se creó otra variable que si está en EJ (Tabla 2), pero está no realiza ninguna operación en el modelo, solamente se utiliza para la extracción. Se modificó la ecuación para que operase con las unidades correctas (TWh).
- Variable “Other gases requirement”: la variable alcanzaba valores negativos, algo imposible en el modelo, todos los valores en el sector energético deben ser positivos o nulos. La introducción de un valor negativo en los Sankey provoca desajustes en los nodos entre los flujos de entrada y salida, provocando un escalón al no coincidir estos valores. En concreto, en el año 2015 se encontraba con valores negativos. Se modificó la ecuación para limitar el menor valor de la variable a 0.

Una vez los errores fueron subsanados se continuó con el proceso de elaboración de los diagramas.

5. CONCLUSIONES

Los diagramas Sankey se han presentado como una alternativa para entender el sector energético del complejo modelo de MEDEAS-World. Los Sankey nos demuestran lo importante que es visualizar información cuantitativa para comprenderla.

La elaboración de los diagramas desagregados de cada tipo de energía ha permitido conocer todas las fuentes de energía de las que se dispone para cada caso, así como todas las pérdidas que se generan en el proceso de obtención de la energía final de consumo.

El modelo completo del sector nos ha hecho posible analizar comparativamente las categorías de la energía en su conjunto y la entrega total a los agentes de consumo. Los diagramas completos realizados en diferentes años nos han ofrecido ver posibles evoluciones desde la situación actual y como se ve afectadas por el cambio climático.

La situación actual muestra el dominio de los combustibles fósiles pero ambos escenarios vaticinan el desarrollo de las energías renovables para sustituirlos en el año 2050 como medida para mitigar el cambio climático.

El diagrama en el 2050 con una evolución basada en las tendencias económicas actuales (Figura 27) nos demuestra que el crecimiento es finito y los comportamientos de consumo actuales van a sobrepasar los límites del planeta, provocando un decrecimiento económico y energético inevitable, a pesar del desarrollo de las renovables. El escenario decrecentista (Figura 28) nos muestra en este medio-largo plazo que una reducción programada y controlada del consumo obtendrá unos resultados mejores y sostenidos en el tiempo, puesto que se protege la cantidad de emisiones y extracción de recursos para conseguir un desarrollo sostenible.

El concepto de crecimiento ya sea energético, económico o social, es relativo y deben ser estudiados los beneficios a largo plazo. Así lo muestran los diagramas Sankey, donde el escenario decrecentista nos permite conocer el concepto de desarrollo y evolución sin tener que estar relacionado con crecimiento. Por tanto, conocidos los efectos sobre los distintos comportamientos a nivel global, se evidencia los resultados negativos si continuamos con esta actitud social desenfrenada, por lo que este trabajo sirve para concienciar de la problemática actual y de la necesidad de una rápida actuación para evitar un cambio climático que cada vez evoluciona más apresuradamente.





BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Masson-Delmotte *et al.*, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis,” 2021.
- [2] V. Masson-Delmotte *et al.*, *Resumen para responsables de políticas Editado por*. 2019. [Online]. Disponible: www.ipcc.ch
- [3] “Extinción del Holoceno - HiSoUR Arte Cultura Historia.” <https://www.hisour.com/es/holocene-extinction-40280/> (accedido Jul. 16, 2021).
- [4] Unfccc, “Paris Agreement Spanish,” 2015.
- [5] L. Barrie and G. Braathen, “WMO Greenhouse Gas Bulletin. No 1: 14 March 2006”, [Online]. Disponible: <https://ig3is.wmo.int>
- [6] A. Mirzaei-Aghsaghali and N. Maheri-Sis, “Factors affecting mitigation of methane emission from ruminants: Microbiology and biotechnology strategies”, doi: 10.14269/2318-1265/jabb.v4n1p22-31.
- [7] P. Friedlingstein *et al.*, “Global Carbon Budget 2020,” *Earth System Science Data*, vol. 12, no. 4, pp. 3269–3340, Dec. 2020, doi: 10.5194/essd-12-3269-2020.
- [8] T. Plebanowicz *et al.*, “Acción de la UE en materia de energía y cambio climático”.
- [9] Z. Liu *et al.*, “Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic,” *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-18922-7.
- [10] Juan. Martín García, *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*. Juan Martín García, 2003.
- [11] D. de SISTEMAS Javier Aracil *et al.*, “DINÁMICA DE SISTEMAS por Javier Aracil Otros títulos publicados: 1. Ingeniería de Sistemas.”
- [12] I. De-Blas, L. J. Miguel, and C. de-Castro, “Integrated assessment models (IAMs) applied to climate change and energy transition,” *Dyna (Spain)*, vol. 93, no. 3, pp. 316–321, May 2021, doi: 10.6036/9922.
- [13] “Modelado de evaluación integrado - Integrated assessment modelling - xcv.wiki.” https://es.xcv.wiki/wiki/Integrated_assessment_modelling (accedido Jul. 10, 2021).
- [14] I. Capellán-Pérez *et al.*, “MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints,” *Energy & Environmental Science*, vol. 13, no. 3, pp. 986–1017, Mar. 2020, doi: 10.1039/C9EE02627D.



- [15] “Who is this Sankey guy? – Sankey Diagrams.” <https://www.sankey-diagrams.com/who-is-this-sankey-guy/> (accedido Jul. 17, 2021).
- [16] M. Schmidt, “The Sankey Diagram in Energy and Material Flow Management,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 12, no. 1, pp. 82–94, Feb. 2008, doi: 10.1111/J.1530-9290.2008.00004.X.
- [17] A. B. W. KENNEDY and H. R. SANKEY, “THE THERMAL EFFICIENCY OF STEAM ENGINES. REPORT OF THE COMMITTEE APPOINTED TO THE COUNCIL UPON THE SUBJECT OF THE DEFINITION OF A STANDARD OR STANDARDS OF THERMAL EFFICIENCY FOR STEAM ENGINES: WITH AN INTRODUCTORY NOTE. (INCLUDING APPENDIXES AND PLATE AT BACK OF VOLUME).,” <http://dx.doi.org/10.1680/imotp.1898.19100>, vol. 134, no. 1898, pp. 278–312, Jun. 2015, doi: 10.1680/IMOTP.1898.19100.
- [18] “Software e!sankey.” <https://www.ifu.com/software/> (accedido Jul. 12, 2021).
- [19] “Diagrama de Sankey | Python | Plotly.” <https://plotly.com/python/sankey-diagram/> (accedido Jul. 11, 2021).
- [20] “Proyecto Jupyter | Casa.” <https://jupyter.org/> (accedido Jul. 11, 2021).
- [21] W. McKinney and PyData Development Team, “pandas: powerful Python data analysis toolkit Release 0.23.4 Wes McKinney & PyData Development Team,” 2018.
- [22] “<iframe>: el elemento Inline Frame - HTML: Lenguaje de etiquetas de hipertexto | MDN.” <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTML/Element/iframe> (accedido Jul. 13, 2021).



