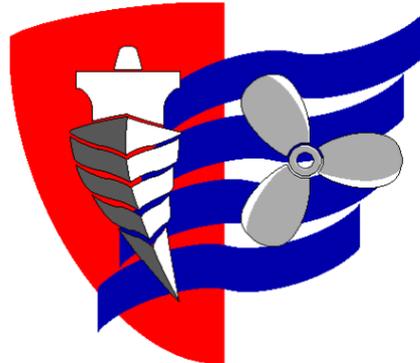


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS DE LA FUTURA
EVOLUCIÓN DEL USO DE LOS
COMBUSTIBLES EN EL
TRANSPORTE**

**Analysis of future evolution of fuels in
transport**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: Juan Emigdio Bedia Cagigal

Director: Vidal Fernández Canales

Febrero - 2019

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS DE LA FUTURA
EVOLUCIÓN DEL USO DE LOS
COMBUSTIBLES EN EL
TRANSPORTE**

**Analysis of future evolution of fuels in
transport**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Febrero – 2019

Agradecimientos

Gracias a mis padres, y a toda mi familia; siempre estáis ahí cuando os necesito, me habéis apoyado hasta ahora y se con certeza que lo seguiréis haciendo.

También le doy las gracias al océano, si es que puedo, por comenzar a inculcarme desde que era pequeño el gran respeto hacia la naturaleza que hoy siento.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Vidal Fernández Canales por contribuir a inspirar amor por la forma que tenemos los seres humanos de entender y explicar las leyes de la naturaleza a través de la física y, más concretamente, por guiarme en este proyecto final.

Además, quiero dar las gracias a todas las personas que influyeron en mi vida, pues camino solo recorreré uno, y me siento muy afortunado de encontrarme en él.

AGRADECIMIENTOS	- 3 -
RESUMEN	- 6 -
ABSTRACT	- 6 -
PALABRAS CLAVE	- 7 -
KEYWORDS	- 7 -
1 INTRODUCCIÓN	- 7 -
2 HISTORIA DEL CONSUMO ENERGÉTICO HUMANO	- 10 -
2.1 PRIMEROS PASOS	- 10 -
2.1.1 FUEGO	- 11 -
2.1.2 AIRE	- 15 -
2.1.3 TIERRA	- 18 -
2.1.4 AGUA	- 18 -
2.2 REVOLUCIÓN INDUSTRIAL	- 20 -
2.2.1 SITUACIÓN PREVIA	- 20 -
2.2.2 SOFISTICACIÓN	- 23 -
2.3 CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO	- 28 -
2.3.1 CRECIMIENTO INICIAL DE LA POBLACIÓN HUMANA	- 28 -
2.3.2 PRIMER CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO MODERNO	- 30 -
2.3.3 SEGUNDO CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO MODERNO	- 30 -
2.3.4 CORRELACIÓN	- 31 -
2.4 HISTORIA RECIENTE: PRODUCCIÓN ENERGÉTICA GLOBAL	- 31 -
3 CONSUMO ENERGÉTICO ACTUAL: DESCRIPCIÓN Y CONSECUENCIAS	- 33 -
3.1 CONSUMO ENERGÉTICO GLOBAL	- 33 -
3.2 MEZCLA ENERGÉTICA	- 35 -
3.2.1 ÚLTIMAS TENDENCIAS	- 35 -
3.2.2 MEZCLA ENERGÉTICA POR REGIÓN	- 37 -

3.3	OBSERVACIÓN DEL MEDIOAMBIENTE	- 39 -
3.3.1	EVOLUCIÓN DEL SISTEMA CLIMÁTICO	- 40 -
3.3.2	DIÓXIDO DE CARBONO	- 48 -
3.3.3	EFFECTO INVERNADERO	- 50 -
3.3.4	CÓMO AMPLIFICAR EL EFFECTO INVERNADERO	- 50 -
3.3.5	PREOCUPACIÓN POPULAR Y CONCIENCIACIÓN	- 51 -
3.3.6	EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO CAUSADO POR EL SER HUMANO	- 52 -
3.4	RESPUESTA INTERNACIONAL	- 56 -
3.4.1	PROTOCOLO DE KIOTO	- 56 -
3.4.2	EL ACUERDO DE PARÍS	- 58 -
3.4.3	GREEN CLIMATE FUND	- 65 -
3.5	RESERVAS MUNDIALES DE COMBUSTIBLES FÓSILES	- 66 -
4	ANÁLISIS DE FUTURO	- 73 -
4.1	ACUERDO DE PARÍS	- 73 -
4.1.1	TRAYECTORIAS Y OBJETIVOS	- 73 -
4.1.2	INTERNATIONAL BUNKER FUELS	- 78 -
4.2	COMBUSTIBLES MARÍTIMOS ALTERNATIVOS	- 81 -
4.2.1	EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	- 83 -
4.2.2	RESULTADOS	- 88 -
4.2.3	CONCLUSIONES	- 92 -
4.3	TRANSICIÓN ENERGÉTICA GLOBAL	- 93 -
4.3.1	PREVISIONES	- 94 -
4.3.2	NUEVAS ENERGÍAS PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA	- 95 -
4.3.3	OTRAS INNOVACIONES EN FUENTES DE ENERGÍA	- 99 -
5	CONCLUSIONES	- 109 -
	BIBLIOGRAFÍA	- 112 -

Resumen

El consumo energético global ha experimentado un crecimiento exponencial. Desde los primeros usos del fuego, cada transición energética ha supuesto grandes cambios en la vida de nuestros antepasados. El uso de los combustibles fósiles ha provocado grandes avances tecnológicos, económicos y sociales y ha contribuido al crecimiento demográfico, sin embargo, también ha provocado impactos negativos en el ecosistema. En las últimas décadas se ha incrementado la inversión, la investigación, la concienciación y la preocupación popular en materia medioambiental, lo cual ha fomentado la búsqueda de nuevas fuentes de energía. La cooperación internacional se ha puesto en marcha, pero muestra signos de debilidad.

Los sectores de la aviación internacional y el transporte marítimo se encuentran al margen del mayor acuerdo climático que ha existido, por ello, el desafío es mayor, y la búsqueda de nuevos combustibles alternativos urgente. En este trabajo se analiza la posible evolución del uso de los combustibles, y se observa la dificultad para encontrar una opción que cumpla con los requisitos, lo que ofrece una situación preocupante. De cualquier forma, las fases de la nueva transición energética están por llegar, aunque es complicado saber cuándo.

Abstract

Global energy consumption has experienced exponential growth. Since the first uses of fire, each energy transition has made huge changes in our ancestors' lives. Fossil fuel use has contributed to technological innovation, economic and population growth and social progress; however, it has had negative environmental impacts. Investment, research, understanding and popular concern have grown around environmental issues during the last

decades which has encouraged the search for new energy sources. International cooperation is underway but shows weaknesses.

As international shipping and aviation have been excluded from the Paris Agreement, the challenge is big and the search for new alternative fuels is urgent. This manuscript analyses the evolution of fuels, and we find that an optimal option that fulfills all the requirements is challenging; failure to find it leads to a worrying situation. A new energy era is about to begin but when this will happen is uncertain.

Palabras clave

Consumo energético; transición energética; fuente energética; mezcla energética; combustible; combustibles fósiles; energías renovables; transporte marítimo; tecnología; *Acuerdo de París*; IPCC; clima; cambio climático; sostenibilidad; historia; tendencia; evolución; población; cooperación internacional.

Keywords

Energy consumption; transition; source; fuel-mix; fuel; fossil fuels; renewable; maritime transport; technology; *Paris Agreement*; IPCC; climate system; climate change; sustainable development; history; tendency; evolution; population; international cooperation.

1 Introducción

Hace casi 2 millones de años, cuando por primera vez, los homínidos manipularon el fuego, se desencadenó un largo y complejo proceso de desarrollo en el área del consumo energético más allá de nuestro propio

organismo. Desde las primeras grandes civilizaciones, durante el transcurso de la Edad Media, el Renacimiento y las posteriores revoluciones industriales, nuestra especie ha realizado un viaje tecnológico, económico y social a través de las distintas fuentes energéticas, durante el cual, el consumo energético ha experimentado un crecimiento exponencial. En particular, los avances en tecnología ligados al transporte marítimo han provocado en la historia, considerables cambios en aspectos económicos, políticos, sociales, demográficos e industriales que propiciarían la llegada del fenómeno de la globalización.

Este estudio crítico del estado del arte tiene por objetivos: (1) proporcionar al lector un amplio conocimiento de la situación, para lo cual, será necesaria la realización de un análisis histórico, consiguiendo así, una completa contextualización; (2) aportar herramientas didácticas para la comprensión de la amplia gama de factores que determinarán el futuro del sector tecnológico, energético y económico, que además, irán intrínsecamente ligados a la cooperación internacional para mejorar la situación medioambiental; y (3) ofrecer criterios y conclusiones en cuanto a los posibles combustibles marítimos del mañana y, conceder una visión futurística de la nueva transición energética, facilitando previsiones y tendencias.

Desde el primer momento en que aprovechamos la energía más allá de la obtenida mediante la nutrición, ésta se convirtió en la razón de los más grandes acontecimientos habidos y por haber en la historia de nuestra especie. Manteniéndose como un tema de gran importancia durante la historia, ha terminado siendo un potentísimo motor económico, en gran parte, debido a su posición estratégica con respecto a otros sectores. Hoy en día, los factores que intervienen en este campo son numerosos y diversos, por tanto, conviene analizar exhaustivamente el pasado y el presente para aproximarse a prever lo que ocurrirá en el futuro.

El escenario global en el que están teniendo lugar las decisiones políticas es crítico para el desarrollo sostenible que marcará el sector energético del

futuro. Es por eso por lo que, este documento realiza un focalizado análisis sobre esta materia, pues, en lo referente al consumo energético del transporte, se ha convertido en la senda que guiará la evolución de este sector y, por motivo de pertenencia, la del sector del transporte marítimo. De este modo, la decisión de aportar información más amplia pero menos profunda sobre otros temas ha sido inevitable para mantener los objetivos del documento a la par que la fluidez del texto.

Durante la elaboración del presente documento, como autor, me he visto recorrer una curva de aprendizaje, en gran parte, gracias a la riqueza de fuentes de la Biblioteca de la Universidad de Cantabria, más concretamente, de su versión en línea, de la que he obtenido gran variedad de documentos que me han permitido contrastar y ampliar mi conocimiento. De estos, he obtenido parte de las ideas que me he propuesto plasmar en el trabajo realizando, dentro de lo posible, una lectura crítica para llegar a aportar conclusiones originales. No obstante, también han sido de crucial importancia los documentos de acceso público de *Naciones Unidas (UN)*, la *Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*, el *Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC)*, la *Organización Meteorológica Mundial (WMO)*, la *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, la *International Energy Agency (IEA)* o el *Gobierno de España*.

El documento está fundamentalmente dividido en cuatro secciones: pasado del consumo energético humano, análisis del consumo actual, previsiones de futuro y conclusiones. Esta sucesión cronológica busca ofrecer un enfoque claro y dinámico de la materia en cuestión y destacar su enorme relevancia para la sociedad.

2 Historia del consumo energético humano

2.1 Primeros pasos

Los animales obtienen su energía mediante la digestión y la respiración; como tales animales que somos, así lo hacemos los seres humanos. Al principio, los primeros homínidos, aprovechaban los nutrientes tan solo para realizar las funciones vitales: ingerían unas 2.000 kilocalorías al día en forma de materia orgánica proveniente de otros seres vivos y así mantenían sus sentidos activos y su temperatura corporal constante, eran capaces de regenerar tejidos y de llevar a cabo los procesos mentales.

Actualmente, el método por el cual obtenemos la energía necesaria para mantenernos vivos continúa intacto. Seguimos teniendo las mismas cualidades de animal en este aspecto, y necesitamos alimento y oxígeno para sobrevivir. Sin embargo, un individuo perteneciente a la sociedad tecnológica actual puede llegar a consumir, de media, unas 300.000 kcal/día. Observemos qué ocurrió en todo este tiempo.

Posiblemente, el inicio de la transformación tuvo lugar cuando apareció el fuego en la vida de los primeros homínidos. Sabemos que nuestros parientes más cercanos, los chimpancés, no se intimidan ante la presencia del fuego, pero su comportamiento muestra cierta sensibilidad en relación con él, y que los primeros humanos se vieron frecuentemente expuestos al fuego desde que migraron a un entorno de sabana abierta hace más de 2 millones de años (Gowlett 2016).

Fuego, aire, tierra y agua: los 4 clásicos elementos descritos en la filosofía presocrática nos permiten explicar el desarrollo energético más antiguo conocido.

2.1.1 Fuego

El fuego, en términos científicos: la combustión, es una reacción química exotérmica. El hecho de que comenzasen a familiarizarse con este proceso desencadenó un cambio en la percepción del entorno, y permitió ver a la vegetación seca como un nuevo recurso energético del que obtener calor y luz (Brown et al. 2009).



Ilustración 1: Localizaciones de restos encontrados del uso del fuego en el Pleistoceno. Fuente: The discovery of fire (Gowlett 2016).

En destacados puntos arqueológicos, han aparecido pruebas del uso del fuego. Los más antiguos, que datan de hace un millón y medio de años aproximadamente se encontraron en Koobi Fora y Chesowanja (actual Kenia), y hay pruebas de ya verdaderas hogueras de fuego controlado de hace 700.000 a 400.000 años en la zona más septentrional del continente africano y en dispersas áreas de Europa y Asia (Gowlett 2016).

Entonces, se pueden diferenciar, aunque con fronteras muy borrosas, las etapas que fueron sucediendo desde que, por primera vez, el fuego fue entendido como algo útil, hasta que se transformó en un fenómeno controlado. Este lento aprendizaje condicionaría a la especie para siempre.

Supuestamente, se produjeron cambios en la anatomía influenciados por el control del fuego. Se da por cierto que, como el *Pan*, el *Australopithecus* dormía por las noches en los árboles, trepaba para comer frutas y otros alimentos arbóreos, e ingería grandes cantidades de comida relativamente baja en calorías. Los cambios resultantes del uso del fuego ocurrieron entre el *Australopithecus* y el *Homo erectus* (Wrangham y Carmody 2010).

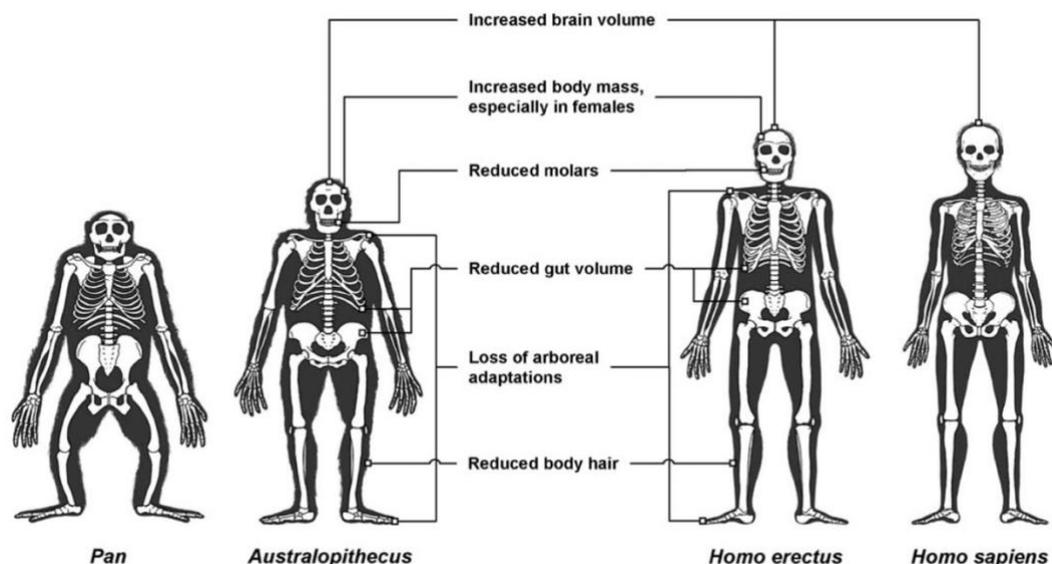


Ilustración 2: Importantes transformaciones anatómicas. Fuente: *Human Adaptation to the Control of Fire* (Wrangham y Carmody 2010).

En resumen, se produjeron las siguientes transformaciones en la anatomía. El volumen del cerebro aumentó y se redujo el del intestino, esto último debido a la mejorada digestibilidad de la comida cocinada. Se incrementó la masa corporal, sobre todo en las hembras, efecto promovido por la reducción en la mortalidad causada por el uso del fuego. En la dentadura, el área molar pasó a ser inferior como resultado de ablandamiento de la comida por el calor. Se perdió la adaptación arbórea de los hombros, brazos, piernas, manos y pies debido a la pérdida de importancia del alimento

proveniente de los árboles y porque el *Homo erectus* fue capaz de dormir en el terreno al utilizar el fuego para ahuyentar a los depredadores. Por último, se redujo el bello corporal como resultado del calor extra conseguido por las noches al dormir junto a una hoguera (Wrangham y Carmody 2010).

De esta forma, podemos comprender la magnitud de las consecuencias que provocó la primera externalización del proceso de obtención de energía más allá de nuestro organismo. La visión de la naturaleza como fuente de recursos energéticos contribuyó, en gran medida, a la prosperidad y evolución de la especie.

La adaptación al uso del fuego permitió el aprendizaje de técnicas para la manipulación de las propiedades físicas de los materiales. Hay pruebas de hace 500.000 años que demuestran cómo desarrollaron técnicas de elaboración de adhesivos que requerían el dominio del fuego (Gowlett 2016). Es más, aprendieron a trabajar el barro para obtener arcilla y así, conseguir impermeabilidad y aislamiento térmico con distintas finalidades, entre otras, arquitectónicas, que fomentaron la adopción un modo de vida sedentario.

Mientras tanto, la búsqueda de recursos energéticos continuó creciendo. Tiempo después, el abanico de fuentes de energía se amplió y otros seres vivos entraron en juego. Con la llegada de la agricultura y la domesticación animal, se aprovechó la energía mecánica de numerosas especies, sobre todo para el transporte.

En ocasiones, la escasez es el motivo por el que suceden cambios; cuando un método no funciona, la sociedad debe reaccionar renovando su estrategia. Se cree que la escasez fue el motor que impulsó la transición energética que ocurrió cuando se sustituyó la madera por carbón.

2.1.1.1 Carbón

En la zona de clima desértico de Asia, más concretamente, en las actuales regiones del interior de China, la vegetación consiste principalmente de pastizales y estepas del desierto, es decir, no hay abundancia de plantas

leñosas. Por ello, la cantidad de madera que lograban extraer sus antiguos habitantes no era suficiente como para considerarla una fuente sostenible de energía en la sociedad sedentaria. Cerca de la actual Huoshilang, en Gansu, China, se han hallado evidencias que demuestran que en el 1860 a.C. se alcanzó una situación de la deforestación completa de dicha zona, lo que provocó una gran escasez energética que quizás, motivó la búsqueda de nuevos recursos. Como el carbón era muy abundante y accesible; no hicieron falta habilidades mineras para extraerlo porque se encontraba muy cerca de la superficie (Dodson et al. 2014).

Según algunas investigaciones, en el año 3490 a.C. en Xiaohe, China, y en el 2200 a.C. en Dakou, también China, ya se controlaba este nuevo recurso energético. El momento de la primera difusión del uso del carbón hacia cualquier lugar del mundo es desconocido. Las pruebas son muy puntuales y dispersas, tanto en el espacio como en el tiempo (Dodson et al. 2014). En la antigua Grecia, el carbón era un combustible muy minoritario. Aristóteles y Teophrastus mencionaron el carbón y describieron la combustión espontánea, que hoy en día sigue significando un problema para su transporte y almacenaje. Parece que también fue ampliamente utilizado en Inglaterra por los romanos durante la Edad de Bronce (Daemen 2004).

Los registros históricos sitúan el uso del carbón, al menos, en el período correspondiente a la dinastía Han (206 a.C. – 220 d.C.), estos registros indican que fue utilizado en la Edad de Hierro de China, y que probablemente, su uso se difundió durante la dinastía Sang (960 – 1278 d.C.), donde el hierro y el carbón sirvieron de principal motor económico (Dodson et al. 2014). Se dice que en Europa fue ignorado hasta después del regreso de Marco Polo de su viaje a Asia, momento en el que pudo transmitir la gran utilidad de esta alternativa ante la crisis energética que sufría occidente. En Europa, los registros sobre derechos de minería datan de finales del siglo XI en Bélgica y en Escocia, y principios del XII en Francia y Alemania. A partir de aquí, el uso del carbón fue creciendo, situando a Inglaterra a la cabeza de la producción, principalmente debido a la temprana escasez de madera, al fácil acceso a la navegación por mar y ríos

navegables y a las grandes reservas de carbón que se encontraban cerca de la superficie (Daemen 2004).

2.1.1.2 Petróleo

Los registros demuestran el uso humano del petróleo procedente de filtraciones naturales ya en la antigua Mesopotamia en el 3000 a.C. Lo empleaban en la construcción, para impermeabilizar los barcos y en la medicina. Los aztecas utilizaban petróleo para hacer chicles de mascar. Posteriormente, otras civilizaciones destilaron petróleo crudo obteniendo combustible para lámparas, ingrediente básico para el *fuego griego*: nombre por el que se conoce el uso incendiario militar del aceite, inicialmente introducido con gran efecto por el Imperio Bizantino en las batallas navales. En el continente americano, también habían descubierto las aplicaciones medicinales del petróleo, y las tribus locales lo conocían desde mucho antes (Giebelhaus 2004).

2.1.2 Aire

2.1.2.1 Sol

La energía solar se tuvo muy en cuenta en la planificación urbanística de la antigua China desde antes del 5000 a.C., donde se valoraba mucho la orientación sur de las casas. De este modo, planificaron los núcleos urbanos con calles orientadas de este a oeste, para que todas las viviendas mirasen al sur. Posteriormente, en Grecia, en el 500 a.C., el conocido Sócrates, diseñó un tipo de construcción que aprovechaba al máximo los bajos rayos de Sol del invierno y daba sombra en verano. Además, se resguardaba de los vientos fríos del norte exponiendo la menor superficie posible, a la vez que ofrecía una gran apertura hacia el sur (Hashim, Jassim y Jbrael 2013; Tian y Qin 2007; Altın 2016; Perlin 2004).

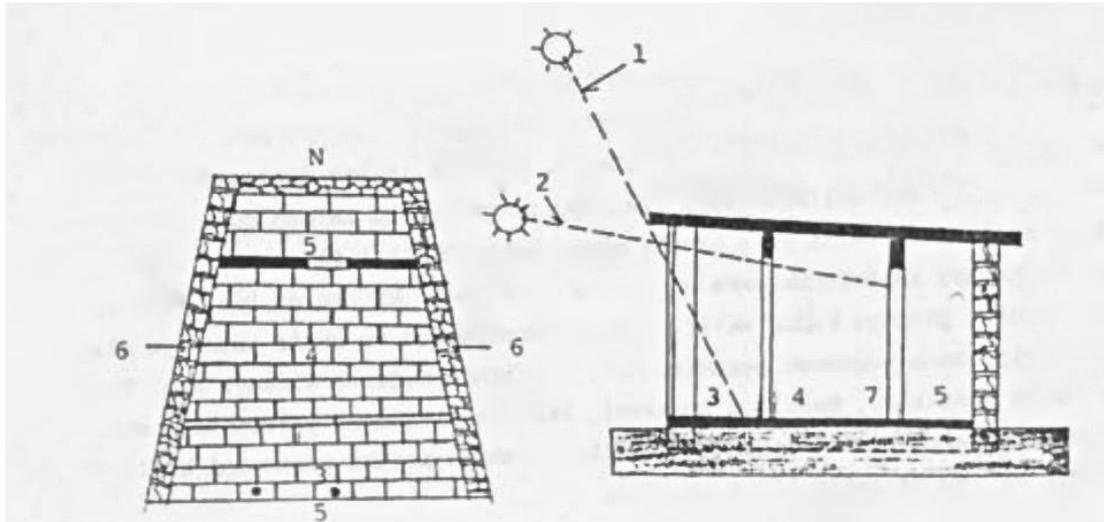


Ilustración 3: Boceto del diseño inicial de Sócrates. Fuente: *Buildings of the future: Solar architecture* (Altın 2016).

Todos los métodos que hemos descrito hasta ahora se basan en el calor como forma aprovechable de energía. No obstante, antiguamente también existieron otras maneras de sacar rendimiento a los recursos naturales sin necesidad de calor.

2.1.2.2 Viento

El viento es el aire en movimiento. Se genera originalmente por la energía solar, cuando esta calienta la superficie del planeta de forma desigual.

No sabemos cuándo se comenzó a utilizar la fuerza del viento para realizar un trabajo. Prehistóricamente, parece que la navegación a vela fue el primer uso que se le dio; puede ser que ocurriera hace 40.000 años, cuando los habitantes de Asia migraron a la actual Australia. Se conocen muy pocos detalles de estos viajes, sin embargo, las largas travesías por mar que realizaron posteriormente los pueblos polinésicos en sus catamaranes son incuestionables. El viento aportaba energía cinética a estos primeros veleros permitiendo la exploración y el asentamiento en las islas del Océano Pacífico, incluyendo Hawái, donde más tarde nacería el surf, que fue el primer uso recreativo de la energía eólica (Pasqualetti, Richter y Gipe 2004). Como ya sabemos, el viento agita el mar formando las olas, aunque

siguiendo esta lógica, deberíamos decir que el surf fue un uso de la energía solar, ya que es el Sol quién provoca el movimiento del aire...

Como en la prehistoria, el primer uso histórico de esta energía tuvo que ver con el transporte. Los egipcios navegaban el río Nilo en el 3100 a.C. utilizando naves con velas hechas de telas de lino y papiro.

In The Odyssey, Homer wrote of Odysseus, who sailed the Ionian and Aegean seas, eventually making a crucial error when he angered the god of the winds. Aeolus stopped the wind for 6 days, forcing Odysseus and his crew to rely on rowing, a very poor substitute. "No breeze, no help in sight, by our own folly—six indistinguishable nights and days," lamented Odysseus.

Fuente: Wind Energy, History of (Pasqualetti, Righter y Gipe 2004).

La historia de Odiseo recuerda una de las caprichosas características del viento. Aunque pueda ser aprovechado, nunca podrá ser controlado. Por este motivo, ha sido utilizado con éxito, pero solo esporádicamente. Los inventores e ingenieros de la historia han preferido fuentes de energía más manipulables. Aún así, la importancia de la energía del viento para la humanidad es innegable. De este modo, las naciones dependían de sus barcos a vela para prosperar en el camino hacia el comercio y la conquista.

Aunque la mayor parte de la historia de la utilización de la energía eólica tuviera lugar en los mares, hace tiempo que se trasladó a tierra firme su principal aplicación. Las primeras máquinas eólicas terrestres más simples datan aproximadamente del 200 a.C., en la frontera afgano-persa. Se trataba de molinos de viento de eje vertical, en contraposición a los primeros molinos de eje horizontal hallados en Holanda y en las costas europeas del Mediterráneo que se utilizaron más tarde, entre los años 1300 y 1875 d.C (Kaldellis y Zafirakis 2011).

2.1.3 Tierra

Es altamente probable que los primeros pueblos humanos utilizaran el agua geotérmica de piscinas naturales para cocinar, bañarse y mantenerse calientes. Tenemos registros arqueológicos que demuestran que los nativos americanos habitaron lugares de actividad geotérmica por más de 10.000 años para refugiarse y acelerar la recuperación tras las batallas (Cataldi y Chiellini 1995).

Históricamente, hay pruebas de como se utilizaron las aguas termales para bañarse, cocinar y calentar espacios. Los baños del Imperio Romano (50 d.C.), los spas de China y los baños turcos del Imperio Otomano fueron algunos de los primeros usos de la energía geotérmica para formar especialmente balnearios. En estas civilizaciones, la salud corporal y la higiene formaban parte de las preocupaciones y debates diarios entre algunos grupos. Más tarde, estas tendencias se trasladaron a Japón, Alemania, Islandia y otras regiones que formaron el Imperio Astro-húngaro, las Américas y Nueva Zelanda (Cataldi y Chiellini 1995; Lund et al. 2008; Ionescu et al. 2015).

2.1.4 Agua

El agua fluyente se ha utilizado para realizar trabajos durante miles de años; sus usos, muy particulares y variados, han evolucionado al son de los cambios políticos y económicos a través del tiempo.

La historia del uso de la fuerza del agua, sobre todo el comienzo, va ligado a la historia de la rueda hidráulica. A veces, era accionada por fuerza humana o animal con el fin de elevar el agua en vez de utilizar el flujo de agua para obtener energía mecánica. De todas formas, algunas de las primeras ruedas hidráulicas conseguían aprovechar la corriente de agua para mover la rueda y a la vez, elevar agua en calderos como es el caso de la Noria. Este tipo de rueda pudo ser empleado durante el Imperio Romano al menos en el 700 a.C (Breeze 2018).

Sin embargo, existen indicios basados en inscripciones babilónicas que sugieren que el uso de la fuerza hidráulica ya era conocido en la antigua Mesopotamia en el 4000 a.C. y se utilizó para el regadío. Aunque estas pruebas son difíciles de interpretar, son mucho más claras las evidencias encontradas sobre el uso durante el primer milenio a.C. Algunos papiros egipcios de los siglos III y II a.C. indican que ya hacían uso de las ruedas de agua y, aunque los antiguos griegos y romanos también empleaban un sistema similar por estos tiempos, no fue hasta el año 13 a.C. cuando el ingeniero y escritor romano Marcus Vitruvius Pollio describió un molino de grano accionado por rueda hidráulica que empleaba engranajes. Más tarde, los arqueólogos probaron la existencia de dichos dispositivos y de ruedas hidráulicas utilizadas para el regadío de campos (Fasol 2002; Gulliver y Arndt 2004).

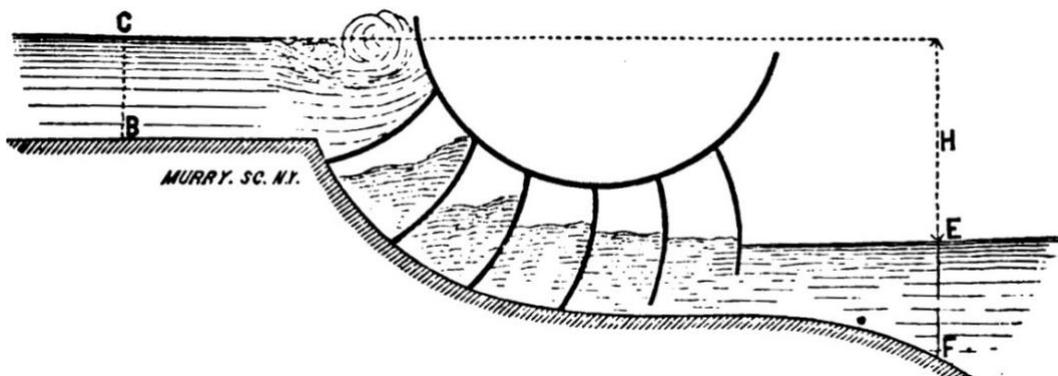


Ilustración 4: Rueda hidráulica. Fuente: *Water-wheels; or, Hydraulic motors* (Bresse 1876).

Las primeras tareas que llevaron a cabo fueron moler grano, serrar madera y accionar fábricas textiles; estas tareas se realizaban junto a la fuente de fuerza hidráulica, es decir, cascadas, ríos o canales. La variabilidad de aplicaciones de la rueda hidráulica aumentó considerablemente durante la Edad Media y el uso de estos dispositivos se extendió rápidamente hasta el siglo XIV. Aproximadamente, en el año 1500, la rueda de agua era la herramienta más importante para la generación energética en Europa y otros lugares de Asia; servía para accionar ascensores que movían agua, mena y escombros de las minas, dar fuerza a molinos de martillo o también para proporcionar la corriente de aire necesaria para los hornos de los primeros

trabajos metálicos, y, por supuesto, para mover los miles de molinos de grano a lo largo de los ríos. En el siglo XVI, Leonardo da Vinci hizo algunos borradores de lo que hoy llamaríamos turbina hidráulica (Fasol 2002).

2.2 Revolución industrial

Las innovaciones tecnológicas que ocurrieron a principios del siglo XVIII dieron como resultado un enorme crecimiento de la riqueza y el poder de los estados nacionales. El prolongado crecimiento en Europa occidental y Bretaña se esparció gracias a la exploración y el comercio. La competición por colonizar y controlar los brutos recursos naturales del Caribe y América, junto al imperialismo en Indochina, el medio oeste y el Mediterráneo, produjo importantes cambios en el mapa energético global.

Durante las primeras fases de industrialización, los crecimientos en diversidad de productos manufacturados y comercio coincidieron con la escasez de fuentes energéticas de fácil disponibilidad, lo que presionó hacia la innovación y desarrollo de las distintas industrias de los combustibles.

2.2.1 Situación previa

2.2.1.1 Agricultura y urbanización

La economía preindustrial en Gran Bretaña y Europa se encontraba dispersamente localizada y claramente dominada por la producción agrícola, el procesamiento y la manufacturación, con la mayor parte de la población asentada en áreas rurales. Hubo un nulo crecimiento económico o progreso tecnológico durante la geográfica y temporalmente extendida pérdida de población causada por la peste negra en la Europa y Gran Bretaña medieval. La subsecuente recuperación de la población tras la plaga trajo consigo el crecimiento urbanístico y propició un mayor control de los recursos energéticos por parte de los gobiernos tanto locales como nacionales. Al finalizar el período medieval, la industria rural y la economía urbana experimentaron expansión.

La población rural y urbana ajena a la actividad agrícola creció más rápidamente en Inglaterra que en el resto de Europa. Las industrias textiles de lana y algodón fueron las primeras empresas expansivas en Gran Bretaña. La industrialización del área rural surgió como respuesta al crecimiento de población combinado con el aumento en la demanda urbana de productos agrícolas (Periman 2004).

2.2.1.2 Competición por recursos energéticos

Durante milenios, el Mediterráneo ha sido el centro del comercio internacional, con rutas que conectaban África, Europa y Asia. Entre los siglos XV y XVI, la peste provocó que la red internacional de comercio se debilitara en Europa. Como las oportunidades para comerciar se vieron muy reducidas tras la epidemia, fue necesaria la búsqueda de nuevas fuentes en tierras más lejanas. Las pocas alternativas conocidas disponibles para ampliar mercado promovieron la exploración del Atlántico, África, el Caribe y América, donde el bajo coste de los recursos ofrecía una llamativa oportunidad de expansión de mercado. Durante el siglo XV, Portugal se encargó de establecer puntos de comercio a lo largo de la costa oeste africana, región en la que produjo azúcar en plantaciones con mano de obra esclava y comerció con oro (Periman 2004). Las rutas de transporte de mercancías entre Europa y América eran largas, lentas y costosas, por ello, el coste por unidad de producción de bienes americanos debía ser lo suficientemente asequible como para generar beneficios para todas las partes envueltas tras su venta en Europa. Los habitantes indígenas de América fueron forzados a la esclavitud en la realización de múltiples trabajos, entre otros, obtener plata en las minas para las colonias españolas y así, abastecer a Europa. Cuando las poblaciones indígenas enfermaron de las epidemias procedentes del *viejo mundo*, la producción de bienes comenzó a ser dependiente de la mano de obra esclava procedente de África. Este sistema socioeconómico permitió la producción a gran escala, siempre basada en la máxima explotación de la fuerza del ser humano como fuente de energía. La mayor parte de la producción y comercio que formaba parte de la economía de esclavos fue controlada fundamentalmente por los

generando empleo en Inglaterra, lo que estimularía el crecimiento demográfico y serviría, más tarde, como ingrediente para posibilitar la revolución industrial.

2.2.1.3 De la madera al carbón

Recordemos que el carbón ya se había desarrollado en China, pero seguía siendo ignorado en Europa. Las zonas deforestadas de Europa no se recuperaban con suficiente velocidad y tuvieron que recurrir a importar madera menos económica del Báltico y Norte América. Además, el clima no cooperó, entre 1450 y 1850, los inviernos se volvieron largos y severos. La inmensa industria textil era líder en consumo energético. Se requerían altas temperaturas para elaborar cerveza y procesar sal y azúcar. El sector de la construcción y empleaba altos hornos para la fabricación de ladrillos y vidrio. Durante los siglos XIII y XIV, multitud de industrias dependían de un suministro regular de carbón. Se incrementó la eficiencia energética, estimulando la competitividad. Entre 1650 y 1680, la producción de carbón aumentó un 370%. Finalmente, para 1750, la población inglesa se había duplicado (Periman 2004).

2.2.2 Sofisticación

Durante la década de 1790, el ingeniero francés Philippe Lebon destiló gas a partir de madera y concluyó que podía aportar calor e iluminar espacios interiores. En 1816, Londres tenía 26 millas de tubería de gas (Periman 2004). Con la disponibilidad del keroseno y la luz de gas, la industria del aceite de ballena no tardó en desaparecer. Mientras tanto, también evolucionaron las finanzas, el marketing, el transporte y la distribución.

El momento crucial para la industria carbonera británica, un momento también decisivo para la revolución industrial, vino marcado por la llegada de la energía de vapor.

2.2.2.1 La energía de vapor

En las minas italianas de 1600, se encontraron con un problema, no eran capaces de evacuar el agua para continuar ganando profundidad. Entonces, Galileo se unió a la investigación. Su ayudante, Evangelista, concluyó que la presión atmosférica era menor cuando aumentaba la altitud. Torricelli llegó a la conclusión de que un método que provocase vacío repetidamente podría servir de fuente de energía para drenar las minas.

En 1680, Christian Huygens, diseñó un sistema en el que explotaba pólvora dentro de un cilindro. En 1690, su asistente, Papin, se dio cuenta de que 1 unidad de volumen de agua generaba 1300 veces el mismo volumen de vapor. Thomas Savery, en 1698, diseñó una bomba de vapor que empleaba calor para elevar el agua generando 1 caballo de potencia. Thomas Newcomen, adaptó el anterior diseño; su experiencia en la minería le ayudó a generar 5 caballos de potencia y conseguir un gran éxito. La industria minera consiguió profundizar sus excavaciones y creció exponencialmente. James Watt se percató de que se estaba desperdiciando energía en el proceso, pero sus diseños no podían llevarse a cabo porque era necesaria una gran mejora de precisión en la construcción de las piezas. Cuando se superó el problema, el motor de Watt aportaba como mínimo 10 caballos de potencia (Periman 2004).

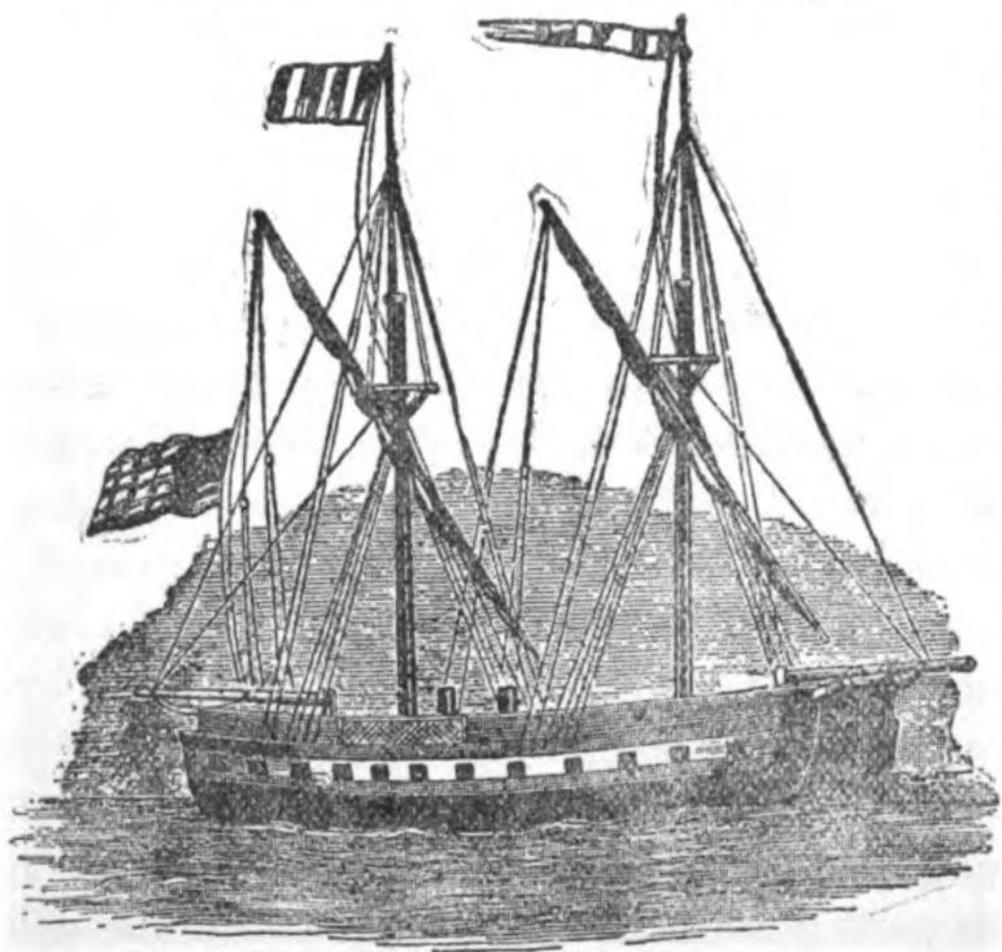
2.2.2.2 El vapor para el transporte

Las máquinas de vapor fueron determinantes para el desarrollo del transporte. La creciente demanda de combustibles más allá de donde era localmente disponible avivó la innovación. Durante el siglo XVIII, los canales británicos habían mejorado; los barcos con pesados cargamentos navegaban atados a caballos, que tiraban desde las orillas.