ANEXOS

ANEXO I: CÓDIGO DE PLOTLY

El código implementado de Plotly (Figura 20) es una figura que contiene el campo de datos (*data*) con el tipo de diagrama para el que se suministra la información, ya que existen otras posibilidades de representación en las figuras. Dentro de la función del Sankey se definen el formato de los números y las unidades y los dos componentes del diagrama, los nodos y los flujos. El formato es *.Of*, para no mostrar decimales. Las unidades de los datos están en TWh. Los nodos (*nodes*) son los rectángulos del gráfico, determinan las variables de estudio del gráfico. No tienen un valor propio, adquieren el valor máximo entre sus entradas y sus salidas, de forma que, sí poseen valor, pero viene determinado por los flujos que los componen. Siendo los flujos recibidos por el lateral izquierdo las entradas y el lateral derecho las salidas. Los nodos pueden ser extremos o intermedios, en el caso de los extremos únicamente poseen entradas (iniciales) o salidas (finales). Las claves del diccionario de los nodos son:

- Almohadilla (*pad*): es un número entero para indicar la separación de los nodos situados en la misma columna. Cuanto más pequeño sea este valor, más juntos se encuentran los nodos. El valor elegido es 20.
- Grosor (*thickness*): es un número entero para indicar el ancho de los nodos. El valor elegido es 15.
- Línea (*line*): está clave es otro diccionario anidado. Es creado para manipular la línea de contorno de los nodos. Este diccionario contiene sus propias claves:
 - Color: es una cadena de caracteres, una palabra, que debe ser el color de la línea que se desea en inglés. El color elegido es negro (*black*).
 - Ancho (*width*): es un número entero para indicar el grosor de la línea de contorno del nodo. El valor elegido es 0,5.
- Etiqueta (*label*): es una cadena de caracteres para indicar el nombre del nodo. Los valores corresponden con la columna nombres de la tabla de nodos.
- Color: es una cadena de caracteres. Se emplea una función *rgba()*. Los valores corresponden con la columna color de la tabla de los nodos.

Los flujos (*link*) son segmentos o flechas de anchura variable que conectan los nodos entre sí. La anchura de los segmentos es proporcional a los valores de los flujos, otorgando mayor visibilidad a los valores más altos. Varios flujos pueden partir o llegar a un mismo nodo, de forma que suman o dividen los valores de los nodos a los que unen. Las claves del diccionario de los flujos son:

- Origen (*source*): es un conjunto de números enteros que determina el nodo origen de cada flujo. Corresponde con la lista introducida en la columna origen de la tabla de flujos.
- Destino (*target*): es un conjunto de números enteros que determina el nodo destino de cada flujo. Corresponde con la lista introducida en la columna destino de la tabla de flujos.
- Valor (*value*): es un número decimal que proporcionará la anchura del flujo. Los valores corresponden con la columna valor de la tabla de flujos.
- Color: es una cadena de caracteres. Se emplea un función `rgba()`. Los valores corresponden con la columna color de la tabla de flujos.

La figura se completa con un título. Por último, se utiliza la función para mostrar la figura dentro del Jupyter Notebook.

```
# Realizamos el Sankey
fig = go.Figure(data=[go.Sankey(
    valueformat = ".0f",
    valuesuffix = "TWh",
    # Define nodes
    node = dict(
        pad = 20,
        thickness = 15,
        line = dict(color = "black", width = 0.5),
        label = nodos['Name'],
        color = nodos['Color']
    ),
    # Add links
    link = dict(
        source = flujo['Source'],
        target = flujo['Target'],
        value = flujo['Valor'],
        color = flujo['Color']
    )
)])

fig.update_layout(title_text="Sankey Diagram: Electricity supply",
                  font_size=10)
fig.show()
```

Figura 20 Código para generar Diagrama Sankey en el lenguaje de programación Python



DIAGRAMA INTERACTIVO

Una característica por la que se decidió usar Plotly es la capacidad de generar figuras interactivas. Los archivos HTML disponen de una serie de acciones para manipular los diagramas. Los nodos pueden moverse por el espacio seleccionándolos y arrastrándolos con el puntero. Además, cuando el puntero se sitúa sobre un nodo muestra su valor y los flujos entrantes y salientes que posee.

En la parte superior izquierda de los archivos hay un menú. El menú permite descargar una foto del diagrama, compactar nodos, reiniciar la vista, seleccionar la forma de mostrar los datos con el puntero y visitar la página de Plotly. La acción de compactar nodos puede ser interesante en algunos momentos, ya que permite mostrar el valor conjunto de los nodos. Al compactar varios nodos se genera uno de color predeterminado negro y sin nombre de etiqueta.

ANEXO II: VARIABLES CREADAS

Tabla 2 Variables auxiliares creadas en MEDEAS-World para el suministro de electricidad

NOMBRE	RAZÓN
nuclear generation nuclear elec EJ	Unidades
FE Elec generation from hydro EJ	Unidades y subíndices
"FE Elec generation from geot-elec EJ"	Unidades y subíndices
FE Elec generation from bioE EJ	Unidades y subíndices
FE Elec generation from oceanic EJ	Unidades y subíndices
FE Elec generation from onshore wind	Unidades y subíndices
FE Elec generation from offshore wind EJ	Unidades y subíndices
FE Elec generation from solar PV EJ	Unidades y subíndices
FE Elec generation from CSP EJ	Unidades y subíndices
Losses biogas elec EJ	Pérdidas
Losses waste elec EJ	Pérdidas
FE Elec generation from total oil EJ	Variable <i>share</i>
FE Elec generation from unconv gas EJ	Unidades
FE Elec generation from conv gas EJ	Unidades
FE Elec generation from total gas EJ	Unidades
FE Elec generation from coal EJ	Unidades
PES oil elec EJ	Variable <i>share</i>
PES unconv gas elec EJ	Variable <i>share</i>
PES conv gas elec EJ	Variable <i>share</i>
PES coal elec EJ	Variable <i>share</i>
FE Elec generation all res EJ	Unidades
FE Elec generation from fossil fuels EJ	Unidades