Continuó la evolución de la máquina de vapor. En 1783, un barco de vapor, propulsado mediante rueda de paletas, fue capaz de ascender un río cerca de Lyon, Francia. Seguidamente, Trevithick construyó su primer carguero, y

en 1802, consiguió construir la primera locomotora para ferrocarril. Así, demostró que sus motores no tenían rival y encontró numerosas aplicaciones industriales. El transporte de pasajeros fue un factor clave para el fenómeno de la revolución industrial. Gran Bretaña exportó el sistema locomotor a Europa y América, donde se establecieron rápidamente. Esta tecnología transformó las redes globales de comunicación, extendiendo y uniformando los diferentes sistemas económicos.

Más tarde, en 1840 la marina estadounidense adaptó este sistema de propulsión para su flota, situando la máquina bajo la línea de flotación para una mayor protección y estabilidad.



WAR STEAMER FULTON THE FIRST, OR, DEMOLOGOS.

Ilustración 6: Demologos, primera embarcación a vapor de la marina de Estados Unidos. Fuente: The steam navy of the United States: a history of the growth of the steam vessel of war in the U.S. Navy, and of the Naval Engineer Corps (Bennett 1896).

"DEMOLOGOS"

Figure 1st Transverse section A her Boiler, B the steam Engine, C the water wheel,
E, E her wooden walls 5 feet thick, diminishing to below the waterline as at FF,
draught of water 9 feet DD her gun deck.

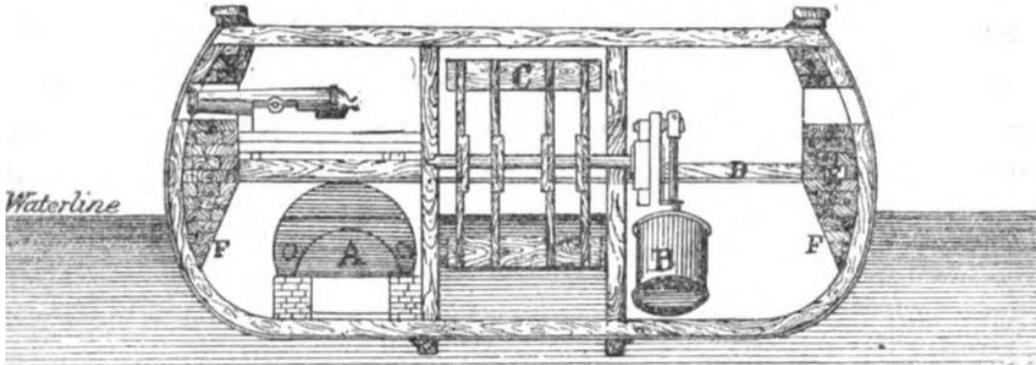


Fig. I.

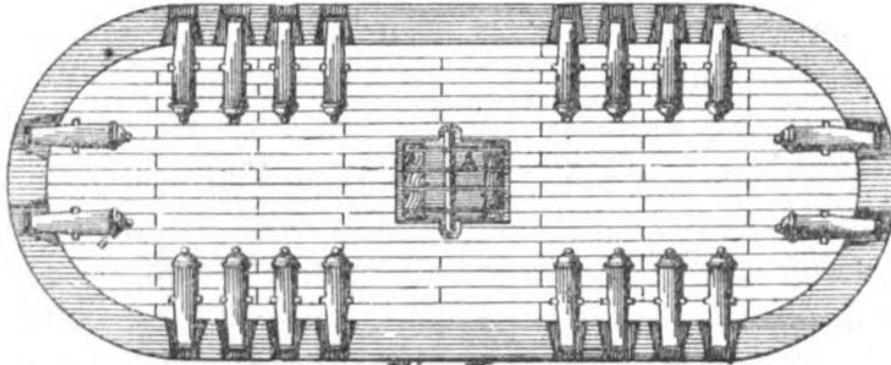


Fig. II

Figure II This shows her gun deck 140 feet long
26 feet wide, mounting 20 guns A the Water wheel.

Side View

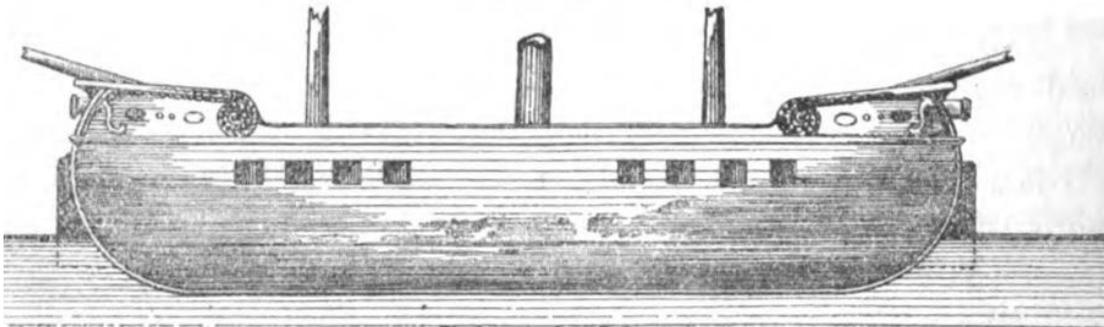


Fig. III.

ROBERT FULTON
November 28th

FROM STUART'S NAVAL AND MAIL STEAMERS OF THE UNITED STATES.

Ilustración 7: Plano realista del Demologos. Fuente: The steam navy of the United States: a history of the growth of the steam vessel of war in the U.S. Navy, and of the Naval Engineer Corps (Bennett 1896).

La transición hacia una industrialización más intensificada iba a necesitar mejoras en los sistemas de transporte. Cuando llegó la época victoriana (1837 – 1901), también lo hicieron las modernizaciones en infraestructuras. La construcción del ferrocarril en Gran Bretaña, Europa, Asia, Rusia, África y América sirvió como conector para la explotación energética en la mayoría de las regiones del planeta, creando un motor de dinamismo económico que, a su vez, era producto de la ya mecanizada industria.

2.2.2.3 Petróleo

El petróleo consiste en una compleja mezcla de hidrocarburos. El uso de productos del petróleo es muy anterior al uso del gas procedente del carbón.

De cualquier modo, la industria moderna del petróleo surgió tras la desaparición de la industria ballenera del aceite y la escasez de aceite de carbón. La destilación del crudo reveló que sus derivados eran aplicables a muy diferentes tareas como por ejemplo impermeabilizar la vestimenta, lubricar maquinaria, mezclarse en pinturas y barnices o pavimentar terreno. Se mejoraron los métodos de refinamiento, las máquinas perforadoras eran más potentes y se descubrieron mayores reservas de petróleo, además, los ferrocarriles pasaron a ser alimentados por petróleo conectando los mercados mundiales. Los lubricantes derivados del petróleo se convirtieron en necesarios con las innovaciones en vehículos y maquinaria.

2.2.2.4 Electrificación

En la antigua Grecia, se descubrió que el *elektron* (ἤλεκτρον), para nosotros, ámbar, atraía materiales de baja densidad al frotarlo. Sin embargo, el uso de la electricidad para calentar, iluminar y accionar sistemas dependió del desarrollo de los métodos mecánicos para generar y controlar la electricidad.

Durante los siglos XVII y XVIII, se descubrió que la electricidad estática era diferente de la corriente eléctrica. La electricidad podía ser positiva o negativa, porque los cuerpos con carga se atraían o repelían entre ellos, y así, se distinguieron los materiales conductores y los aislantes. Benjamin Franklin identificó la descarga eléctrica de los rayos de tormenta. En Italia, Alessandro Volta, descubrió un método que proporcionaba una fuente de corriente continua. En cuestión de meses, los laboratorios produjeron baterías, convirtiendo la energía química en eléctrica. En 1820, un físico danés describió el campo magnético alrededor de un conductor activo. A partir de 1834, se comercializaron los generadores de corriente alterna de bobina rotatoria en Londres. Esta máquina solo necesitaba rotación para generar electricidad, así que, con la ayuda de la máquina de vapor, suministraron suficiente electricidad como para iluminar viviendas.

Los inventores Edison y Swan desarrollaron la lámpara de filamento para uso doméstico durante la década de 1870. La creciente demanda de iluminación industrial requería generación a gran escala. La estación de generación eléctrica de Edison se abrió en Nueva York en 1882. Las baterías servían para iluminar el ferrocarril e incluso, impulsar vehículos. En las cataratas del Niágara, apareció la primera planta de generación hidroeléctrica de gran potencia, con 200.000 caballos de potencia.

2.3 Crecimiento demográfico

No existe una relación directa entre el crecimiento (o decrecimiento) demográfico y la energía. Todas las relaciones entre población y energía fluyen a través de la tecnología y organización social humanas.

2.3.1 Crecimiento inicial de la población humana

Las nuevas conexiones marítimas entre Europa y América se basaron en una revolución tecnológica, especialmente en arquitectura naval, entre 1400 y 1450. Originalmente, las embarcaciones eran de vela cuadrada aparejada sobre un mástil. Los portugueses desarrollaron la carabela, una

revolucionaria nave de tres mástiles. A la vela cuadrada se le añadieron otras dos, una en la proa y otra, latina, en la popa. Además, mejoraron el sistema de gobierno. Esta novedad, al añadir superficie velica, permitió utilizar más energía eólica, y de forma más eficiente. El diseño sentó las bases para los próximos 500 años, durante los cuales, las embarcaciones fueron aumentando en tamaño.

Como resultado inmediato de esta transformación energética, los ritmos de crecimiento anual euroasiáticos salieron del estancamiento del 0,1% y llegaron al 0,2% (Ness 2004). Por el contrario, en América hubo una gran caída. Las nuevas plantaciones traídas a Europa y Asia contribuyeron a aumentar la proporción calórica de la tierra cultivada, reduciendo la mortalidad, y aumentando el ritmo de crecimiento demográfico. Históricamente, la mortalidad ha sido alta y muy variable; los cambios climáticos anuales traían consigo fuertes altibajos en la tasa de mortalidad. Gracias a la modernización, se redujo y estabilizó el número de muertes.

Desafortunadamente, de Europa llevaron los microorganismos. Dos mil años de comercio euroasiático habían creado cierto grado de inmunidad a estas poblaciones. Sin embargo, la población americana carecía de esta inmunidad; un siglo de colonización fue suficiente para perturbar a la completa población del Caribe. Las grandes civilizaciones como los Aztecas y los Incas fueron enormemente reducidas, y lo mismo ocurrió con la sociedad india del resto de América.

El impacto de la energía sobre la población es muy complejo. Los resultados derivaron de los cambios tecnológicos que incrementaron el consumo energético, y tuvieron consecuencias extremadamente opuestas en diferentes poblaciones y regiones, produciendo un crecimiento demográfico en una parte del planeta y un gran desastre en otra.

2.3.2 Primer crecimiento demográfico moderno

Los ritmos de crecimiento de Europa y Asia habían estado ligados en el 0,2% anual hasta 1700 (Ness 2004). A partir de aquí, Asia mantuvo el ritmo y Europa comenzó a experimentar un disparado aumento poblacional como resultado de la transición demográfica de altas tasas de natalidad y mortalidad hacia unas mucho más bajas.

Los pasados niveles de alta fertilidad permanecieron así, y consecuentemente, hubo un período de rápido crecimiento demográfico del 0,9% anual. Pronto, la tasa de natalidad descendió, igualándose a las de mortalidad en 1950 (Ness 2004).

Durante la revolución industrial se produjo un considerable aumento en el consumo energético, que coincidió con la transición de una sociedad rural y agraria hacia una urbana e industrial. Esto transformó el concepto de los niños: pasaron de ser una ayuda a significar una carga económica, lo que, en parte, explicaría el descenso en la fertilidad.

Una vez más, la relación entre crecimiento demográfico y energía se muestra compleja en indirecta, cambiando la distribución regional de la población mundial.

2.3.3 Segundo crecimiento demográfico moderno

La transición demográfica que se completó en el mundo occidental a mediados del siglo XX esta ocurriendo ahora en Asia, Latinoamérica y África.

El patrón de esta nueva transición es el mismo del pasado: primero desciende la mortalidad mientras la natalidad permanece igual. Sin embargo, aunque con el mismo patrón, los ritmos, números absolutos y tiempos son enormemente diferentes.

2.3.4 Correlación

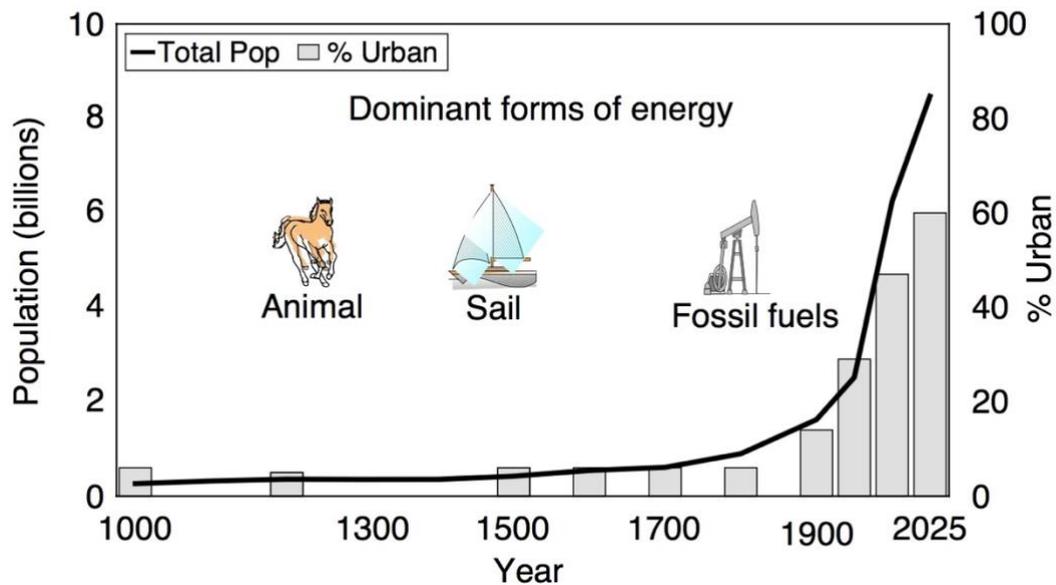


Gráfico 1: Cambios en la población mundial, urbanización y energía. Fuente: *Population growth and energy* (Ness 2004).

Observando a largo plazo y a nivel global, existe una clara y cercana relación entre el crecimiento demográfico y el consumo energético. El consumo energético creció lentamente en el siglo XIX, pero lo hizo exponencialmente en el siglo XX. La sociedad urbana e industrial basada en los combustibles fósiles trajo consigo mejoras en la calidad de vida y un sustancial crecimiento de población. Durante el siglo XX, el consumo energético creció más rápidamente que la población, ocasionando un incremento en el consumo per cápita.

2.4 Historia reciente: producción energética global

A continuación, se presenta un gráfico que refleja la producción energética global separada por fuentes desde 1800. Observemos como ha evolucionado la industria energética de los últimos 200 años.

Global primary energy consumption

Global primary energy consumption, measured in terawatt-hours (TWh) per year. Here 'other renewables' are renewable technologies not including solar, wind, hydropower and traditional biofuels.

Our World
in Data

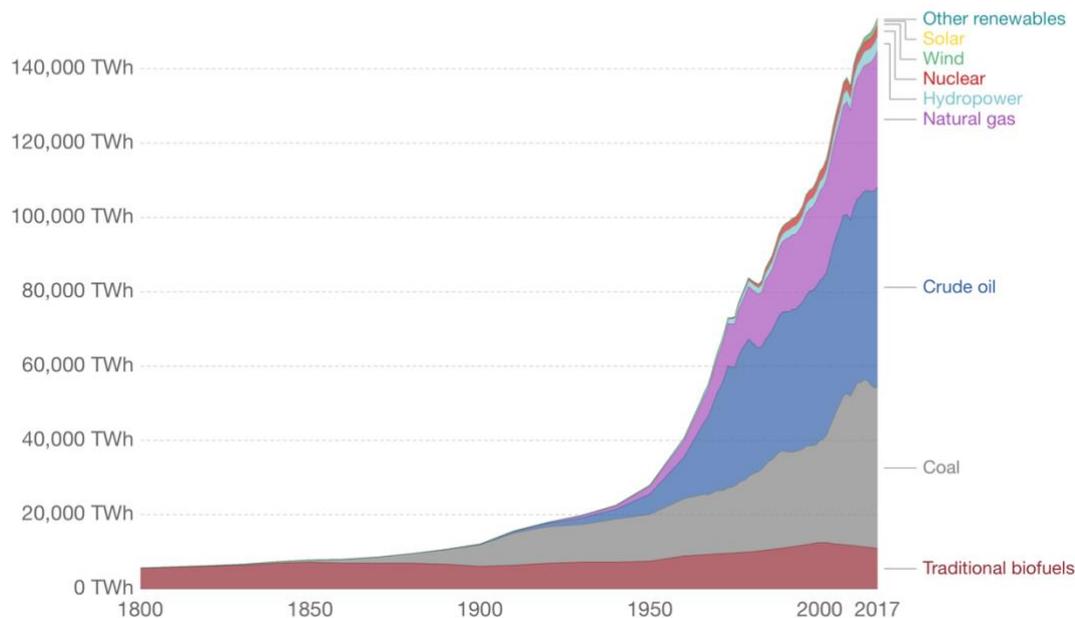


Gráfico 2: Producción energética global por fuente de 1800 a 2017. Fuente: *Energy Production & Changing Energy Sources* (Ritchie y Roser 2019).

Allá por 1800, como hemos visto, prácticamente la totalidad de la energía procedía de la quema de madera, es decir, biomasa. A partir de 1850, se hace apreciable el aumento en el consumo de carbón. En 1870 se puede notar la expansión hacia el petróleo, y dos décadas después, hacia el gas natural y la energía hidráulica. A comienzos del siglo XX, el carbón significaba ya casi la mitad de la producción energética, mientras que la biomasa estaba perdiendo importancia.

En 1950, el consumo de combustibles fósiles crecía a un ritmo acelerado y la diversificación de fuentes de energía se hizo considerable; el carbón predominaba, y el petróleo significaba el 20% (Ritchie y Roser 2019). Poco después, en los años 60, comenzó la producción eléctrica nuclear. La producción eléctrica de las energías renovables (modernos biofuel, solar y eólica) se hizo realidad a partir de 1980 y resultan casi inapreciables. Además, otras fuentes renovables como la geotérmica o la mareomotriz han sido descartadas de la gráfica debido a su insignificante proporción dentro de la mezcla energética.

En conclusión, en 2017, el consumo energético es, aproximadamente, 25 veces el de 1800.

3 Consumo energético actual: descripción y consecuencias

Cabe aclarar que, debido a la accesibilidad de datos sobre energía, tomaremos el año 2017 como actual.

3.1 Consumo energético global

En primer lugar, observaremos los cambios en el consumo energético primario diferenciando fuentes y explicando su evolución durante el último año (2017). Esto se conseguirá gracias a los datos recogidos en diferentes informes estadísticos publicados por organismos públicos y privados. A continuación, se muestra un gráfico que relaciona el consumo energético por fuente, medido en millones de toneladas de petróleo equivalente, y el tiempo desde 1992 hasta 2017.

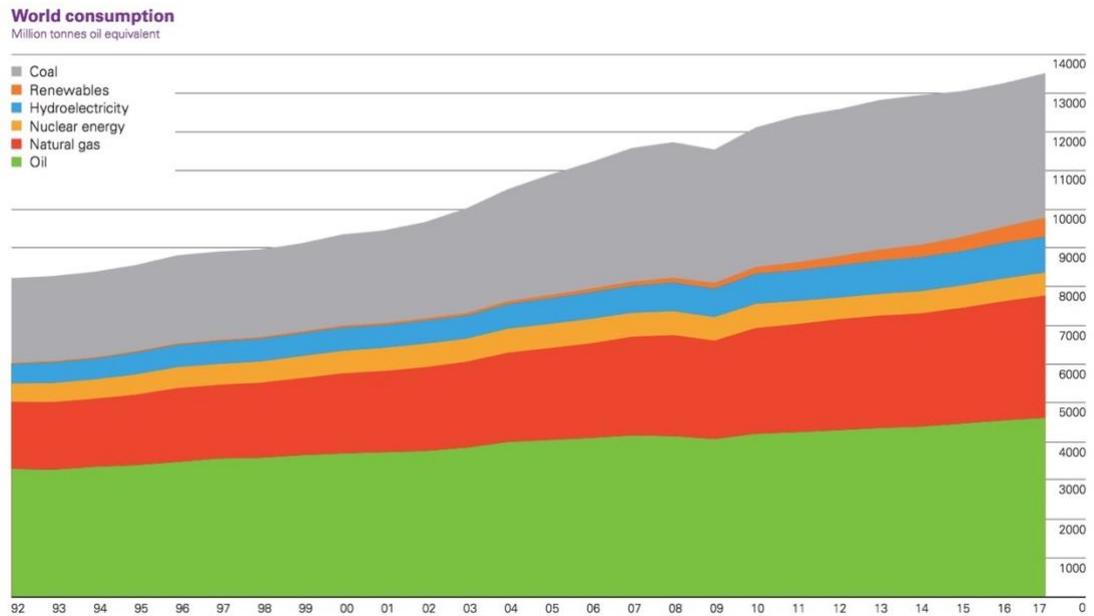


Gráfico 3: Cambios en el consumo energético por fuente de los últimos 25 años. Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2018 (British Petroleum Company 2018).

En líneas generales, el consumo energético global creció al 2,2% durante 2017, habiendo crecido al 1,2% en 2016 y registrando así la mayor rapidez desde 2013. China fue el mayor mercado creciente en energía por 17º año consecutivo, se incrementó un 3,1%. Por tipo de combustible, el gas natural se anotó el mayor incremento en consumo energético, seguido de las renovables y el petróleo.

El gas natural creció un 3%; su mayor crecida desde 2010. El incremento del consumo fue marcado por China, Oriente Medio, y Europa; mientras tanto, el consumo descendió en Estados Unidos. El gas natural en China fue el mayor contribuyente por fuente y país al incremento del consumo energético global.

El consumo de carbón experimentó su primer incremento desde 2013, siendo este del 1% y principalmente motivado por India y China.

Las energías renovables alcanzaron su máximo valor creciendo a un ritmo del 17%, ritmo superior que la media de los últimos 10 años. Las energías renovables en China fueron el segundo mayor contribuyente por fuente y país al incremento del consumo energético global.

La generación hidroeléctrica aumentó solo un 0,9%, frente al 2,9% que venía ocurriendo en los últimos 10 años. Para China, este año ha sido el más lento en crecimiento desde 2011, mientras que en Europa, este sector decayó un 10,5%.

La generación nuclear aumentó un 1,1%. Los crecimientos en la producción china y japonesa se vieron muy amortiguados por los descensos en Corea del Sur y Taiwán.

En cuanto a la aplicación, la generación eléctrica creció al 2,8%, ritmo similar al de los últimos 10 años. El 94% de este crecimiento es responsabilidad de las economías emergentes, y ha sido posible gracias, en gran parte (49%), a las energías renovables, y en menor parte (40%), al carbón.

Las emisiones de carbono provocadas por el consumo energético han aumentado un 1,6% después de haber experimentado un crecimiento casi nulo en los 3 años anteriores (2014 - 2016). Puede que la anterior estabilización de las emisiones se debiera a los adelantos en eficiencia energética que amortiguaron el incremento en la demanda energética, junto con el incremento en energías renovables y los sucesivos descensos en el consumo de carbón, que hicieron reducir el peso de los combustibles fósiles en la mezcla energética.

3.2 Mezcla energética

3.2.1 Últimas tendencias

En segundo lugar, analizaremos los cambios ocurridos en la mezcla energética en el mismo año de referencia. Hay que entender que, en este tipo de análisis, cuando una de las fuentes experimenta cambios, estos son relativos al resto de fuentes; es decir, si, por ejemplo, vemos un descenso en las renovables, no necesariamente significa que se haya reducido la producción energética renovable, sino que, quizás, hayan sido otras fuentes

las que experimentaron un aumento más significativo, alterando así, todas las partes restantes de la mezcla energética.

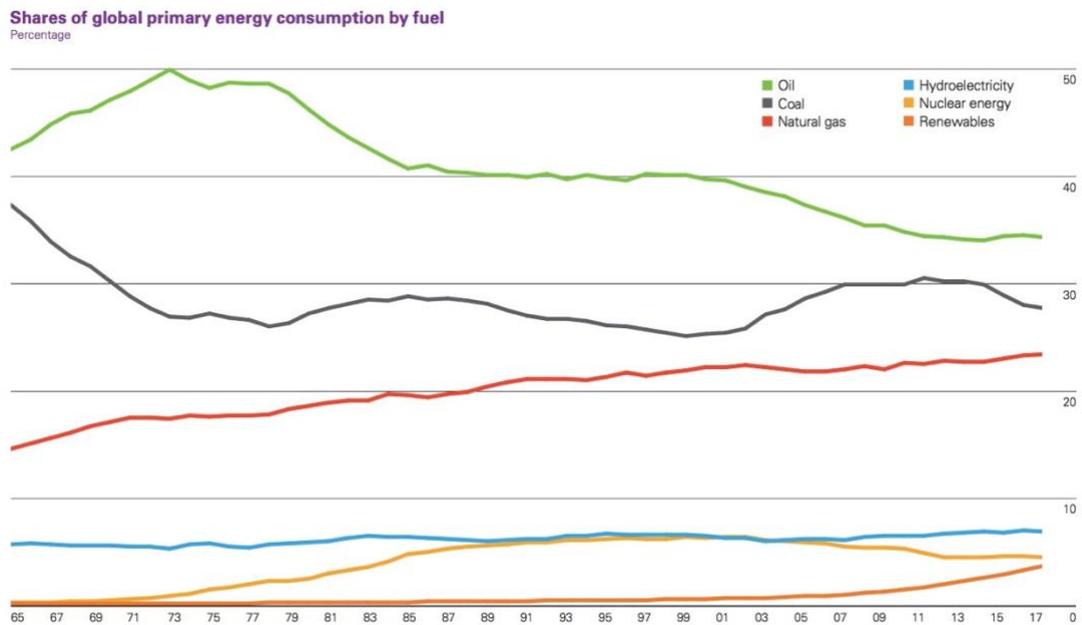


Gráfico 4: Cambios en las proporciones de la mezcla energética global en los últimos 50 años. Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2018 (British Petroleum Company 2018).

El petróleo continúa siendo el combustible dominante, siendo su parte mayor que un tercio del total de la mezcla energética. En 2017 el mercado del petróleo descendió suavemente después de dos años consecutivos de crecimiento. La porción de mercado correspondiente al carbón cayó hasta el 27,6%, siendo este el valor más bajo desde 2004. El gas natural batió su propio record histórico alcanzando el 23,4% del consumo energético global. Las renovables también lo hacían en un 3,6%, significando así, un 8,4% de la producción eléctrica global, frente a un 7,4% en 2016.

No obstante, resulta interesante fijarse en la mezcla energética dividida por regiones. Así, se puede comprender de forma más completa la situación energética actual.

3.2.2 Mezcla energética por región

En origen, muchos son los factores que intervienen a la hora de determinar la mezcla energética de una región. La accesibilidad de las fuentes, tanto geográfica como económica, el estado de desarrollo tecnológico y económico, los destinos de inversión y otros factores juegan un papel importante en la utilización de las diferentes fuentes energéticas.

El siguiente gráfico expone la proporción de consumo energético correspondiente a cada fuente separada por regiones durante el año 2017. Aquí, no es posible sacar conclusiones sobre los niveles de consumo en las diferentes regiones, es decir, puede que en una región predomine un tipo de fuente energética, y en otra, esta sea la minoritaria, pero, en valores absolutos, es probable que, en realidad, se esté consumiendo más energía en la segunda región que en la primera. Por lo tanto, podemos obtener las siguientes sencillas conclusiones.

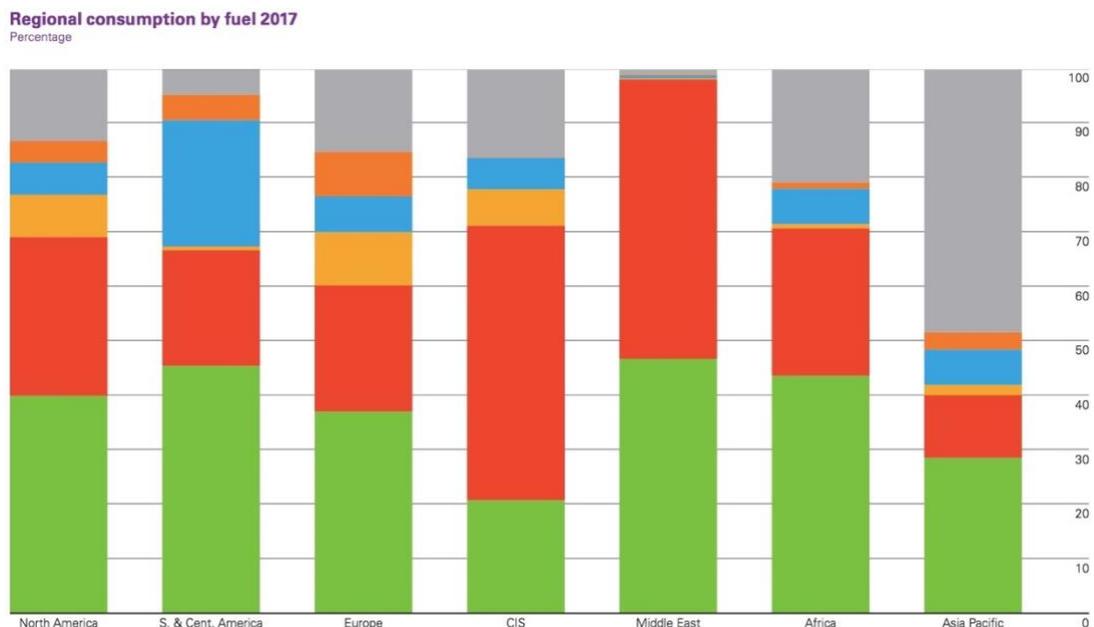


Gráfico 5: Mezcla energética por región en 2017. Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2018 (British Petroleum Company 2018).

Continúa prevaleciendo el petróleo en África, Europa y todo América, mientras el gas natural domina en CIS y Oriente Medio. El carbón es la

fuentes más demandadas en la región de Asia Pacífico, sin embargo, en Norte América, Europa, CIS y África, su porción dentro de la mezcla energética en el 2017 significó la mayor baja registrada.

3.2.2.1 Países, regiones y agrupaciones geográficas

Con todo esto, caben aclarar algunos asuntos relativos a las agrupaciones geográficas. Los países y las agrupaciones geográficas fueron hechas con puros propósitos estadísticos y no con la intención de implicar ningún juicio sobre asuntos políticos, sociales o económicos.

3.2.2.1.1 Norte América

Estados Unidos (excluye territorios), Canadá y México.

3.2.2.1.2 Centro y Sur de América

Caribe (incluye Puerto Rico e Islas Vírgenes estadounidenses), Bermuda, Centro América y América del Sur.

3.2.2.1.3 Europa

Miembros europeos de OECD más Albania, Bosnia-Herzegovina, Bulgaria, Croacia, Chipre, la ex República Yugoslava de Macedonia, Georgia, Gibraltar, Letonia, Lituania, Malta, Montenegro, Rumanía y Serbia.

3.2.2.1.4 Comunidad de Estados Independientes (CIS)

Armenia, Azerbaiyán, Bielorrusia, Kazakstán, Kirguistán, Moldavia, Federación Rusa, Tayikistán, Turkmenistán, Ucrania y Uzbekistán.

3.2.2.1.5 Oriente Medio

Península Arábiga, Irán, Iraq, Israel, Jordania, Líbano y Siria.

3.2.2.1.6 Asia Pacífico

Brunei, Camboya, China, región administrativa especial de Hong Kong China, región administrativa especial de Macao China, Indonesia, Japón, Laos, Malasia, Mongolia, Corea del Norte, Filipinas, Singapur, Asia Sur

(Afganistán, Bangladesh, India, Myanmar, Nepal, Pakistán, Sri Lanka), Corea del Sur, Taiwán, Tailandia, Vietnam, Australia, Nueva Zelanda, Papúa Nueva Guinea y Oceanía.

3.2.2.1.7 África

Territorios del continente africano (incluyendo Madagascar y Cabo Verde).

3.2.2.1.8 Miembros OECD

Europa: Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Letonia, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Polonia, Portugal, Eslovaquia, Eslovenia, España, Suecia, Suiza, Turquía y Reino Unido.

Otros países miembros: Australia, Canadá, Chile, Israel, Japón México, Nueva Zelanda, Corea del Sur y Estados Unidos.

3.2.2.1.9 Miembros UE

Austria, Bélgica, Bulgaria, Croacia, Chipre, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Holanda, Polonia, Portugal, Rumanía, Eslovaquia, Eslovenia, España, Suecia y Reino Unido.

3.3 Observación del medioambiente

La compleja situación energética que se vive hoy en día es producto de la evolución analizada anteriormente. Las pasadas transiciones hacia los combustibles fósiles han desempeñado un papel fundamental en los cambios históricos globales, siendo la principal motivación de las revoluciones industriales y los progresos en tecnología, sociedad, economía y desarrollo. De cualquier modo, los combustibles fósiles también han provocado importantes impactos negativos, convirtiéndose en la principal fuente de contaminación local y emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero. El hecho de haber llegado a estas conclusiones es fruto del cada vez más amplio entendimiento del ecosistema

del planeta. En gran parte, esto se ha hecho posible gracias a la cooperación internacional y al avivado interés por conocer el sistema climático, entre otros.

Entre las herramientas disponibles para evaluar los distintos niveles de cambios en la composición atmosférica provocados por el ser humano incluimos, la paleoclimatología terrestre; las modernas observaciones del cambio climático, especialmente las observaciones satelitales globales; y los modelos climáticos y teóricos, que ayudan en la interpretación de las observaciones en todas las escalas temporales y son útiles para realizar futuras proyecciones climáticas bajo diferentes escenarios de forzamiento climático.

3.3.1 Evolución del sistema climático

Los datos más precisos en la historia del clima vienen de los registros de termómetros hechos desde 1850 hasta la actualidad, mostrados en el gráfico siguiente, y diferenciados según los instrumentos de medida empleados en los diferentes períodos temporales.

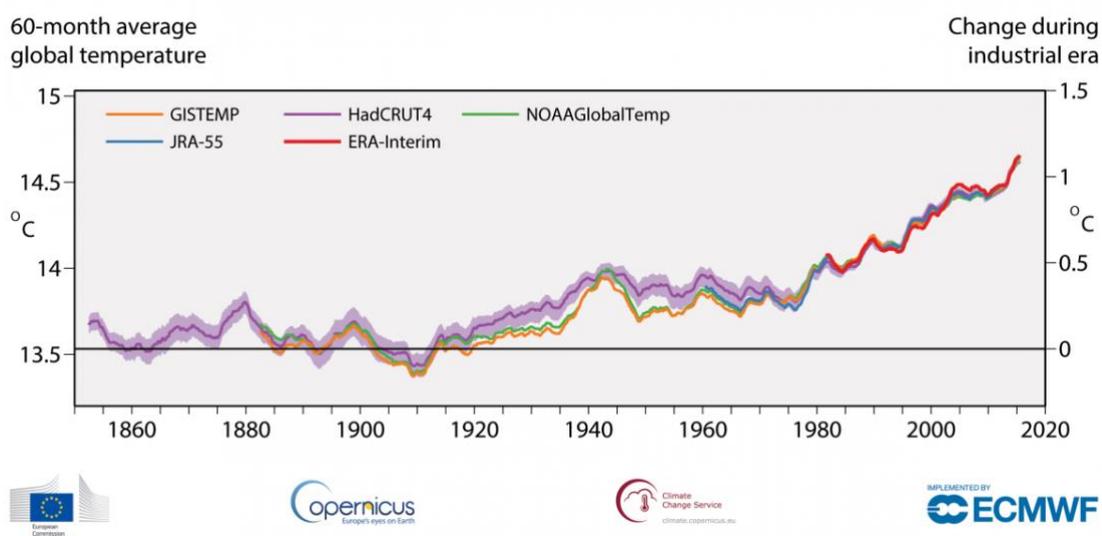


Gráfico 6: Temperatura media global medida a 2m de altitud (eje izquierdo) y cambio de temperatura estimado con respecto a los niveles preindustriales (eje derecho) según diferentes conjuntos de datos: ERA-Interim (Copernicus Climate Change Service, ECMWF); GISTEMP (NASA); HadCRUT4 (Met Office Hadley Centre), NOAAGlobalTemp (NOAA); y JRA-55 (JMA). Fuente: EUROPEAN STATE OF THE CLIMATE 2017 | HEADLINE CLIMATE INDICATORS (Copernicus Climate Change Service 2017).

Los dos hemisferios no muestran el mismo comportamiento, tal vez, debido a que dos tercios de la masa terrestre están al norte del Ecuador. Además, es preciso ser cauteloso para tener en cuenta la temperatura registrada en las ciudades, pues son puntos calientes, en gran parte por que el asfalto absorbe más calor que la flora original que cubrieron. La evolución de las temperaturas presenta fluctuaciones a largo y a corto plazo. A corto plazo se puede observar que normalmente varían entre 0,1 °C y 0,3 °C; y por eso, los científicos se basan en las tendencias.

Si queremos observar la historia del clima más allá de 1850, hemos de estudiar los hielos y sus registros naturales para deducir las temperaturas de la época. A continuación, un gráfico muestra la media global de temperatura calculada a partir del estudio del hielo desde el 12.000 a.C. Aquí, en el eje izquierdo los cambios de temperatura están reflejados en la escala Fahrenheit, y repartidos por la función, aparecen algunas breves descripciones de lo ocurrido en determinados momentos destacables.

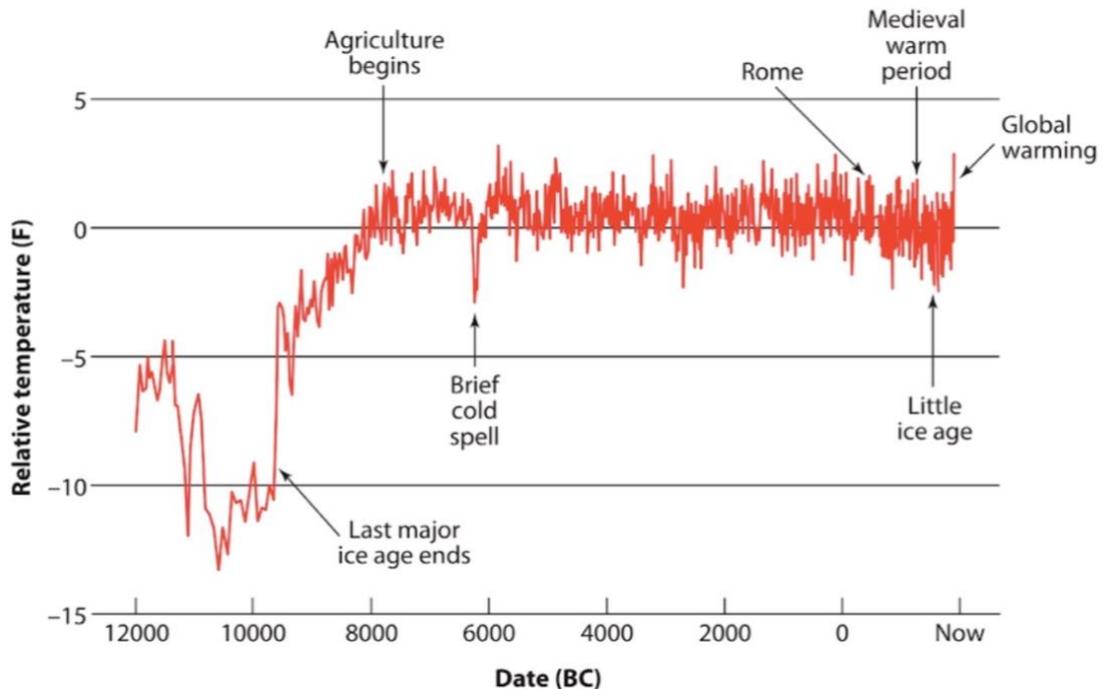


Gráfico 7: Temperatura media global desde el año 12.000 a.C. Fuente: *Physics and Technology for Future Presidents: An Introduction to the Essential Physics Every World Leader Needs to Know* (Muller 2010).