Tabla 3 Variables auxiliares creadas en MEDEAS-World para el suministro de calor

NOMBRE	RAZÓN
Losses coal plants	Pérdidas
"Losses nat. gas plants"	Pérdidas
Losses oil plants	Pérdidas
PES coal plants	Agrupación
"PES nat. gas plants"	Agrupación
PES oil plants	Agrupación
"PES RES for solar-heat-com"	Subíndices
"PES RES for geot-heat-com"	Subíndices
"PES RES for solid bioE-heat-com"	Subíndices
"FE real generation RES solar-heat-com EJ"	Subíndices
"FE real generation RES geot-heat-com EJ"	Subíndices
"FE real generation RES solid bioE-heat-com EJ"	Subíndices
"PES RES for solar-heat-nc"	Subíndices
"PES RES for geot-heat-nc"	Subíndices
"PES RES for solid bioE-heat-nc"	Subíndices
"FE real generation RES solar-heat-nc EJ"	Subíndices
"FE real generation RES geot-heat-nc EJ"	Subíndices
"FE real generation RES solid bioE-heat-nc EJ"	Subíndices
Losses solar-heat-com	Pérdidas
Losses geot-heat-com	Pérdidas
Losses solid bioE-heat-com	Pérdidas
Losses solar-heat-nc	Pérdidas
Losses geot-heat-nc	Pérdidas
Losses solid bioE-heat-nc	Pérdidas
Losses Heat d&t	Pérdidas
Losses biogas heat EJ	Pérdidas
Losses waste heat EJ	Pérdidas

Tabla 4 Variables auxiliares creadas en MEDEAS-World para el suministro de sólidos

NOMBRE	RAZÓN
extraction coal share solids	Variable <i>share</i>
PES peat EJ with share	Variable <i>share</i>
Losses in charcoal plants EJ with share	Variable <i>share</i>
PE traditional biomass EJ delayed 1yr with share	Variable <i>share</i>
PES solids with share	Variable <i>share</i>
Other solids required with share	Variable <i>share</i>
PES waste for TFC with share	Variable <i>share</i>
PED coal for CTL EJ with share	Variable <i>share</i>

Tabla 5 Variables auxiliares creadas en MEDEAS-World para el suministro de líquidos

NOMBRE	RAZÓN
real extraction conv oil with share liquids	Variable <i>share</i>
real extraction unconv oil with share liquids	Variable <i>share</i>
Other liquids supply EJ with share	Variable <i>share</i>
PES oil EJ with share	Variable <i>share</i>
PES Liquids EJ with share	Variable <i>share</i>
Other liquids required EJ with share	Variable <i>share</i>

Tabla 6 Variables auxiliares creadas en MEDEAS-World para el suministro de gases

NOMBRE	RAZÓN
real extraction conv gas share gases	Variable <i>share</i>
real extraction unconv gas share gases	Variable <i>share</i>
"PES nat. gas with share"	Variable <i>share</i>
PES biogas for TFC with share	Variable <i>share</i>
PES gases with share	Variable <i>share</i>
"PED nt. gas for GTL EJ with share"	Variable <i>share</i>
Other gases required with share	Variable <i>share</i>