En esta gráfica el calentamiento global se ve minúsculo, pero hay que recordar que la preocupación no solo reside en 1 °C de aumento si no en el potencial aumento de 5 °C. En un tiempo relativamente reciente ocurrió la Pequeña Edad de Hielo, que en la gráfica muestra un descenso de aproximadamente 1 °C respecto al nivel observado en los mil años anteriores. También podemos ver la Breve Ola de Frío alrededor del 6.000 a.C., cuyas causas continúan sin ser totalmente comprendidas.

Sin duda, lo más destacable de esta gráfica sería el período de frío extremo que comienza más allá del límite izquierdo de la gráfica y termina bruscamente aproximadamente en el año 9.000 a.C. Esta fue la última Edad de Hielo, la temperatura media era unos 5 °C o 6 °C inferior. Aunque no se visualice en la gráfica, este gélido período comenzó unos 80.000 años antes, tiempo muy extenso si lo comparamos con lo que ha transcurrido desde que finalizó dicha Edad. De forma regular, las grandes edades de hielo han demostrado retornar tomando un patrón de 80.000 a 90.000 años de frío extremo seguido de un corto período de 10.000 a 20.000 años de calor interglaciar. La agricultura empezó a desarrollarse durante los inicios del cálido período actual.

Se exponen tres gráficas, cada una contenida en la anterior, que muestran la temperatura global en la profundidad del océano durante los pasados 65,5 millones de años.

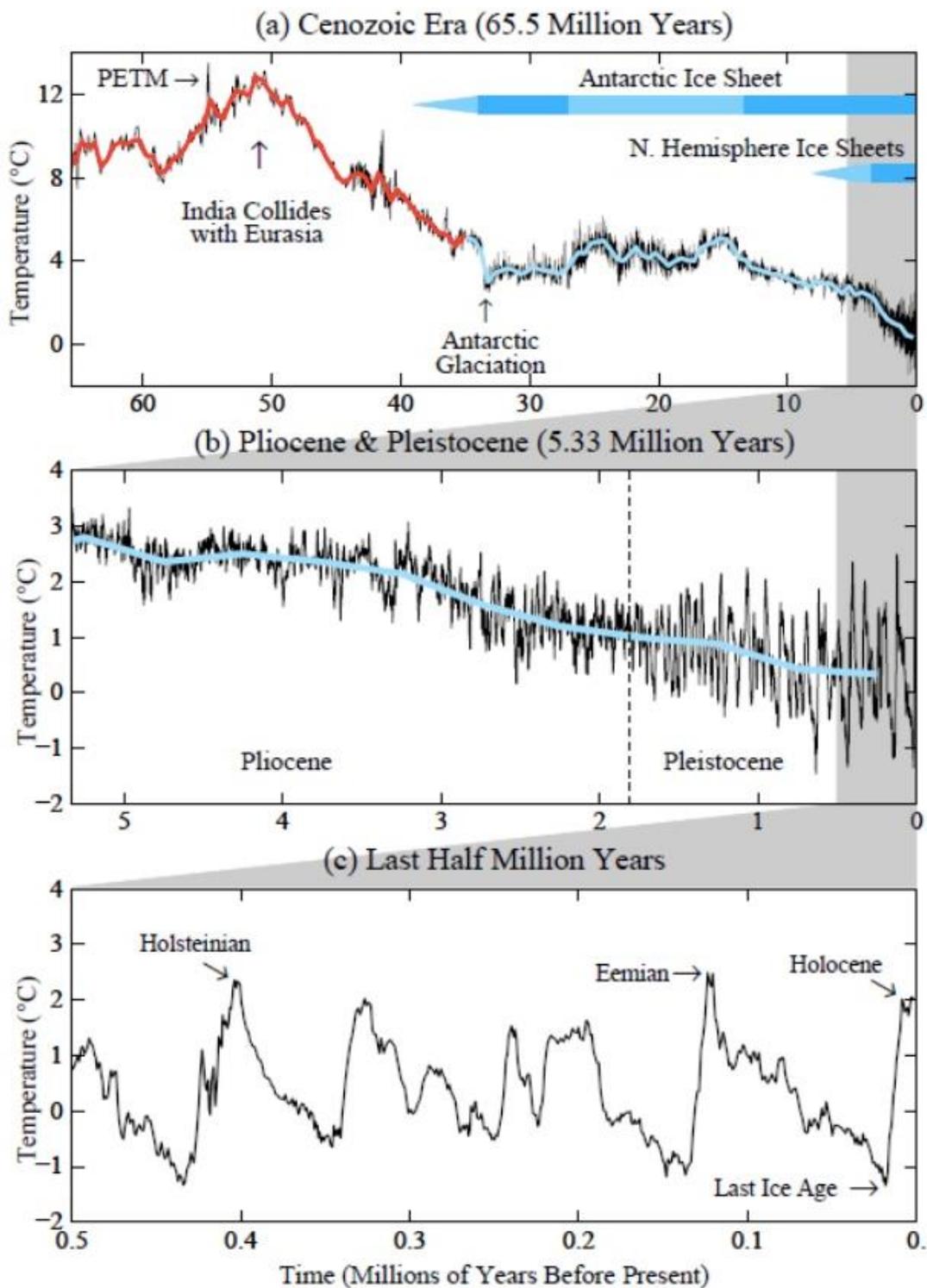


Gráfico 8 (a),(b) y (c): Estimaciones sobre la temperatura media global en la profundidad del océano. El Pleistoceno está ampliado en (a) y el último medio millón de años en (c). La función coloreada en negro muestra alta resolución de los datos y variaciones de alta frecuencia; las curvas roja y azul representan la media con una resolución de 500.000 años. Las siglas PETM proceden de Paleocene Eocene Thermal Maximun. Las barras azules indican la presencia del manto de hielo, y azul oscuro significa cobertura cercana a la total. Fuente: *Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change* (Hansen y Sato 2011).

La paleoclimatología nos ayuda a evaluar la sensibilidad climática y los potenciales efectos climáticos causados por el ser humano.

The fate of humanity and nature may depend upon early recognition and understanding of human-made effects on Earth's climate.

Fuente: Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change (Hansen y Sato 2011).

La Era Cenozoica, período que comienza con la extinción de los dinosaurios, al final del Cretácico, abarca un amplio abanico de climas, ilustrándonos la gran magnitud del cambio climático natural y permitiendo el estudio de los gases de efecto invernadero interpretados bien como forzamiento climático o como respuesta climática. Los comienzos de la Era Cenozoica fueron cálidos, dibujando un planeta sin grandes casquetes glaciares, en el que las regiones polares tenían condiciones más propias del clima tropical actual con caimanes en Alaska, por ejemplo (Markwick 1998).

Los cambios en la temperatura de las profundidades del océano fueron similares a los cambios en la temperatura global de la superficie durante esta era. Por otra parte, durante el Pleistoceno final, los cambios glaciares-interglaciares en la temperatura bajo el océano (Gráfico 8 (c)) tuvieron una magnitud de solo el 60% de los cambios de temperatura experimentados en la temperatura de la superficie global (Hansen y Sato 2011).

A largo plazo, la Tierra se ha visto envuelta en una tendencia de enfriamiento durante los últimos 50 millones de años (Gráfico 8 (a)). Hace unos 34 millones de años que el planeta se enfrió suficiente como para que se formase un gran casquete glaciar en la Antártida. Con todo esto, el calentamiento que tuvo lugar entre hace 30 y 15 millones de años no fue suficiente como para fundir todo el hielo antártico. Así, hace 15 millones de años, la tendencia de enfriamiento continuó y se aceleró para formar hielo en el hemisferio norte, que provocaría una respuesta amplificadora de dicha tendencia (Hansen y Sato 2011).

CO2 is the principal forcing that caused the slow Cenozoic climate trends.

Fuente: Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change. (Hansen y Sato 2011).

Sin embargo, no solo se muestra protagonista en las tendencias a muy largo plazo, sino que en los períodos glaciares-interglaciares (Gráfico 8 (c)) también juega un papel de factor principal, aunque, en este caso, se trata de la respuesta y no la causa.

However, in these glacial- interglacial oscillations atmospheric CO2 operates as a feedback (...) As the ocean warms, for example, it releases CO2 to the atmosphere, providing an amplifying climate feedback that causes further warming.

Fuente: Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change. (Hansen y Sato 2011).

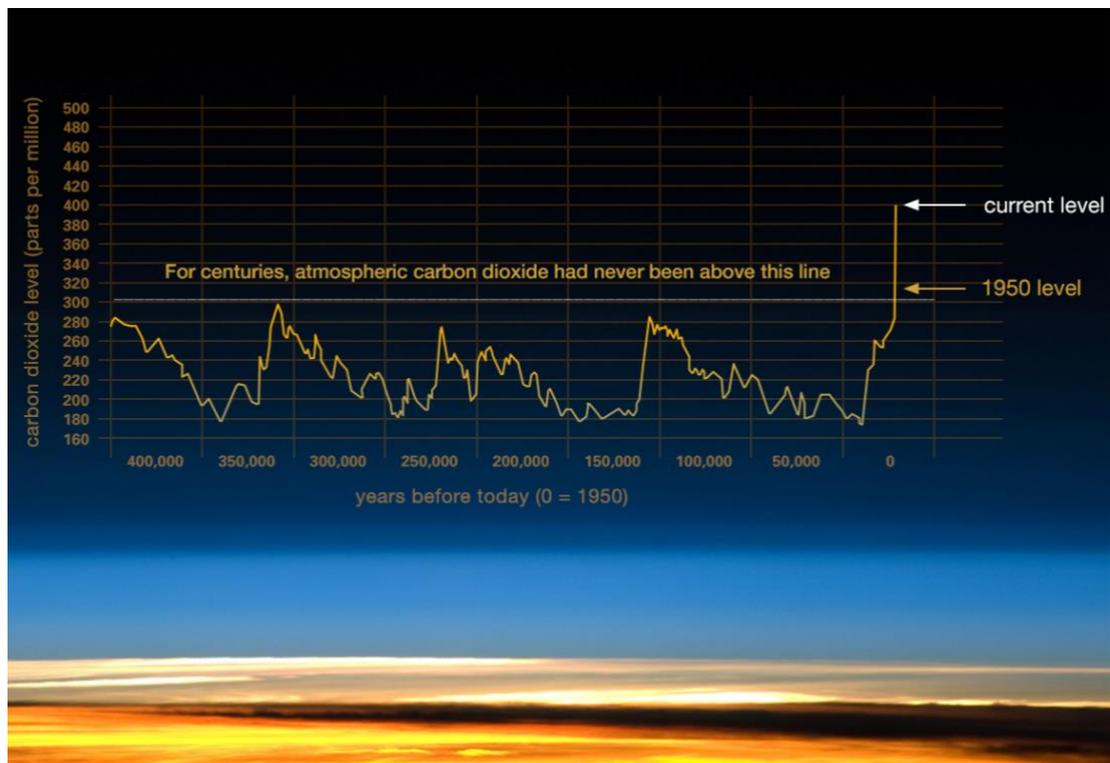


Gráfico 9: Concentración de CO atmosférico, medido en partes por millón, durante los periodos glaciares e interglaciares. Datos: NOAA. Fuente: Graphic: The relentless rise of carbon dioxide (NASA 2019).

Por otra parte, la luminosidad solar aumenta en las escalas temporales más largas. La estrella se encuentra en una fase inicial de su vida; en ella, el helio se forma por fusión nuclear a partir de hidrógeno, incrementando suavemente su brillo.

Como hemos visto, el CO₂ fue el principal forzamiento climático durante el Cenozoico. Durante la primera mitad de la era, el cambio en la temperatura global fue constante, con los esperados efectos de las placas tectónicas en la concentración atmosférica de CO₂. El desplazamiento de placas tectónicas provoca la liberación de volátiles incluyendo el CO₂. La acumulación de carbono en las reservas de la superficie depende del equilibrio entre los gases que emanan de la corteza terrestre y los que son enterrados en esta, incluyendo los que se entierran en forma de materia orgánica. La emanación de CO₂ ocurre por subducción de una placa litosférica oceánica o por oxidación de materia orgánica sepultada previamente. El CO₂ puede ser enterrado por el desgaste químico de las rocas o por depósito de materia orgánica, parte de la cual formara los combustibles fósiles. El desequilibrio entre emanación y absorción se limita por la propia respuesta negativa del ciclo geoquímico del carbono; aun así, existe un desequilibrio neto de CO₂ que se ha mantenido a largo plazo.

Such an imbalance, after distribution among surface reservoirs, is only ~0.0001 ppm/year of atmospheric CO₂. That rate is negligible compared to the present human-made atmospheric CO₂ increase of ~2 ppm/year.

Fuente: Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change (Hansen y Sato 2011).

La fuerte tendencia de calentamiento que tuvo lugar entre 60 y 50 millones de años atrás fue presuntamente una consecuencia del incremento de CO₂ atmosférico, ocasionado por la subducción de la placa Índica a través del océano Tetis (Kent y Muttoni 2008). El caudal de la fuente de dióxido de carbono continuó creciendo hasta que India colisionó con la placa Euroasiática y comenzó a empujar hacia arriba el Himalaya y la meseta del Tíbet.

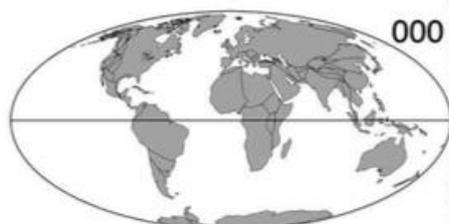
CONTINENTAL DRIFT

Christopher R. Scotese
PALEOMAP Project

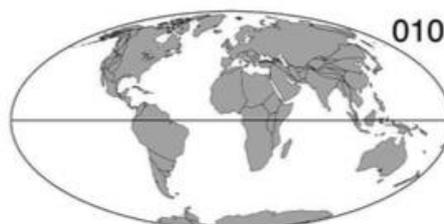
These maps illustrate the movements of the continents during the last 750 million years. All age assignments are based on the 1999 DNAG timescale. This flipbook is dedicated to the memory of W. Stuart McKerrow, without whose help, collaboration, advice, support, encouragement and guidance through the years, none of the work of the PALEOMAP Project would have been possible.

For more information about these plate tectonic reconstructions and the work of the PALEOMAP Project, visit: www.scotese.com.

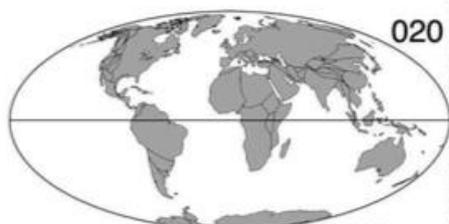
© 2004, PALEOMAP Project



000

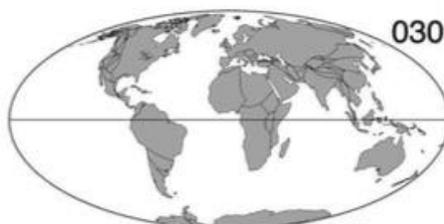


010



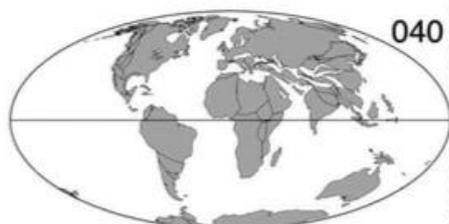
020

Miocene

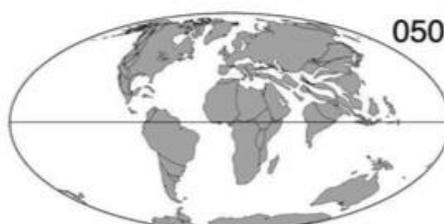


030

Oligocene

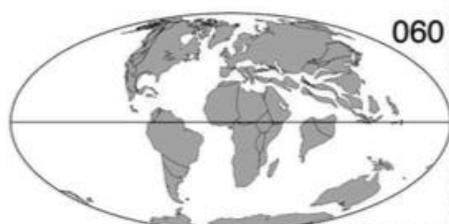


040



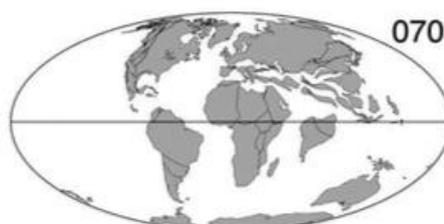
050

Eocene



060

Paleocene



070

Ilustración 8: Últimos movimientos de la deriva continental mostrados en orden inverso. Fuente: *A Continental Drift Flipbook* (Scotese y Parrish 2004).

Las emisiones de este fenómeno aún continúan, pero sus niveles descendieron tras la colisión Indo-asiática y como consecuencia, el planeta se enfrió.

Although many mechanisms probably contributed to climate change through the Cenozoic Era, it is clear that CO₂ change was the dominant cause of the early warming and the subsequent long-term cooling trend.

(...)

The rate of human- made change of atmospheric CO₂ amount is now much larger than slow geological changes. Humans now determine atmospheric composition, for better or worse, and they are likely to continue to do so, as long as the species survives.

Fuente: Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change (Hansen y Sato 2011).

Después de todo, cabe destacar la importancia de diferenciar claramente el calentamiento global del calentamiento global causado por el hombre.

3.3.2 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono se crea siempre que se queme carbono. Si combustionas carbono, obtienes dióxido de carbono y energía. El dióxido de carbono está presente en el aire en una diminuta proporción, que es 0,038%. En contraste, el oxígeno forma el 21%. Sin embargo, el CO₂ es muy importante para la vida; casi todo el carbono de las plantas, que son nuestra fuente de alimento, proviene de él.

Las plantas utilizan la energía solar para combinar el CO₂ con agua para producir hidrocarburos en el proceso de fotosíntesis. En este proceso se libera oxígeno, que es extraído del H₂O. Cuando nosotros (los animales) respiramos y combinamos el O₂ con alimentos, estamos recibiendo de vuelta la energía que las plantas absorbieron del Sol y producimos CO₂ nuevamente.

Anteriormente, hemos visto como ha evolucionado el dióxido de carbono en la composición atmosférica. La siguiente gráfica muestra los cambios en la proporción, expresada en partes por millón, de dióxido de carbono en la atmósfera.

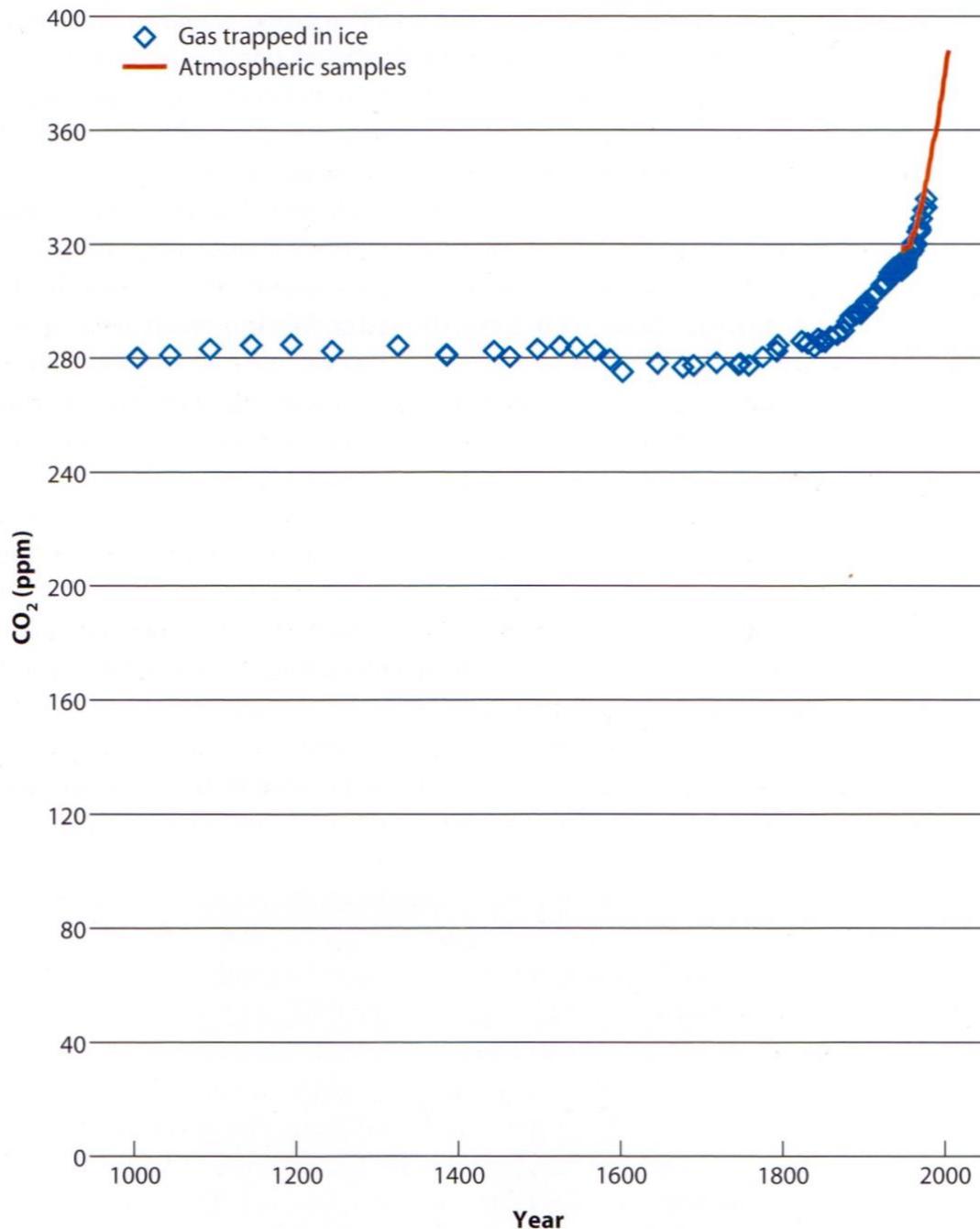


Gráfico 10: Los cambios de CO₂ atmosférico en los pasados 1.000 años. Fuente: *Physics and Technology for Future Presidents: An Introduction to the Essential Physics Every World Leader Needs to Know* (Muller 2010).