ANEXO III: DIAGRAMAS DESAGREGADOS

ELECTRICIDAD

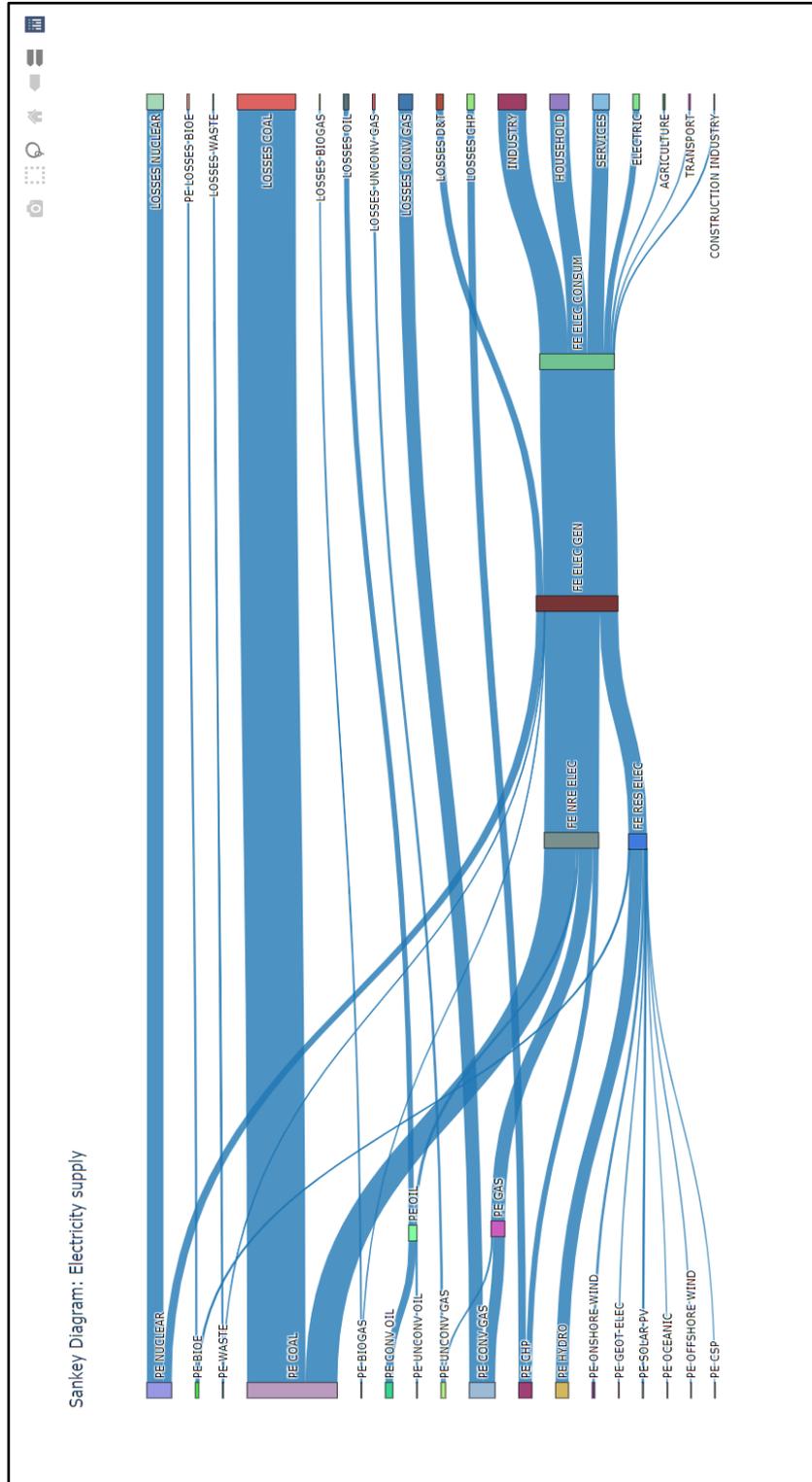


Figura 21 Diagrama desagregado de electricidad

CALOR

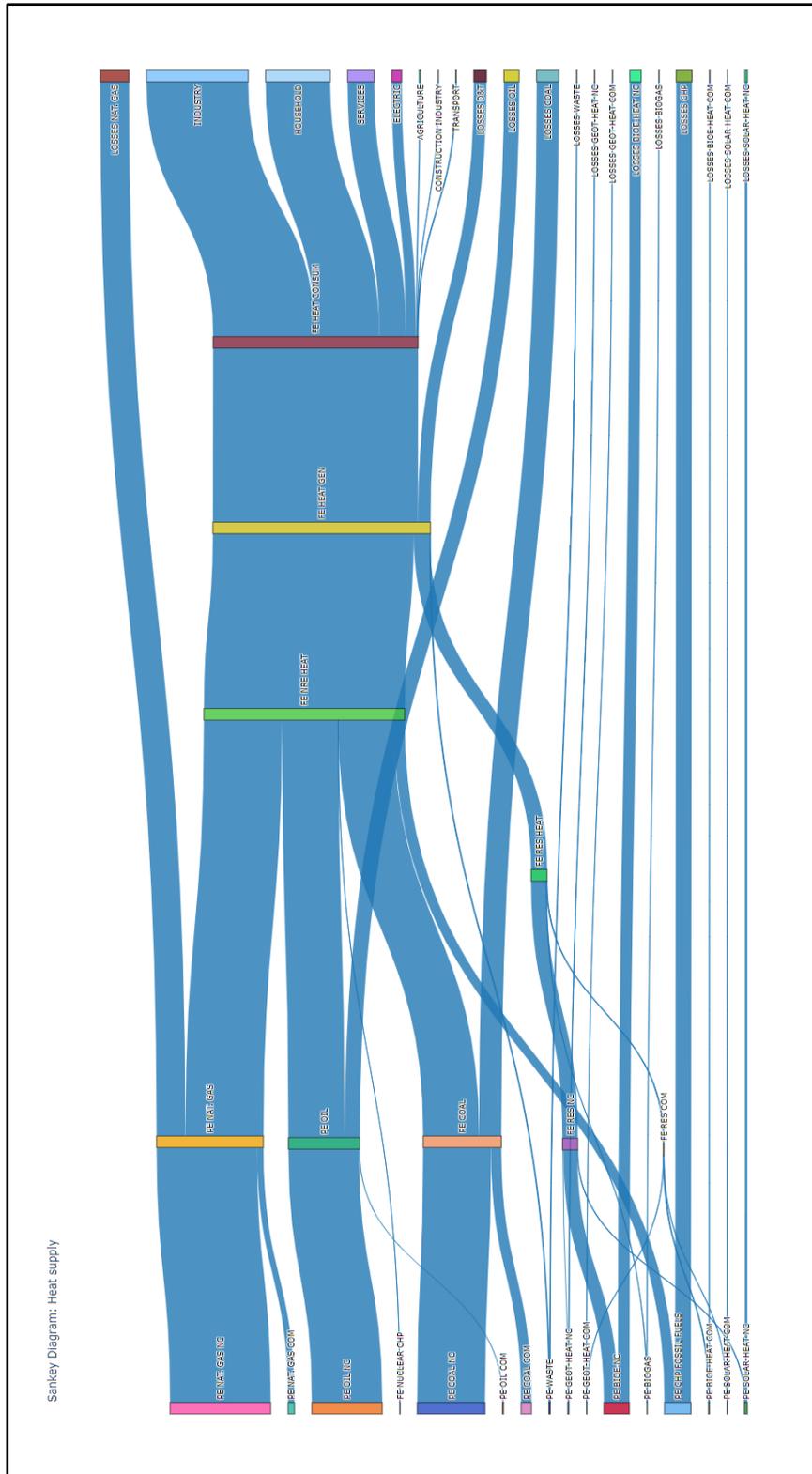


Figura 22 Diagrama desagregado de calor

SÓLIDOS

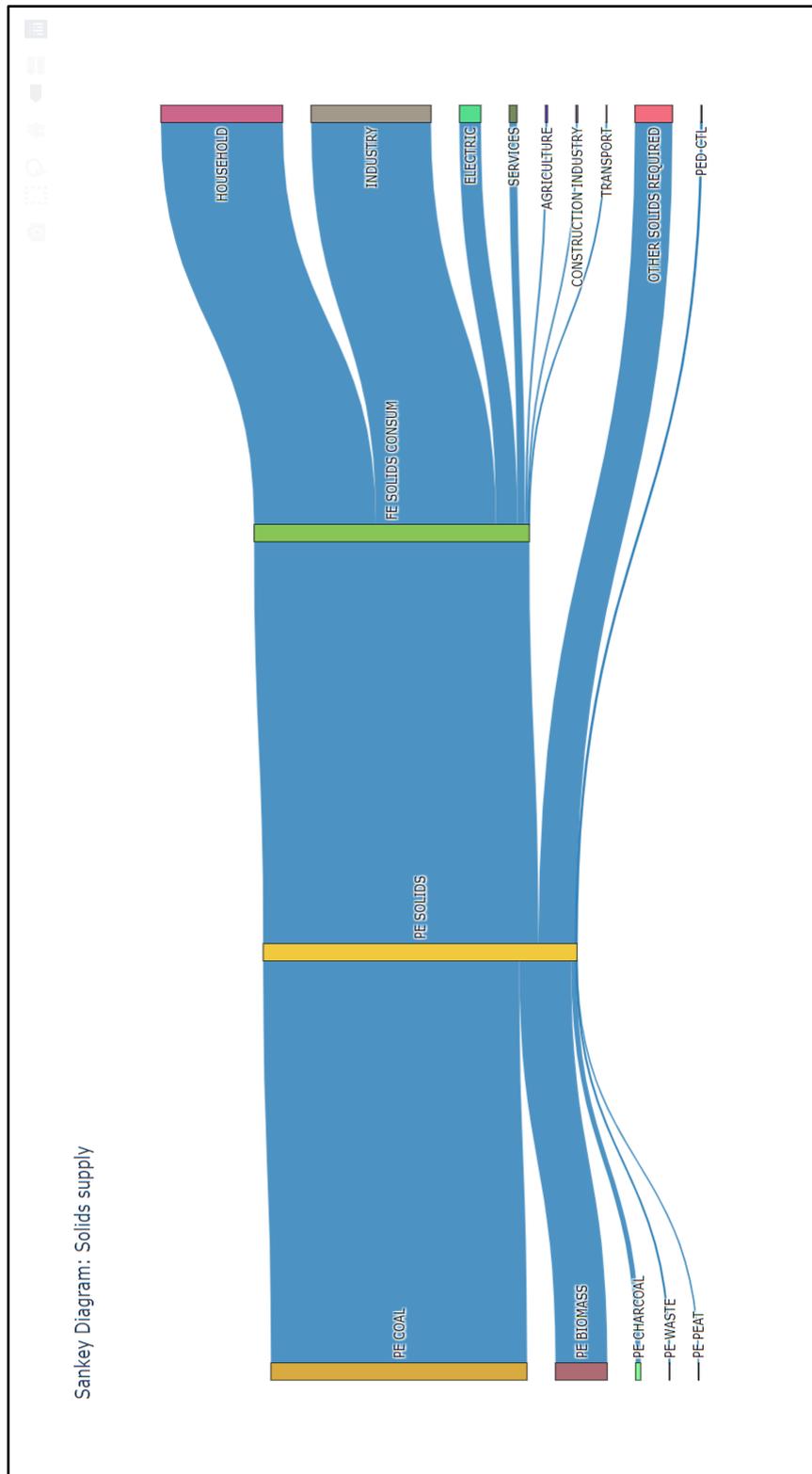


Figura 23 Diagrama desagregado de sólidos

LÍQUIDOS

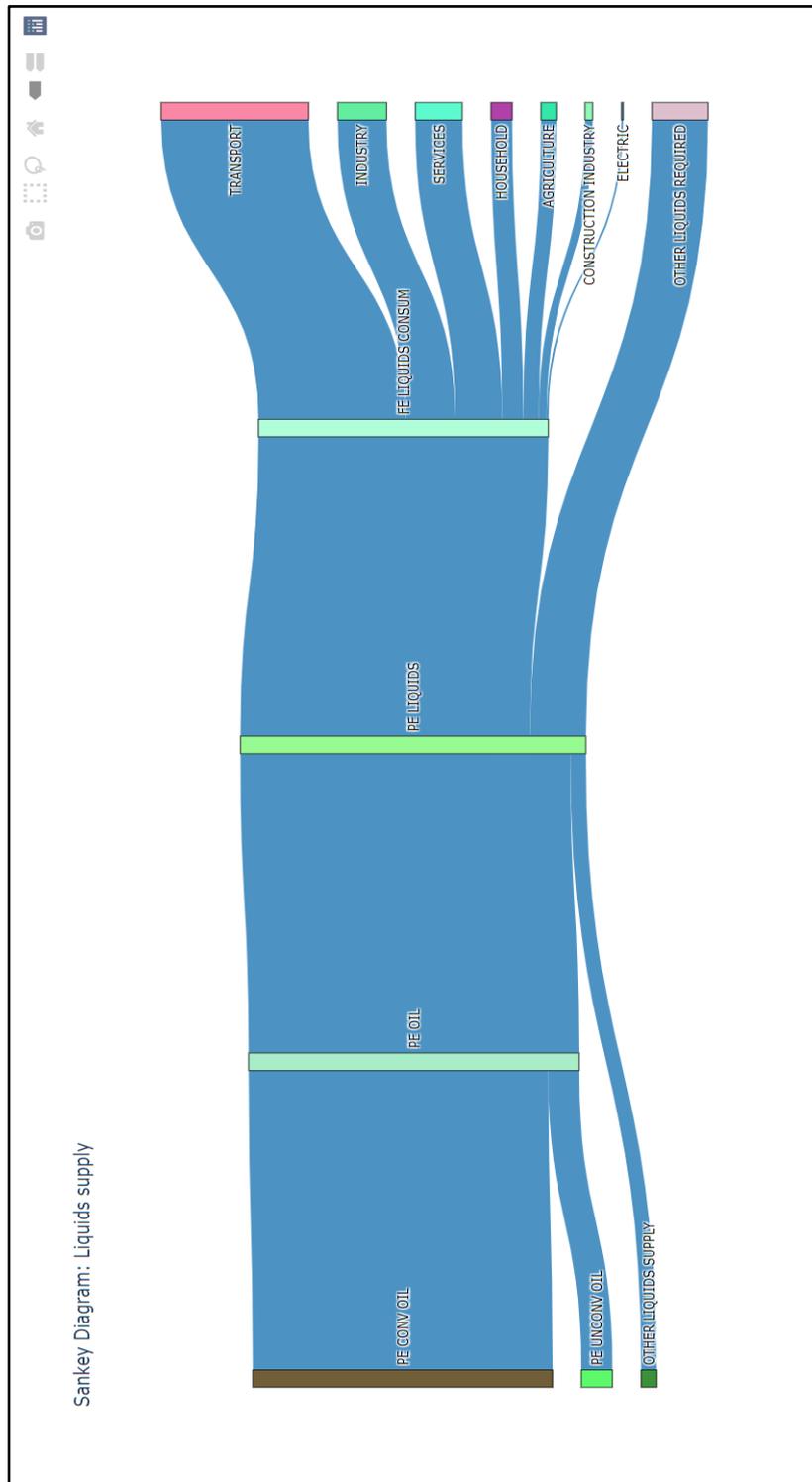


Figura 24 Diagrama desagregado de líquidos

GASES

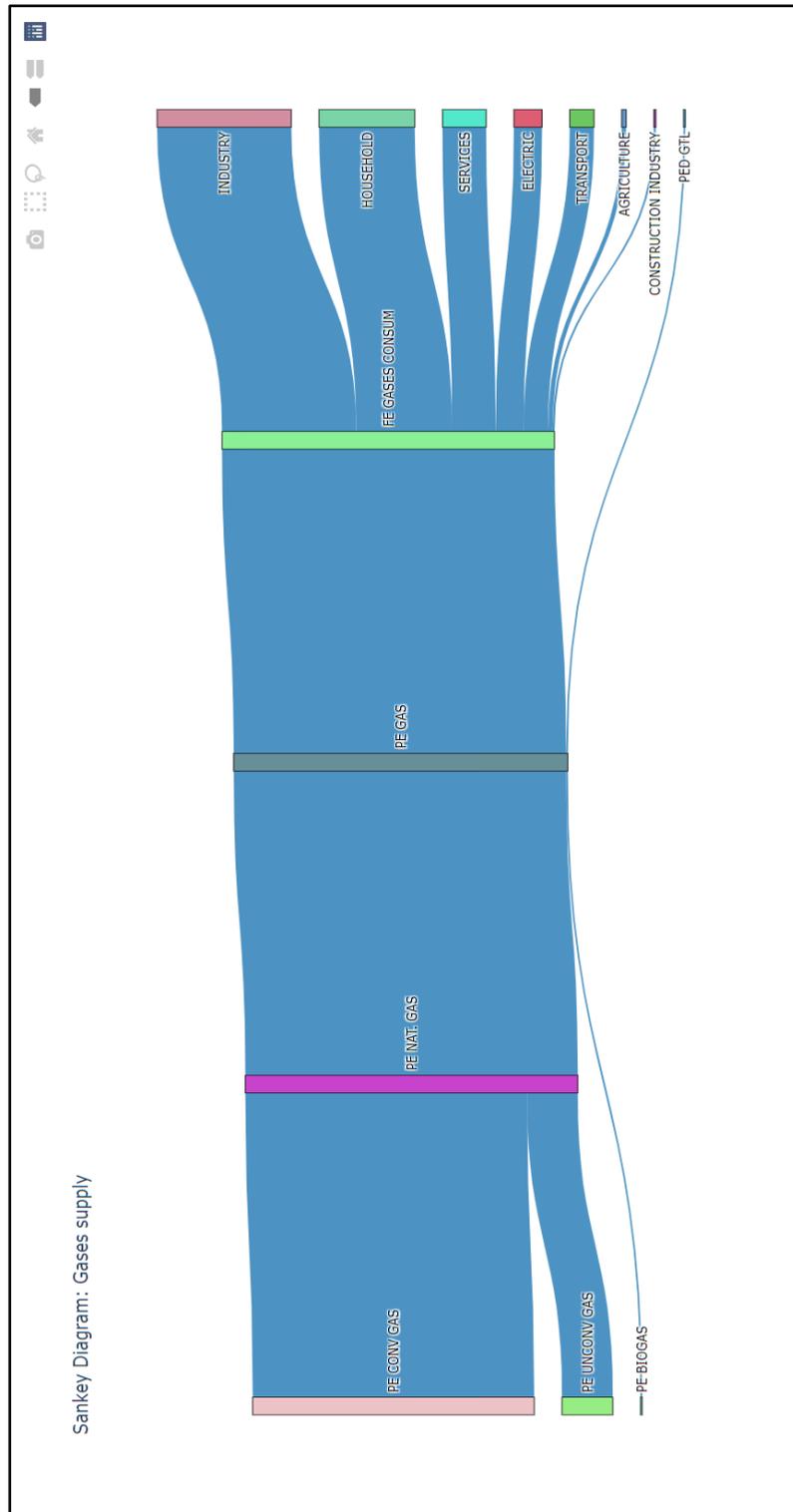