Resulta interesante observar que desde el 800 d.C. hasta finales de la década de 1800 se mantuvo prácticamente nivelado en 280 ppm. Sin embargo, durante los siglos XIX y XX, los niveles de CO₂ se han disparado.

En 2017 el CO₂ atmosférico alcanzó el 146 % del nivel preindustrial a causa principalmente de las emisiones procedentes de la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento, de la deforestación y de los demás cambios del uso de la tierra. El promedio mundial de la fracción molar del CO₂ correspondiente a 2017 fue de 405,5 ± 0,1 ppm.

Fuente: Boletín sobre los gases de efecto invernadero (Organización Meteorológica Mundial 2018).

Por ello, es el reciente aumento el que ha atraído la atención humana. Las mediciones demuestran que los niveles actuales son mayores que en ningún otro momento dentro de los últimos 20 millones de años. El dato no es discutido, puede resultar asombroso, pero no sorprendente.

3.3.3 Efecto invernadero

La luz solar toca la Tierra, la Tierra se calienta, y emite radiación infrarroja cediendo parte de su energía. Esta radiación no huye en su totalidad al espacio porque es absorbida por la atmósfera ya que, el vapor de agua y el dióxido de carbono, entre otros gases de la atmósfera, son eficaces absorbiendo radiación infrarroja. La atmósfera se calienta y emite su propia radiación infrarroja tanto hacia el espacio como hacia la superficie terrestre. Entonces, la Tierra se es calentada simultáneamente por la luz solar y por la atmósfera.

3.3.4 Cómo amplificar el efecto invernadero

Es importante tener en cuenta que el efecto invernadero es un fenómeno natural y puede ser potenciado. Para aumentar la temperatura de la

superficie terrestre, basta con incrementar la concentración de gases capaces de absorber de forma eficaz la energía de las ondas no visibles, es decir, la radiación infrarroja. Además, el efecto de estos gases se ve amplificado por el hecho de que, a mayor temperatura, mayor evaporación de los océanos y los suelos húmedos, es decir, mayor concentración de H₂O. No obstante, eso podría dar lugar a un aumento en la nubosidad, las nubes reflejan la luz solar; entonces, sería posible que se encarguen de amortiguar el efecto calentador, pero no hay una forma del todo fiable de calcular la nubosidad.

3.3.5 Preocupación popular y concienciación

Durante la década de 1940, se incrementó la preocupación popular por el inminente retorno de una glaciación. Los continuados descensos en los termómetros provocaron gran especulación sobre las posibles causas. En líneas generales, las causas se comenzaron a atribuir a la posible contaminación atmosférica provocada por los ensayos de bombas nucleares (Estados Unidos y la Unión Soviética detuvieron sus ensayos en 1963, Francia en 1974 y China continuó hasta 1990). Pero la correlación no implica causalidad; en la actualidad, muchos expertos explican que aquel enfriamiento general fue consecuencia del anormal incremento en el número de erupciones volcánicas en esa época. El polvo volcánico que desprendieron se esparció por la atmósfera y aumentó la proporción de luz solar era reflejada por estas partículas, impidiendo que alcanzasen la superficie terrestre para calentarla. Cuando el polvo se depositó de nuevo, las temperaturas volvieron a sus niveles habituales.

En el presente, ha crecido la preocupación popular por el efecto contrario, el calentamiento global. Es posible que sea la continuación de esta tendencia, o que sea el final de la Pequeña Edad de Hielo, o quizás el comienzo de algo más siniestro. En este documento se explicará cómo la quema de combustibles fósiles podría ser la causa del actual calentamiento. De cualquier forma, conviene ser precavidos y saber que, aunque exista una firme teoría que explique este fenómeno, esta podría no ser correcta.

3.3.6 Evaluación del cambio climático causado por el ser humano

En 1873, nació la Organización Meteorológica Internacional. Fue la primera organización no gubernamental con el propósito de intercambiar información meteorológica entre los países del mundo (Edwards 2006). Su actividad se mantuvo intacta hasta 1951, momento en el que la ONU la designó como una agencia especializada dependiente. La Organización Meteorológica Mundial (WMO), llamada así tras el cambio de naturaleza, tiene como objetivo el estudio de la meteorología (el tiempo y el clima), la hidrología operativa y las ciencias geofísicas conexas (World Meteorological Organization 2019). Tiempo después, en 1972, se crea el United Nations Environment Programme (UN Environment), otra agencia de Naciones Unidas que coordina las actividades medioambientales de la organización y proporciona asistencia para las naciones en desarrollo en implementar prácticas y políticas ecológicas. En 1988, aparece, a raíz de la WMO y UN Environment, una nueva organización intergubernamental llamada Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) con la intención de evaluar la ciencia que hay detrás del cambio climático. La participación está abierta a todos los países miembros de WMO y UN. Actualmente, consta de 195 miembros.

Su objetivo puede parecer imposible: alcanzar un consenso entre cientos de científicos, diplomáticos y políticos. El prestigioso comité internacional presenta, cada pocos años, una valoración del estado del cambio climático en la que se actualiza lo que se conoce acerca de este fenómeno: qué sabemos, qué consecuencias podría tener y qué podemos hacer. Las publicaciones contienen la evaluación, que aporta una base de información científica y rigurosa para los gobiernos y para quienes participen en la toma de decisiones a todos los niveles, y así, desarrollen políticas relacionadas. Cada publicación está escrita por cientos de científicos que, de forma voluntaria, emplean su tiempo y experiencia como Coordinating Lead Authors y Lead Authors del informe; y otros cientos de expertos que hacen lo mismo como Contributing Authors, atribuyendo experiencia complementaria en áreas específicas a esta causa.

La primera publicación, en 1990, provocó una reacción, y como respuesta, se creó la United Nations Framework Convention on Climate Change, un tratado medioambiental internacional adoptado en 1992 en la Cumbre de la Tierra organizada por la ONU en Río de Janeiro y en vigor desde 1994. Siendo el principal instrumento jurídico de respuesta internacional ante el cambio climático, su objetivo, como está redactado en su Artículo 2.

El objetivo último de la presente Convención y de todo instrumento jurídico conexo que adopte la Conferencia de las Partes, es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

Fuente: Convención Marco de las Naciones Unidas Contra el Cambio Climático (Naciones Unidas 1992).

Los 197 países miembros se reúnen, normalmente una vez al año, en la Conference Of Parties (COP) para discutir y negociar las variadas medidas políticas a tomar en materia de cambio climático.

Para comprender qué clase de publicación es capaz de reunir a tantos estados con el mismo fin, vamos a enunciar las principales conclusiones expuestas en el último informe de evaluación del IPCC.

3.3.6.1 Cambios observados y sus causas

El Informe de síntesis, está basado en las evaluaciones llevadas a cabo por tres Grupos de trabajo del IPCC y aborda cuatro temas: *Cambios*

observados y sus causas; Futuros cambios climáticos, riesgos e impactos; Futuras trayectorias de adaptación, mitigación y desarrollo sostenible; y Adaptación y mitigación. De aquí en adelante, nos centraremos en las conclusiones obtenidas en Cambios observados y sus causas.

3.3.6.1.1 Sobre los cambios observados en el sistema climático

La influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. Los cambios climáticos recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales.

Fuente: Cambio Climático 2014 – Informe de síntesis (IPCC 2014).

3.3.6.1.2 Sobre los impulsores del cambio climático en el pasado y los recientes

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado.

Fuente: Cambio Climático 2014 – Informe de síntesis (IPCC 2014).

3.3.6.1.3 Sobre la atribución de cambios climáticos e impactos

La evidencia de la influencia humana en el sistema climático ha aumentado desde el Cuarto Informe de Evaluación. Se ha detectado la influencia humana en el calentamiento de la atmósfera y el océano, en alteraciones en el ciclo global del agua, en reducciones de la cantidad de nieve y hielo, y en la elevación del nivel medio global del mar; y es sumamente probable que haya sido la causa dominante del

calentamiento observado desde mediados del siglo XX. En los últimos decenios, los cambios del clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y en los océanos. Los impactos se deben al cambio climático observado, independientemente de su causa, lo que indica la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos al cambio del clima.

Fuente: Cambio Climático 2014 – Informe de síntesis (IPCC 2014).

3.3.6.1.4 Sobre episodios extremos

Desde aproximadamente 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Algunos de estos cambios han sido asociados con influencias humanas, como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y el mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones.

Fuente: Cambio Climático 2014 – Informe de síntesis (IPCC 2014).

3.3.6.1.5 Sobre exposición y vulnerabilidad

La naturaleza y la gravedad de los impactos derivados del cambio climático y los fenómenos extremos surgen de un riesgo que depende no solo de los peligros relacionados con el clima, sino también de la exposición (personas y activos en riesgo) y la vulnerabilidad (susceptibilidad a sufrir daños) de los sistemas humanos y naturales.

Fuente: Cambio Climático 2014 – Informe de síntesis (IPCC 2014).

3.3.6.1.6 Sobre respuestas humanas al cambio climático: adaptación y mitigación

La experiencia relativa a la adaptación y la mitigación se va acumulando en las distintas regiones y escalas, mientras siguen aumentando las emisiones antropógenas globales de gases de efecto invernadero.

Fuente: Cambio Climático 2014 – Informe de síntesis (IPCC 2014).

Las anteriores conclusiones son la síntesis más general que se puede obtener del informe. Una vez comprendidas, resulta imaginable el interés que suscitaron las que fueron expuestas en las dos primeras publicaciones de 1990 y 1995.

3.4 Respuesta internacional

3.4.1 Protocolo de Kioto

En diciembre de 1997, en Kioto, Japón, 164 Partes (miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, UNFCCC) ratificaron el Protocolo de Kioto. Por primera vez en la historia, los países se pusieron de acuerdo en estabilizar las emisiones de dióxido de carbono de forma cooperativa. El Protocolo de Kioto estableció límites en la legalidad de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero para los países industrializados.

Se trata de un documento complejo que refleja los problemas políticos, económicos, científicos y legales generados por el cambio climático que ha provocado el ser humano. Fue el resultado de más de dos años de debates preparatorios y once días de intensas negociaciones en Kioto.

El documento dicta el principal objetivo de la comunidad internacional el Artículo 3 del mismo.

(...) reducir el total de sus emisiones de esos gases a un nivel inferior en no menos de 5% al de 1990 en el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012.

Fuente: Protocolo de Kyoto (Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático 1998).

El acuerdo excluyó formalmente a los países en vías de desarrollo de la responsabilidad legal de reducir las emisiones de dióxido de carbono. Inicialmente, Estados Unidos se posicionó en acuerdo con el tratado, pero el Congreso no lo ratificó, precisamente, por apartar a los países en desarrollo, como China e India, de la responsabilidad legal. El Protocolo de Kioto entró en vigor con la ratificación de Rusia, que, sumada a las otras partes, juntas significaban el 55% de las emisiones de dióxido de carbono mundiales.

La primera fase del acuerdo fue implementada durante un período de 5 años desde 2008 a 2012. La segunda fase supuso un fracaso en la negociación en la Conferencia de Copenhague de 2009. La causa principal fue el desacuerdo entre los países en desarrollo y los desarrollados acerca de sus respectivas responsabilidades y contribuciones financieras para apoyar a los menos desarrollados.

La exclusión de China, India y Estados Unidos del tratado significó que la obligación de mitigar bajo el Protocolo de Kioto estaba muy limitada a la Unión Europea y Japón. Ambas sumaban el 40% de las emisiones mundiales a finales de 1990 y pasaron a ser el 10% en 2012. Durante ese tiempo las economías de Estados Unidos, China e India crecieron a un ritmo mucho mayor que el de la Unión Europea y Japón (Breidenich et al. 2018).

Siendo el primer acuerdo internacional de este tipo, no es de extrañar que tuviera fallos de diseño. A pesar de que las emisiones de la Unión Europea estuvieran descendiendo, esto no significaba que las actividades que causan las emisiones lo hicieran, de hecho, lo que ocurría no era más que una fuga en la contabilización de dichas emisiones, pues había aumentado la

importación de bienes procedentes de países sin regulación de emisiones (Seo 2017).

Tras las negociaciones fallidas de 2009 en Copenhague, muchos países abandonaron el proyecto de cooperación: Australia, Canadá, Japón y Rusia. Finalmente, en 2012 el Protocolo de Kioto se declaró sin validez.

Por otro lado, la preocupación por anteponer las medidas de adaptación ante las de mitigación había ido en aumento en cada COP. En el Acuerdo de Copenhague en 2009 se presentó la necesidad del Green Climate Fund, el cual se establecerá formalmente más tarde en Cancún en 2010. La intención es que se establezca con las contribuciones financieras de los países desarrollados para apoyar las medidas de adaptación y mitigación en los países que están en vías de desarrollo.

El Protocolo de Kioto ya no está en vigor. El Acuerdo de París y el Green Climate Fund son los acuerdos e iniciativas existentes, y también pertenecen a la UNFCCC.

3.4.2 El Acuerdo de París

Las negociaciones en Copenhague fracasaron, en gran parte, debido a la falta de voluntad de los países en desarrollo, quienes argumentaron que el calentamiento global había sido causado por los países más desarrollados, y, por tanto, eran quienes deberían ser responsables de reducir sus emisiones. Además, reivindicaron la responsabilidad de los países desarrollados de llevar a cabo compensaciones financieras por los daños causados por el calentamiento global en los países menos desarrollados. Finalmente, los países más desarrollados no estaban del todo preparados para asumir las responsabilidades de mitigación y compensación económica a los menos desarrollados (Seo 2017).

Tras desarmarse el Protocolo de Kioto, los esfuerzos por llegar a un consenso global continuaron y se hicieron ver en las COP posteriores a Copenhague; culminaron con la creación de Durban Platform for Enhanced

Action en 2011 en Durbán, Sudáfrica. Esta entidad nació a partir de lo negociado en la COP de Cancún un año antes; el planeta debería contener el aumento de temperatura por debajo de los 2°C desde la era preindustrial.

En diciembre de 2015, París acogió la COP21. Todos los países miembros participaron en la producción de un documento llamado Paris Agreement o Acuerdo de París, en castellano. Su implementación está prevista para 2020. Entró en vigor el 4 de noviembre de 2016 cuando las Partes sumaron más del 55% de las emisiones globales. España se unió el 12 de enero de 2017 (Seo 2017).

Sin lugar a duda, se ha considerado un punto de no retorno histórico en la movilización gubernamental, un documento de cooperación internacional sin precedentes; por el cual, todos los países del mundo manifiestan, por primera vez, estar de acuerdo y tomar responsabilidad en reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

En su Artículo 2, se recogen los objetivos que se aspiran alcanzar mediante el acuerdo. Proponen un conjunto de objetivos, preferiblemente considerados independientes entre sí para los cuales habrá que conseguir un enfoque esférico que los aborde todos. Principalmente abarcan el problema de la temperatura, la adaptación y el necesario flujo financiero hacia los países más vulnerables.

1. El presente Acuerdo, al mejorar la aplicación de la Convención, incluido el logro de su objetivo, tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, y para ello:

a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría

considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;

b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos; y

c) Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

2. El presente Acuerdo se aplicará de modo que refleje la equidad y el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas y las capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales.

Fuente: Acuerdo de París (Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático 2015).

En el acuerdo se reconoce la necesidad de alcanzar el punto máximo de emisiones lo antes posible, y a partir de ahí, continuar reduciéndolas hasta sobrepasar el punto neutro de emisiones en el que equivalen a las absorciones durante la segunda mitad de siglo. Del mismo modo, el acuerdo hace énfasis en la importancia de los ecosistemas, en particular, los bosques, que concibe como sumideros de carbono. Los planes de lucha contra el cambio climático son los objetivos nacionales de reducción de emisiones automarcados en cada país. Cada 5 años se presentarán los planes de desarrollo para la reducción de emisiones; se han presentado ya 190 planes que cubren alrededor del 99% de las emisiones de todas las Partes de la Convención. El acuerdo remarca la importancia de ir siempre aumentando la ambición de los objetivos reflejados en el plan. También cada 5 años, comenzando en 2023, se hará un balance del estado de implementación. Con él se pretende estimar el progreso (respecto al objetivo

de los 2°C) y proporcionar dinamismo para que el Acuerdo de París sea duradero en el tiempo, y así, garantizar un progresivo aumento de la ambición de este. Se tendrán en cuenta todos los elementos: los compromisos de reducción de emisiones, el avance de las acciones de adaptación y, la situación de la financiación como medio de implementación. El documento establece un marco de transparencia que cubre información sobre emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero y sobre el apoyo financiero o tecnológico tanto proporcionado como recibido, además de información sobre las necesidades específicas de los países en desarrollo. En base a esto, se forma un proceso de revisión para identificar áreas de mejora, que cuente con cierta flexibilidad para los países en desarrollo (Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático 2015; Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación 2016).

El Acuerdo de París es jurídicamente vinculante para todos los Estados Parte que lo ratifiquen. En él se establece la obligatoriedad de presentar y mantener los objetivos de reducción de emisiones, cuyo cumplimiento, queda garantizado mediante dos mecanismos: el de las revisiones y el mecanismo para facilitar el cumplimiento. El Comité destinado a promover la aplicación y facilitar el cumplimiento es de naturaleza constructiva y facilitadora, no contenciosa ni sancionadora (Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación 2016).

Las *INDC* (Intended Nationally Determined Contributions) de los países que juegan un papel importante en el calentamiento global se resumen a continuación. Si se comparan, se pueden ver los diferentes niveles de ambición y acción. Es reconocible la ligereza de la acción efectiva inicial del Acuerdo de París, de ahí la creciente necesidad de aumentar la profundidad de los compromisos periódicamente. A continuación, se expondrán en detalle las *INDC* de los países protagonistas del calentamiento global.

Primero, Estados Unidos especifica en su declaración la pretendida reducción, los gases de efecto invernadero cubiertos, y los sectores que abarca. Sitúan el año de referencia en 2005 y el año del objetivo en 2025.

1. The United States intends to achieve an economy-wide target of reducing its greenhouse gas emissions by 26-28% per cent below its 2005 level in 2025 and to make best efforts to reduce its emissions by 28 per cent.

2. The US target covers all greenhouse gases included in the 2014 Inventory of United States Greenhouse Gas Emissions and Sinks: carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), perfluorocarbons (PFCs), hydrofluorocarbons (HFCs), sulfur hexafluoride (SF₆), and nitrogen trifluoride (NF₃).

3. The US target covers all IPCC sectors.

Fuente: Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions (Seo 2017).

Aunque el presidente Trump haya anunciado que Estados Unidos abandonará la participación en el Acuerdo de París, la más pronta efectividad de la ruptura será en noviembre de 2020. Mientras tanto, gobernadores de varios estados han formado la United States Climate Alliance para continuar trabajando en las metas situadas en París (Dong et al. 2018).