Figura 25 Diagrama desagregado de gases

ANEXO IV: DIAGRAMAS SANKEY DEL SECTOR ENERGÉTICO (BAU, 2015)

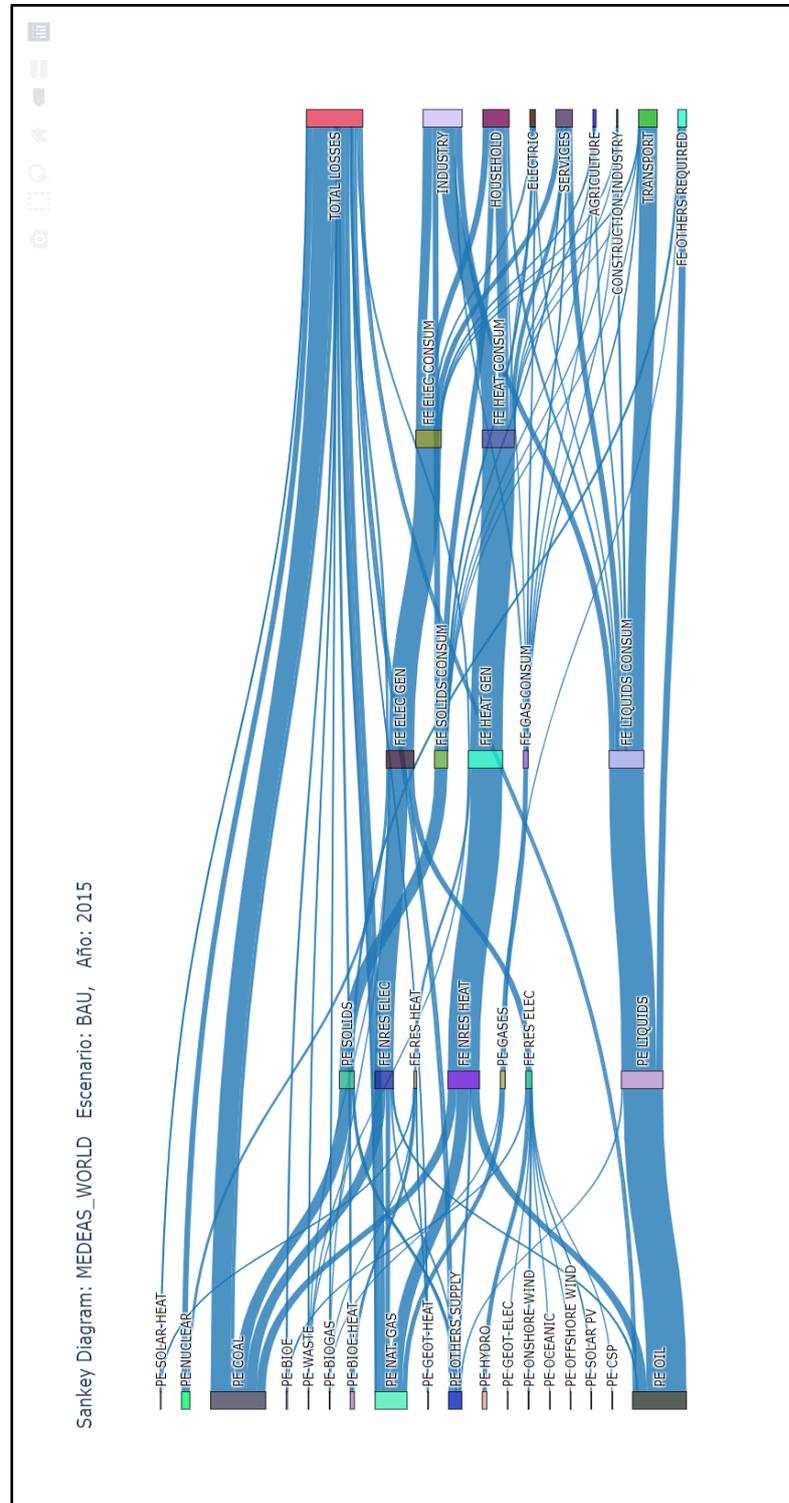


Figura 26 Diagrama del sector energético (BAU, 2015)

(BAU, 2050)