La propuesta de la Unión Europea es similar a la anterior, pero diferente en algunos aspectos. Es más ambiciosa: reducción del 40% de 1990 a 2030.

1. The EU and its Member States are committed to a binding target of an at least 40 per cent domestic reduction in greenhouse gas emissions by 2030 compared to 1990, to be fulfilled jointly;

2. Policy on how to include Land Use, Land Use Change and Forestry into the 2030 greenhouse gas mitigation framework will be established as soon as technical conditions allow and in any case before 2020;

3. Net Contribution of International Market Based Mechanisms: No contribution from international credits.

Fuente: Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions (Seo 2017).

La Unión Europea no contabiliza la emisión indirecta de gases de efecto invernadero. De alguna manera, aunque aumentase el consumo de bienes que emiten gases de efecto invernadero, la UE no lo tendría en cuenta si los bienes son importados, por ejemplo, de China.

Además, tampoco especifica como contará la reducción de gases de efecto invernadero conseguida mediante el aumento de la producción de energía en centrales nucleares. La UE ha demostrado su confianza en la energía nuclear, algunos países como Francia producen hasta un 80% de su energía en centrales nucleares.

En el caso de China, no se tienen en cuenta los gases de efecto invernadero, pues solo menciona en su propuesta el dióxido de carbono. Tampoco presenta una fecha exacta para cumplir los objetivos. Propone una reducción del 60% de las emisiones de dióxido de carbono desde 2005 y un aumento de la fracción de energía producida por combustibles no fósiles hasta alcanzar el 20%. Actualmente, sus emisiones de dióxido de carbono duplican a las de Estados Unidos o las de la UE (Seo 2017).

Based on its national circumstances, development stage, sustainable development strategy and international responsibility, China has nationally determined its actions by 2030 as follows: (i) To achieve the peaking of carbon dioxide emissions around 2030 and making best efforts to peak early; (ii) To lower carbon dioxide emissions per unit of GDP by 60 per cent to 65 per cent from the 2005 level; (iii) To increase the share of non-fossil fuels in primary energy consumption to around 20 per cent; (iv) To increase the

forest stock volume by around 4.5 billion cubic metres on the 2005 level.

Fuente: Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions (Seo 2017).

India promete recortar en un 33% sus emisiones con respecto a su PIB para el año 2030, tomando como referencia 2005. Además, asegura un aumento de la fracción de energía producida por combustibles no fósiles hasta alcanzar el 40% con la ayuda de las transferencias tecnológicas y la financiación internacional, incluyendo la del Green Climate Fund. Respecto a la utilización del suelo, opta por los bosques como sumideros de carbono, para atrapar hasta 3 mil millones de toneladas de dióxido de carbono.

- 1. To put forward and further propagate a healthy and sustainable way of living based on traditions and values of conservation and moderation;*
- 2. To adopt a climate friendly and a cleaner path than the one followed hitherto by others at corresponding level of economic development;*
- 3. To reduce the emissions intensity of its GDP by 33 to 35 per cent by 2030 from 2005 level;*
- 4. To achieve about 40 percent cumulative electric power installed capacity from non-fossil fuel based energy resources by 2030 with the help of transfer of technology and low cost international finance including from Green Climate Fund (GCF);*
- 5. To create an additional carbon sink of 2.5 to 3 billion tonnes of CO₂ equivalent through additional forest and tree cover by 2030.*

Fuente: Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions (Seo 2017).

Resulta interesante observar que el *INDC* ruso es de los más ambiciosos. Limitará sus emisiones hasta el 70% de los niveles de 1990. Desde otro punto de vista, diríamos que Rusia apuesta por que el calentamiento global aumentará enormemente la superficie de terreno apto para la vegetación y los bosques con la capacidad de absorber grandes cantidades de dióxido de carbono.

Limiting anthropogenic greenhouse gases in Russia to 70–75 per cent of 1990 levels by the year 2030 might be a long-term indicator, subject to the maximum possible account of absorbing capacity of forests.

Fuente: Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions (Seo 2017).

Tailandia es uno de los países con mayor ritmo de crecimiento económico y su propuesta podría ser importante. En ella, promete una reducción del 20% para 2030 con respecto al escenario BAU. Dado que no está claro cuál será exactamente el escenario BAU, la promesa queda abierta a interpretaciones.

Vietnam es otro de los países con rápido crecimiento económico. Propone recortar un 8% las emisiones respecto del escenario BAU. En este caso si especifican cuál será dicho escenario. En él, sus emisiones aumentan desde 246 Tm CO₂ hasta 787 Tm CO₂ para 2030. Esto quiere decir, que asumen que sus emisiones se triplicarán en un período de 20 años comprendido entre 2010 y 2030.

Ambos países prometen aumentar la ambición de sus propuestas si reciben apoyo tecnológico y financiero por parte de la UNFCCC a través del GCF.

3.4.3 Green Climate Fund

En la última década, GCF ha nacido de la necesidad de nuevas rutas para las negociaciones políticas de los mítines de la UNFCCC. Originalmente, surgió como instrumento financiero para ayudar a los países en vías de

desarrollo a lidiar con el cambio climático y así aumentar su participación en las negociaciones políticas. El GFC se ha convertido en el instrumento financiero primario de las actividades de la UNFCCC. Tiene 24 miembros, repartidos equitativamente entre países desarrollados y países en desarrollo.

Dado que no existe ninguna obligación legal de contribuir al fondo, ha sido de interés general saber con cuánto contribuye cada país en realidad. En abril de 2016, el GFC anunció que las contribuciones alcanzaron los 9.900.000.000 dólares estadounidenses que provienen casi en su totalidad de cinco países: Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Francia y Alemania.

3.5 Reservas mundiales de combustibles fósiles

Hace ya tiempo desde que el estado actual de las reservas mundiales de petróleo se convirtió en un tema de gran controversia y preocupación para muchos, además, las opiniones se encuentran polarizadas entre quienes piensan que pronto se agotarán y, las grandes compañías del petróleo, que afirman que habrá suficiente en las próximas décadas.

Los combustibles fósiles han sido el eje del crecimiento vivido desde la industrialización, desplazaron al carbón en muchas de sus aplicaciones y se convirtieron en los combustibles dominantes para el transporte. Sin embargo, en los últimos años, ha crecido la concienciación sobre las consecuencias medioambientales de quemar grandes cantidades de petróleo y, a la par, la preocupación por si las existentes reservas tendrán, o no, la capacidad de abastecer la creciente demanda. Lo cierto es que, como fuente de naturaleza finita y no renovable, por definición, no podrá continuar cubriendo la demanda para siempre.

Al mismo tiempo, los datos de dominio público, en general, se muestran más optimistas que los procedentes de organismos independientes. Esta ambigüedad aparece por varias razones: por la falta de estándares internacionales para referirse al volumen y al tipo de crudo; por la variabilidad del límite en el cual las fuentes son clasificadas como reservas

comercialmente explotables; por la intencionada modificación de los datos generados con fines económico-financieros o políticos; y, por la inherente incertidumbre en la evaluación técnica (Owen, Inderwildi y King 2010). Por tanto, los datos sobre reservas de petróleo son muchas veces contradictorios y deberían ser interpretados con cautela.

Según el tipo de combustible, hay reservas de fácil acceso, y otras que requieren de un mayor desarrollo tecnológico para proceder a su explotación. En estas últimas, el petróleo necesita alcanzar cierta temperatura para que fluya hasta la superficie, por ello, necesitarán una mayor inversión económica para obtener un producto potencialmente más caro, además, incrementa la huella de carbono del proceso. Esta situación provoca incertidumbre en la decisión de explotación, se requieren altos precios del barril para que estas reservas se consideren comercialmente explotables. De esta forma, a mayor precio del barril, mayor disponibilidad habrá de reservas comercialmente explotables. Por ello, la era de los combustibles fósiles líquidos baratos ya terminó y la necesidad de abastecer la creciente demanda desarrollará los métodos de extracción de las reservas no convencionales, que se traducirá en una subida del precio de los productos derivados del petróleo.

Como sabemos, cualquier restricción en la producción de petróleo obviamente afectaría al precio del barril. El siguiente gráfico expuesto muestra un registro histórico del precio del barril. Las fluctuaciones más importantes están etiquetadas, pues la mayoría fueron desencadenadas tras algún evento aislado.

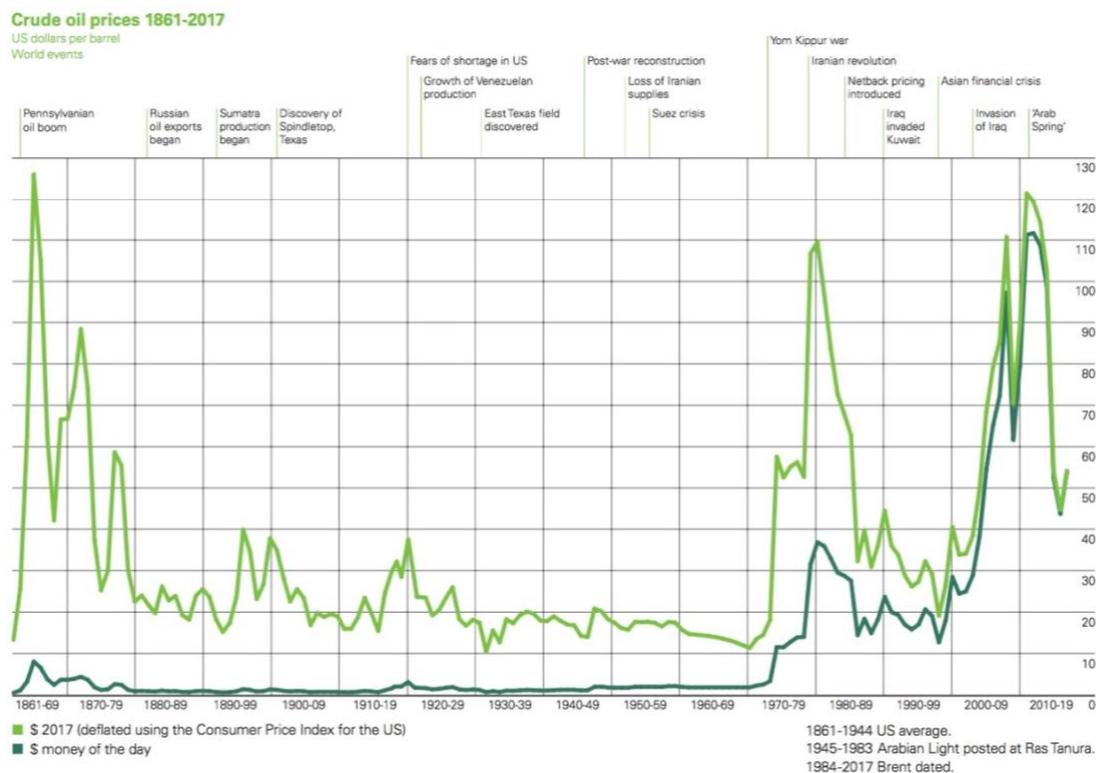


Gráfico 11: Cambios en el precio del barril de petróleo y eventos mundiales. En verde claro se muestran valores ajustados a inflación, y en verde oscuro sin ajuste. Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2018 (British Petroleum Company 2018).

Basándonos en la observación de que el petróleo está profundamente ligado a la actividad económica global, deberíamos también considerar que una mantenida subida del precio del barril podría también inducirnos a una recesión global, que conduciría a la consecuente bajada del precio del petróleo y, paradójicamente, a la reducción de la inversión en combustibles alternativos. No obstante, aunque las nuevas técnicas de extracción retrasen de alguna manera el momento de la subida del precio, no habría forma de huir del problema derivado de utilizar una fuente energética limitada y no renovable.

M. King Hubbert, en 1956, publicó su hipótesis para cualquier región dada, la producción de cualquier combustible fósil sería una función gaussiana, una curva con forma de campana en la que la producción comienza aumentando mientras se hacen descubrimientos de nuevas reservas y se mejoran los métodos de extracción para llegar a alcanzar el punto de producción máximo, y finalmente, decreciendo según se agotasen las reservas (Hubbert

1956). Su predicción sobre el pico de producción en Estados Unidos fue acertada, aunque lo hizo en un valor que era 17% superior al previsto, y tras el pico, la curva no ha seguido la forma de campana (Ritchie 2017). A continuación, se han dibujado la función hipotética de Hubbert y la función descrita por la producción estadounidense.

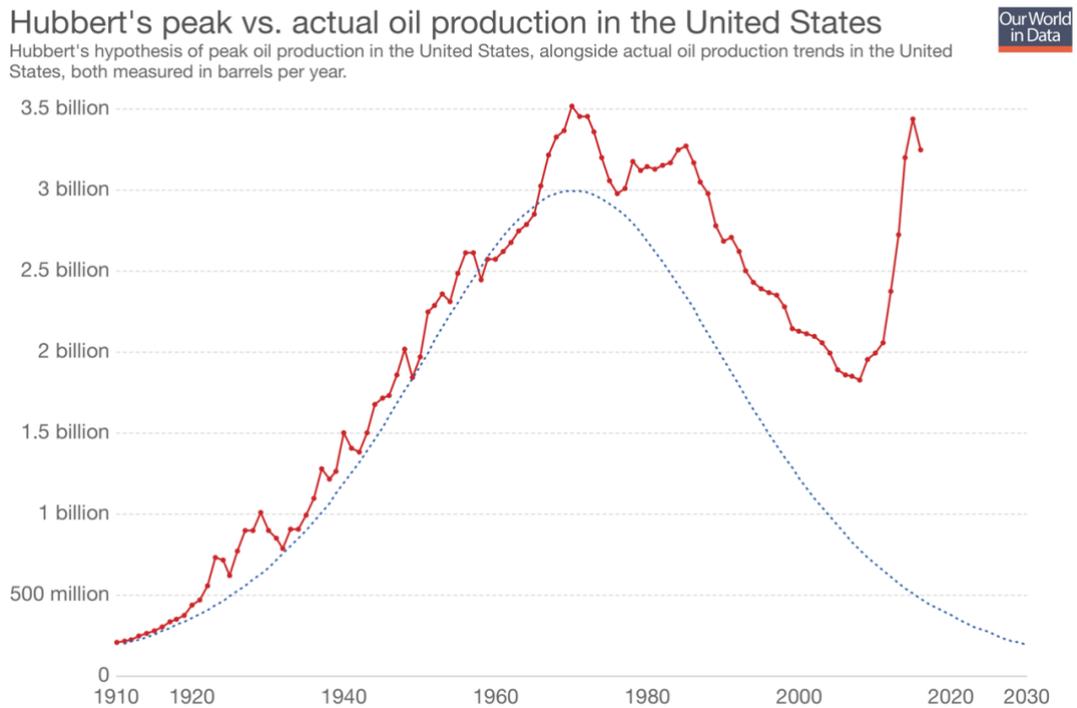


Gráfico 12: Hipótesis gaussiana de Hubbert y producción de petróleo en Estados Unidos. Fuente: *How long before we run out of fossil fuels?* (Ritchie 2017).

Muchos fueron los que intentaron aplicar la teoría de Hubbert a nivel global para responder a la cuestión existente sobre el momento del agotamiento de las reservas de petróleo. De cualquier modo, las predicciones han resultado ser erróneas. Durante la crisis del petróleo de 1979, el mismo Hubbert predijo que el mundo alcanzaría el valor máximo de producción cerca del año 2000; y en las siguientes décadas, ha habido una sucesión de prematuros análisis predictivos al respecto. Mientras tanto, la producción y el consumo globales de petróleo continúan aumentando (British Petroleum Company 2018).

La gran dificultad de intentar dibujar estas curvas reside que los descubrimientos de reservas y el potencial tecnológico para extraer estas

reservas evoluciona con el tiempo. Si echamos un vistazo a las tendencias de las reservas de petróleo probadas, sabremos que han aumentado considerablemente desde 1997 (British Petroleum Company 2018). Este hecho, combinado con los cambios en el ritmo de consumo hace que cualquier predicción sobre cuándo será el momento del pico de los combustibles fósiles sea altamente imprecisa.

Distribution of proved reserves in 1997, 2007 and 2017
Percentage

- Middle East
- S. & Cent. America
- North America
- CIS
- Africa
- Asia Pacific
- Europe

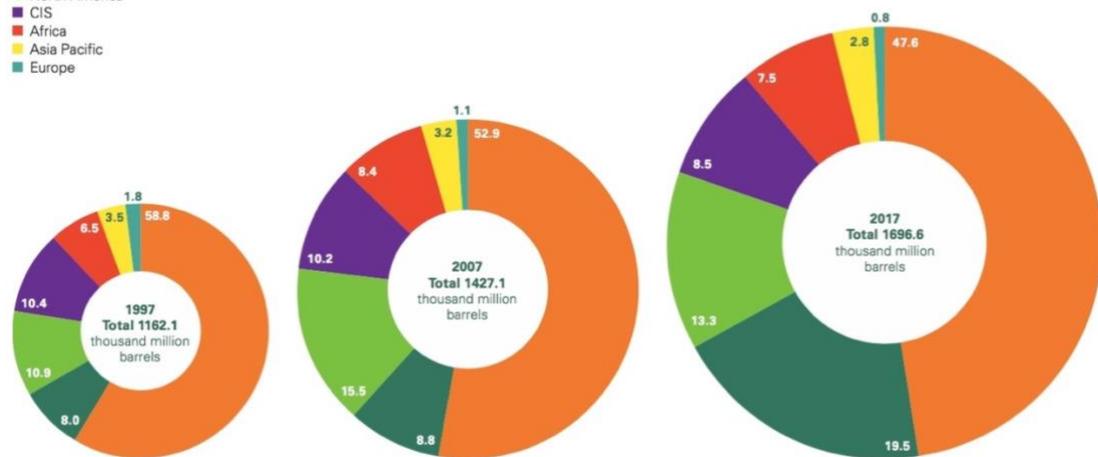


Gráfico 13: Cambios en la cantidad y distribución de las reservas mundiales de petróleo. Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2018 (British Petroleum Company 2018).

Para aportar un indicador estático estimado sobre cuánto durarán las reservas actuales, sencillamente, hay que dividir la cantidad de volumen en las reservas conocidas entre el ritmo actual de producción. El siguiente gráfico se ha conseguido con el cálculo descrito utilizando los datos publicados por British Petroleum Company en 2016, estos son los resultados obtenidos.

Years of fossil fuel reserves left

Years of global coal, oil and natural gas left, reported as the reserves-to-product (R/P) ratio which measures the number of years of production left based on known reserves and annual production levels in 2015. Note that these values can change with time based on the discovery of new reserves, and changes in annual production

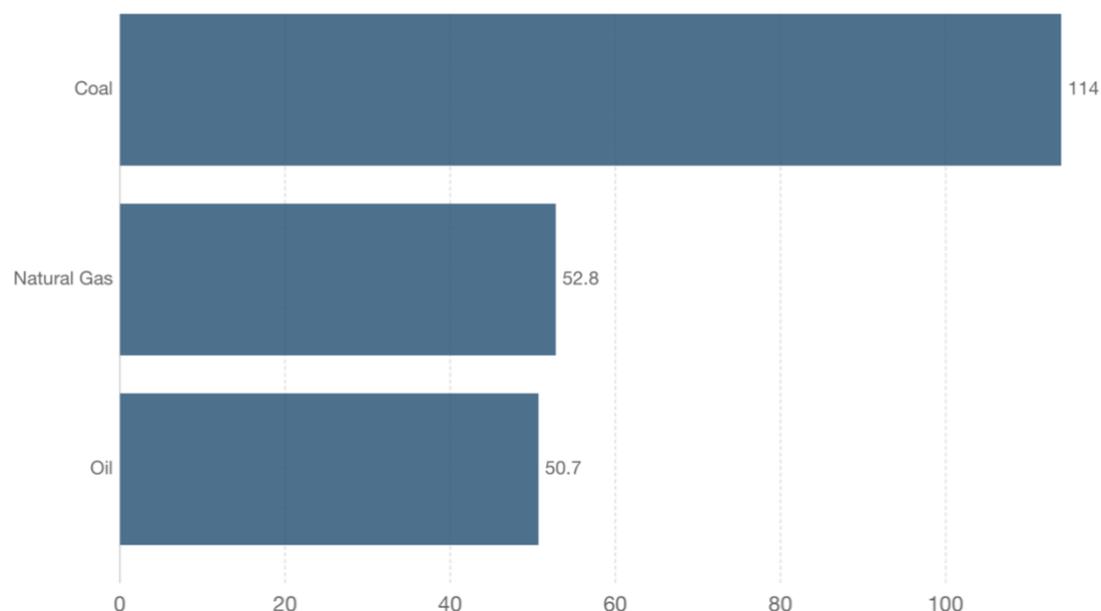


Gráfico 14: Indicador estático que estima los años restantes para el agotamiento de las reservas mundiales de combustibles fósiles utilizando los datos de 2015. Fuente: *How long before we run out of fossil fuels?* (Ritchie 2017).