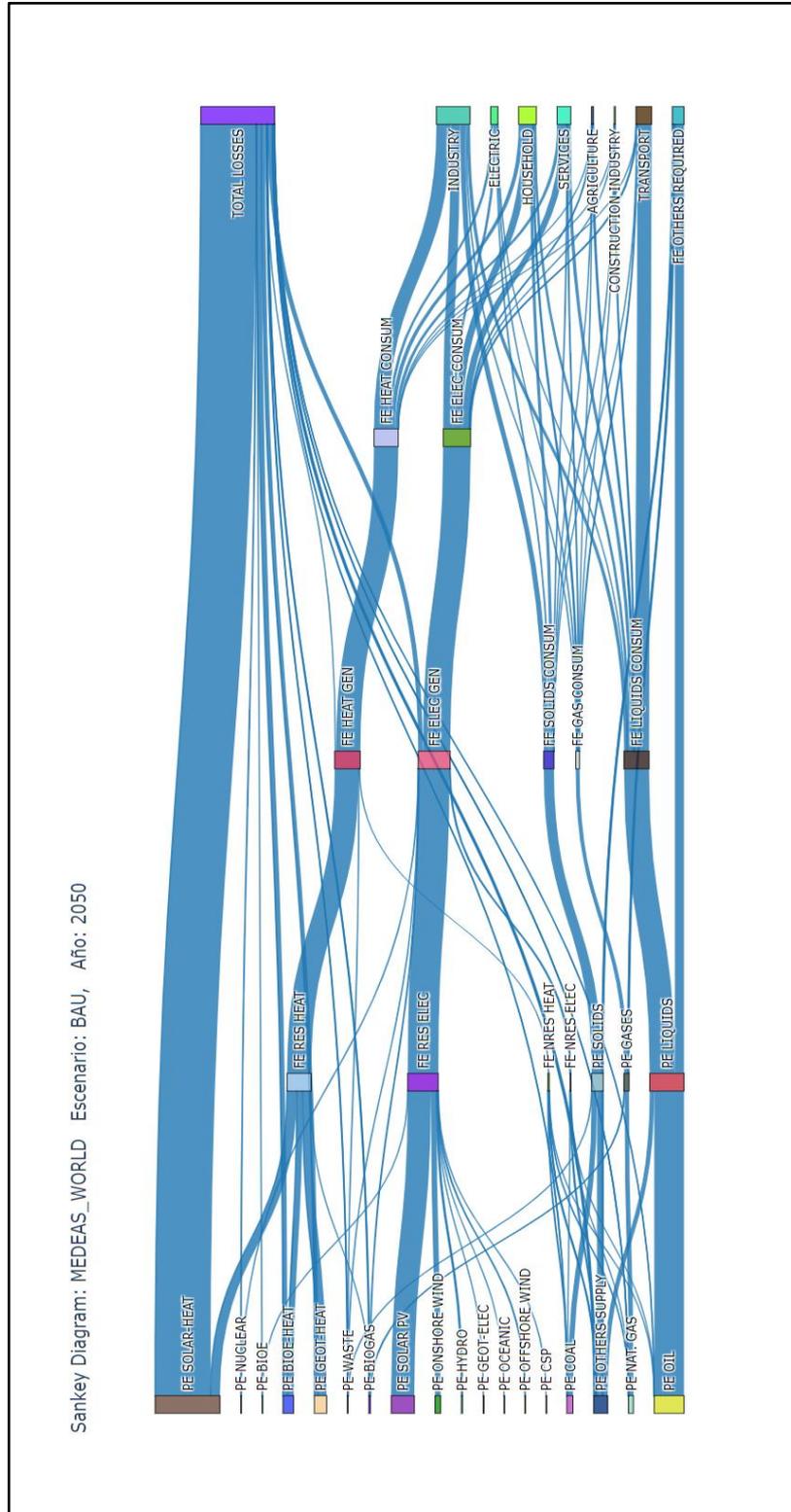


Figura 27 Diagrama del sector energético (BAU, 2050)

(SCEN4, 2050)

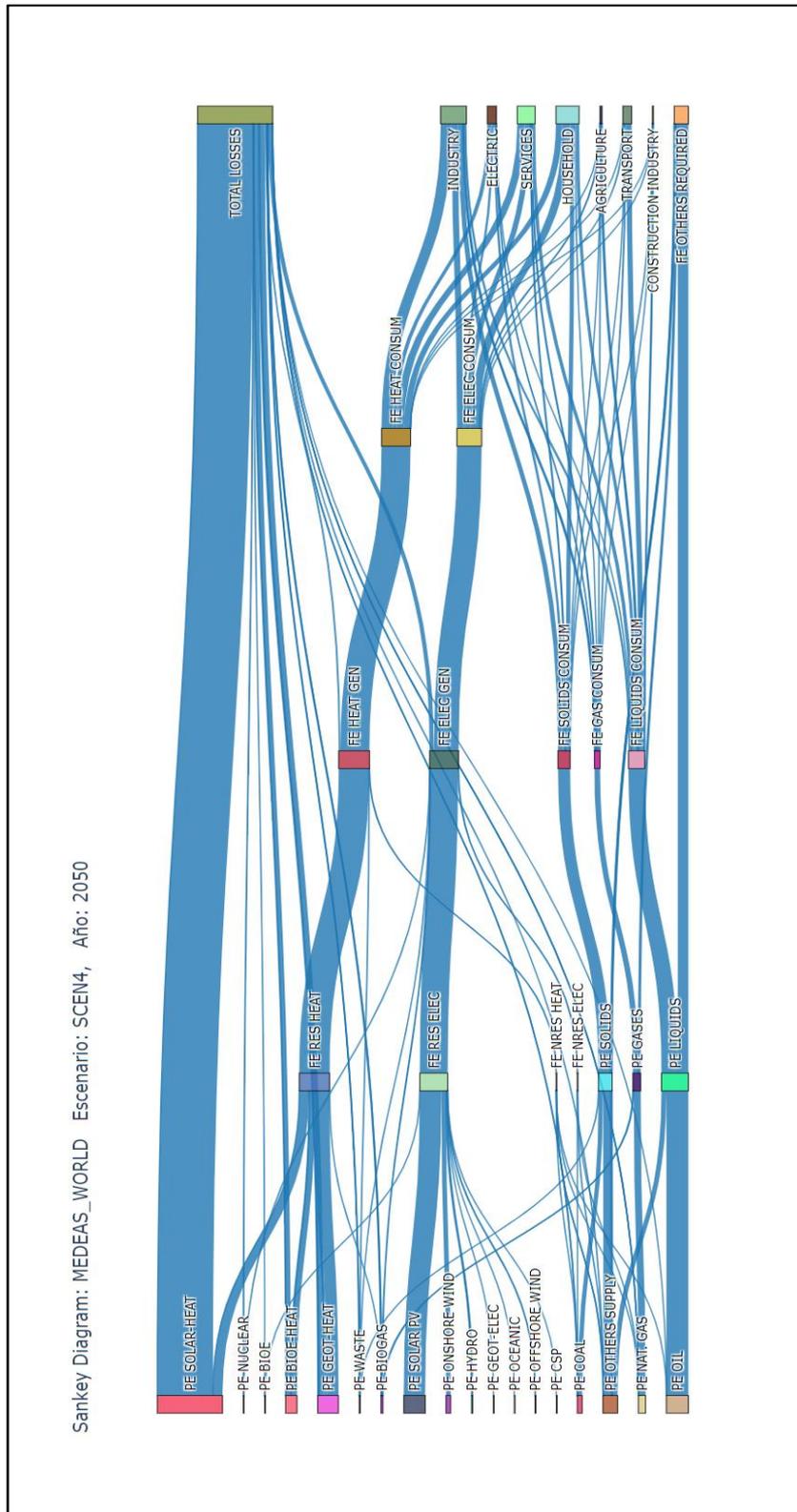


Figura 28 Diagrama del sector energético (SCEN4, 2050)



```
1,27,  
11,11,11,11,11,11,11,11,10,  
27,  
13,27,  
15,27,  
21,20,20,21,21,  
22,23,24,25,  
21,  
27,  
28,29,  
16,16,  
32  
]  
  
# Inserción en tabla  
data['Source'] = source  
data['Target'] = target  
data['Color'] = ["rgba(31, 119, 180, 0.8)"] * len(data)  
flujo = data  
  
# Importación de nodos  
data2 = pd.read_csv('ELEC_NODOS.csv')  
data2.columns.values[1] = 'AÑO'  
data2 = data2.rename(columns = {'Time':'Name', 'AÑO':'Valor'})  
nodos = data2  
  
# Automatización  
data3 = pd.read_csv('TARGET_ELEC.csv')  
data3.columns.values[1] = 'AÑO'  
data3 = data3.reset_index(drop=False)  
data3 = data3.rename(columns =  
{ 'level_1':'Energy', 'Time':'Target', 'AÑO':'Valor'})  
data3 = data3.drop(['level_0'], axis=1)  
  
# Agrupación de elemento de subíndice energías finales  
Energy = pd.DataFrame(data3.groupby(by=['Energy']).sum())  
Energy = Energy.reset_index(drop=False)  
Energy = Energy.rename(columns = {'Energy':'Name'})  
  
# Agrupación de elemento de subíndice sectores de destino  
Target_us = pd.DataFrame(data3.groupby(by=['Target']).sum())  
Target_us = Target_us.reset_index(drop=False)  
Target_us = Target_us.rename(columns = {'Target':'Name'})  
for i in range (len(Target_us)):  
    Target_us.iloc[i,0] = Target_us.iloc[i,0].upper()  
    Target_us.iloc[i,0] = Target_us.iloc[i,0][::-1]
```



```
# Concatenacion
nodosData = [nodos,Energy, Target_us]
nodos = pd.concat( nodosData ,sort='False', ignore_index='True')

# Insertar color en tabla de nodos
nodos = nodos.assign(Color = '')
for i in range (len(nodos)):
    nodos.iloc[i,2] = color_ale()

# Lectura automática de origen y destino
flujo3 = data3
flujo3 = flujo3.rename(columns =
{'AÑO':'Valor', 'Energy':'Source'})

# Para Source
for i in range (len(flujo3)):
    if flujo3.iloc[i,0] == 'electricity':
        flujo3.iloc[i,0] = 28

for i in range (len(flujo3)):
    if flujo3.iloc[i,1] == 'Transport]':
        flujo3.iloc[i,1] = 39
    if flujo3.iloc[i,1] == 'Industry]':
        flujo3.iloc[i,1] = 37
    if flujo3.iloc[i,1] == 'Construction Industry]':
        flujo3.iloc[i,1] = 35
    if flujo3.iloc[i,1] == 'Agriculture]':
        flujo3.iloc[i,1] = 34
    if flujo3.iloc[i,1] == 'Services]':
        flujo3.iloc[i,1] = 38
    if flujo3.iloc[i,1] == 'electric]':
        flujo3.iloc[i,1] = 40
    if flujo3.iloc[i,1] == 'Household]':
        flujo3.iloc[i,1] = 36

# Concatenacion de flujos e inserción de color
flujoData = [flujo,flujo3]
flujo = pd.concat( flujoData ,sort='False', ignore_index='True')
flujoColor = ["rgba(31, 119, 180, 0.8)"] * len(flujo)

flujo['Color'] = flujoColor
flujo['Valor'] = flujo['Valor']*277.78

# Cambio de nombres
nodos.iloc[0,0] = 'PE NUCLEAR'
nodos.iloc[1,0] = 'LOSSES NUCLEAR '
nodos.iloc[2,0] = 'PE HYDRO'
nodos.iloc[3,0] = 'PE GEOT-ELEC'
nodos.iloc[4,0] = 'PE BIOE'
nodos.iloc[5,0] = 'PE OCEANIC'
```



```

nodos.iloc[6,0] = 'PE ONSHORE WIND'
nodos.iloc[7,0] = 'PE OFFSHORE WIND'
nodos.iloc[8,0] = 'PE SOLAR PV'
nodos.iloc[9,0] = 'PE CSP'
nodos.iloc[10,0] = 'LOSSES BIOE'
nodos.iloc[11,0] = 'FE RES ELEC '
nodos.iloc[12,0] = 'PE BIOGAS'
nodos.iloc[13,0] = 'LOSSES BIOGAS'
nodos.iloc[14,0] = 'PE WASTE'
nodos.iloc[15,0] = 'LOSSES WASTE'
nodos.iloc[16,0] = 'PE OIL'
nodos.iloc[17,0] = 'PE UNCONV GAS'
nodos.iloc[18,0] = 'PE CONV GAS'
nodos.iloc[19,0] = 'PE COAL'
nodos.iloc[20,0] = 'PE GAS'
nodos.iloc[21,0] = 'FE NRE ELEC'
nodos.iloc[22,0] = 'LOSSES OIL'
nodos.iloc[23,0] = 'LOSSES UNCONV GAS'
nodos.iloc[24,0] = 'LOSSES CONV GAS'
nodos.iloc[25,0] = 'LOSSES COAL'
nodos.iloc[26,0] = 'PE CHP'
nodos.iloc[27,0] = 'FE ELEC GEN'
nodos.iloc[28,0] = 'FE ELEC CONSUM'
nodos.iloc[29,0] = 'LOSSES D&T'
nodos.iloc[30,0] = 'PE CONV OIL'
nodos.iloc[31,0] = 'PE UNCONV OIL'
nodos.iloc[32,0] = 'LOSSES CHP'

# Realizamos el Sankey
fig = go.Figure(data=[go.Sankey(
    valueformat = ".0f",
    valuesuffix = "TWh",
    # Define nodes
    node = dict(
        pad = 20,
        thickness = 15,
        line = dict(color = "black", width = 0.5),
        label = nodos['Name'],
        color = nodos['Color']
    ),
    # Add links
    link = dict(
        source = flujo['Source'],
        target = flujo['Target'],
        value = flujo['Valor'],
        color = flujo['Color']
    )
)])

fig.update_layout(title_text="Sankey Diagram: Electricity supply",
                   font_size=10)

fig.show()
fig.write_html('ELECTRICIDAD.html', auto_open=True)
```