Sin embargo, mientras el agotamiento de las reservas presentará un problema dentro de 50 o 100 años, hay otro importante limitador de la producción de combustibles fósiles: el cambio climático.

Para mantener el aumento de temperatura por debajo de los 2 grados Celsius, hay que calcular qué cantidad de carbono podemos emitir para seguir cumpliendo el objetivo. Esta cantidad se define como *carbon budget*. En el último informe del IPCC, para tener un 50% de probabilidades de éxito, estima que son 275 billones de toneladas de carbono (IPCC 2014). Cabe aclarar, que cada día que pasa, el *carbon budget* se reduce.

Esto significa que tendríamos que dejar inutilizadas aproximadamente dos terceras partes de las reservas para alcanzar los objetivos climáticos. Si quisiéramos aumentar la probabilidad de cumplir la meta de los 2 grados Celsius hasta el 80%, deberíamos dejar el 75-80% de los combustibles fósiles intactos. Esta parte de las reservas se conoce como *unburnable carbon*. Puede que exista un enorme potencial de que este *unburnable*

carbon provoque grandes pérdidas económicas. Si la inversión de capital en infraestructura que emite carbono continúa su ritmo creciente, se estima que se malgastarán \$6.740.000.000.000 durante la próxima década en el desarrollo de reservas si finalmente, no se utilizasen (Ritchie 2017).

Global carbon budget for a two-degree world

The carbon budget refers to the maximum quantity of carbon which can be released to maintain a 50 percent probability of global average temperature rise remaining below two-degrees celcius (the target set within the UN Paris climate agreement). This has been measured relative to the quantity of carbon which would be released if all fossil fuel reserves were burned without the use of carbon capture and storage (CCS) technology. The difference between the two is defined as 'unburnable carbon'.

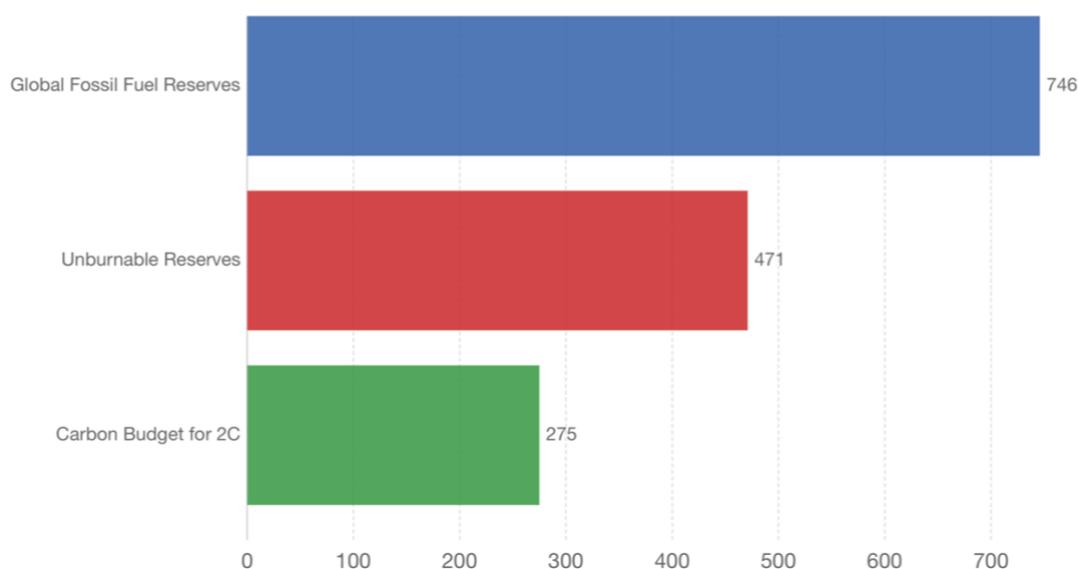


Gráfico 15: Distribución de las reservas para mantener un 50% de probabilidades de alcanzar el objetivo de mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2 grados Celsius. Fuente: How long before we run out of fossil fuels? (Ritchie 2017).

Así que, mientras muchos se preocupan por la posibilidad de que se agoten las reservas de combustibles fósiles, por el contrario, se espera que tengamos que optar por dejar a un lado más de la mitad del volumen de reservas existentes si queremos seguir teniendo alguna posibilidad de mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2°C.

4 Análisis de futuro

4.1 Acuerdo de París

4.1.1 Trayectorias y objetivos

Mientras las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, crece el interés por conocer las probabilidades con las que se alcanzarán, o no, los objetivos propuestos en el *Acuerdo de París*. Para empezar, partiremos de que el objetivo de 1,5°C aún no es una imposibilidad geofísica.

Vamos a centrar el foco en los diez países protagonistas del calentamiento global. China, EE. UU., India, Rusia, Japón, Alemania, Corea del Sur, Irán, Arabia Saudí e Indonesia han sido catalogados en 2016 como los diez mayores emisores de dióxido de carbono, según *British Petroleum World Energy Statistics 2016*. Son los responsables del 68% de las emisiones de dióxido de carbono y emitieron, en valores absolutos, más de 600 millones de toneladas en 2015.

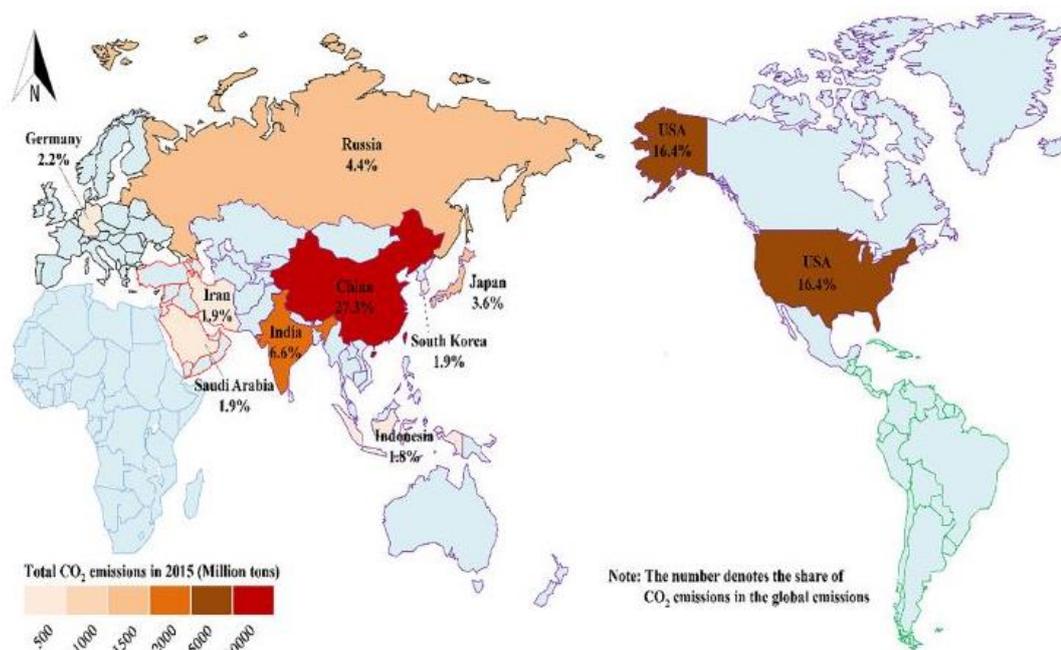


Fig. 1. TTCE: Geographic locations and proportion.
Data source: BP Statistical Review of World Energy, 2016.

Ilustración 9: Los diez mayores emisores de carbono: geografía y proporción. Fuente: What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters (Dong et al. 2018)

Vamos a recordar de forma simplificada los **INDC** de estos diez países.

Country	Target year	Base year	INDC goals
China	2030	2005	Reduce the CO ₂ emissions per unit of GDP by 60–65%
USA	2025	2005	Reduce the greenhouse gas emissions by 26–28%
India	2030	2005	Reduce the CO ₂ emissions per unit of GDP by 33–35%
Russia	2030	1990	Reduce the greenhouse gas emissions by 25–30%
Japan	2030	2013	Reduce the greenhouse gas emissions by 26%
Germany	2030	1990	Reduce the greenhouse gas emissions by 40%
South Korea	2030	–	Reduce the greenhouse gas emissions by 37% from the base scenario (business as usual, BAU)
Iran	N/a		
Saudi Arabia	N/a		
Indonesia	2030	–	Reduce the greenhouse gas emissions by 29% from the base scenario (business as usual, BAU)

Tabla 1: Objetivos individuales de los diez mayores emisores de carbono. Fuente: What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters (Dong et al. 2018)

Observando el pasado, y tomando muestras de diferentes períodos, se pueden sacar valiosos datos de cara a realizar predicciones aproximadas del futuro. Así mismo, tomamos tres variables independientes para estudiar su evolución: la emisión de dióxido de carbono, el consumo energético y la cuota de energía renovable. Los cambios generados en las variables se contrastarán dentro de las diferentes ventanas temporales para conseguir un enfoque global.

A continuación, se presentan algunas sencillas conclusiones obtenidas a partir de los registros de emisiones antropogénicas entre los años 1991 y 2015, distinguiendo la duración de tres plazos: largo (1991-2015), intermedio (2000-2015) y corto plazo (2010-2015).

Analizando concretamente el período 1991-2015, vemos que descendieron las emisiones en Rusia y Alemania, pero ascendieron en el resto de los países, con el mayor incremento anual de más del 5% observado en Indonesia, China e India; esto está principalmente relacionado con que estos tres países experimentaron un rápido crecimiento económico y, como consecuencia, un gran aumento en las emisiones de CO₂. También fue observado un gran incremento anual del 4% en Irán y Arabia Saudí, dos países ricos en petróleo. De cualquier forma, concentrándonos en los años comprendidos entre 2000 y 2015, las reducciones en las emisiones se sitúan en Estados Unidos, Japón y Alemania; y en el período 2010-2015 solo ocurrieron en Estados Unidos, Rusia y Alemania. En efecto, una reducción del índice medio anual de emisiones ha sido para Alemania algo independiente del período analizado, lo que podría estar indicando los efectos de una política climática cada vez más activa. Por otro lado, las emisiones de Estados Unidos se han visto incrementadas a largo plazo (1991-2015), han sido las más reducidas a corto plazo (2010-2015), y también han descendido a ritmo medio en el período 2000-2015 (Dong et al. 2018).

El siguiente gráfico de barras ayudará a visualizar los cambios en el consumo energético de estos diez países.

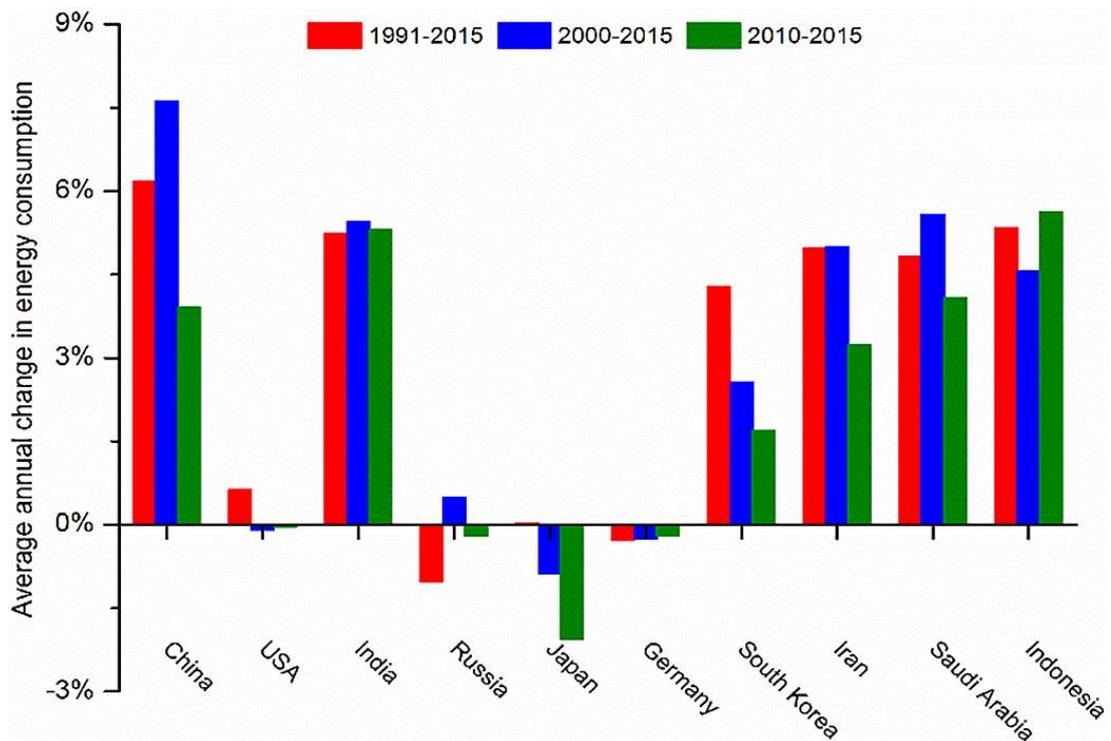


Gráfico 16: Cambio medio anual en el consumo energético de los diez mayores emisores de carbono. Fuente: *What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters* (Dong et al. 2018).

En segundo lugar, entre 1991 y 2015, creció el consumo de energía en la mayoría de los países, excepto en Rusia y Alemania, que coinciden con una reducción de sus emisiones en ese mismo período. El mayor crecimiento medio anual ha sido de China, Indonesia e India. Sin embargo, en el período intermedio, el consumo energético descendió en Estados Unidos, Japón y Alemania. El mayor descenso anual fue del 2% y registrado por Japón, lo que podría atribuirse a los continuos esfuerzos por mejorar la eficiencia energética a través de innovaciones tecnológicas. Otro gran contribuidor, Alemania, ha prosperado en la reducción de su huella de carbono ajustando la estructura de producción (Dong et al. 2018).

En tercer lugar, observando la evolución en la proporción de energía renovable frente a la energía total, se pueden extraer la siguiente información. La fracción de energía renovable de Arabia Saudí es cero. Esta

proporción se ha visto reducida en India e Irán en el largo plazo, en Rusia en el plazo intermedio, y en Indonesia en los períodos 2000-2015 y 2010-2015. Esto se explica por el aumento de la producción y consumo de energía proveniente de combustibles fósiles. En cambio, China, Estados Unidos, India, Japón, Alemania, Corea del Sur e Irán, registraron su período de más crecimiento de energía renovable entre 2010 y 2015. Para Rusia e Indonesia, la fracción aumentó considerablemente en el largo plazo. Mientras, Alemania se mantuvo líder en todos los períodos, llegando a registrar índices del 10% (Dong et al. 2018).

Siendo cada vez más reconocida la contribución de las energías renovables a reducir las emisiones de dióxido de carbono, es de esperar que más países propongan políticas y objetivos para el desarrollo de las energías renovables como EUROPA 2020 o 13th Five-Year Plan for Renewable Energy Development en China.

Basándonos en *What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters*, estudio que revela las probabilidades de los 10 mayores emisores de carbono de alcanzar los objetivos propuestos en París y los de sus propias *INDC* tomando como referencia la tendencia observada entre 1991 y 2015, se generarán, en concordancia con los tres períodos, tres escenarios, teniendo en cuenta las emisiones de dióxido de carbono, el consumo energético y la cuota de energía renovable.

Se puede predecir que, el volumen total de emisiones de dióxido de carbono de estos diez países para 2030 aumente entre un 26,5% y un 36,5% comparado con los valores de 2005. De acuerdo con las diferentes tendencias de crecimiento económico, consumo energético y la cuota de renovables, los resultados de la predicción muestran que China, India y Rusia alcanzarán los objetivos en alguno de los escenarios considerados, mientras que se espera el fracaso para Estados Unidos, Japón, Alemania y Corea del Sur. Cabe añadir que, en particular, el ritmo de emisiones de Arabia Saudí, Irán e Indonesia se presenta muy severo, pero no se ven atados a ningún acuerdo climático internacional, situación que

probablemente suscite gran interés y atraiga la atención en el futuro (Dong et al. 2018).

En conclusión, los resultados muestran que no existe ninguna tendencia que sirva de posible marco para la implementación de las reducciones en las emisiones de dióxido de carbono, situando el objetivo del *Acuerdo de París* y las *INDC* propias como inalcanzables.

4.1.2 International Bunker Fuels

El término “International Bunker Fuels (IBF)” proviene del IPCC y se utiliza dentro del contexto climático para referirse al combustible que se utiliza en los transportes aéreo y marítimo internacionales.

El sector del transporte ha crecido rápidamente en los últimos 50 años, apuntándose el 13% de emisiones de todos los gases de efecto invernadero en 2004. De este total, la aviación y el transporte marítimo suman el 40% de todas las emisiones del transporte en general. El transporte marítimo internacional significa el 83% de todas las emisiones marítimas y la aviación internacional, el 62% de las aéreas. Se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero que provienen de la aviación y el transporte marítimo internacionales suponen un 5% del total de emisiones a nivel mundial. Sin embargo, el ritmo de crecimiento de estas emisiones ha crecido por encima de la media, y se espera que crezca exponencialmente durante el presente siglo debido a la creciente demanda.

El *Cuarto Informe de Evaluación* del IPCC y otros estudios, demuestran que el transporte marítimo internacional lanzó a la atmósfera el 2,7% de las emisiones mundiales en 2007.

A pesar de que el transporte marítimo es uno de los métodos menos intensivos en consumo de energía, las emisiones de dióxido de carbono crecerán entre un 50% y un 250% para 2050 en un escenario BAU (Romera 2016).

Remontándonos a Kioto veremos que allí se acordó que los IBF permanecerían fuera del espectro del *Protocolo de Kioto*. El Artículo 2.2 del documento excluye a la aviación internacional y al transporte marítimo de la negociación y, además, nombra a la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) y a la Organización Marítima Internacional (IMO), respectivamente, como los foros específicos en donde los países que forman parte deberían continuar las negociaciones. Las principales razones de la exclusión se basan en la imposibilidad de alcanzar un acuerdo claro sobre cómo distribuir las responsabilidades de las emisiones.

En el sector aéreo, la ICAO, en su 37ª Asamblea en 2010 aprobó el *Programme of Action*, que incluye el compromiso global de mejorar anualmente en un 2% la eficiencia energética hasta el año 2020, que más tarde se amplió hasta 2050.

Por otro lado, en la IMO, las discusiones sobre cómo manejar el aumento de emisiones han orbitado sobre tres grandes pilares: medidas técnicas, medidas operacionales y medidas de mercado. El Maritime Environmental Protection Committee (MEPC) estuvo de acuerdo en 2011 en proponer dos instrumentos para mejorar la eficiencia llamados *Energy Efficiency Design Index* y *Ship Energy Efficiency Management Plan* para añadirlos a un nuevo capítulo del *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Annex VI*.

A pesar de estos pequeños avances, y de las negociaciones llevadas a cabo para trabajar en las medidas técnicas y operacionales y la cooperación para mejorar la capacidad de desarrollo propia, la organización no consiguió llegar a acuerdos para implementar mecanismos más significativos y rigurosos de medidas comerciales, cruciales para alcanzar el objetivo de los 2°C (Romera 2016).

En aquel momento, y con vistas de futuro, los IBF formaban parte de la agenda de negociaciones de la Durban Platform for Enhanced Action para, más adelante, integrarse en el *Acuerdo de París*. Permaneció en el borrador de las negociaciones durante la COP21, pero 3 días antes de su clausura, el

9 de diciembre 2015, ambos sectores fueron extraídos del borrador del acuerdo y finalmente, del *Acuerdo de París*.

Aunque se mantengan al margen, el *Acuerdo de París* tendrá consecuencias indirectas sobre los IBF. Para alcanzar el objetivo de temperatura de los 2°C y el deseo de no sobrepasar los 1,5°C, las partes tratarán de alcanzar el máximo pico global de emisiones de gases de efecto invernadero lo más pronto posible y realizar reducciones de emisiones de la mano de la mejor ciencia y tecnología disponibles, para así, alcanzar un equilibrio entre las emisiones antropogénicas y las absorciones de los sumideros de gases de efecto invernadero durante la segunda mitad de este siglo.

En este contexto, permitir que las emisiones que provienen de IBF se dupliquen o tripliquen, sería una total contradicción y pondría en peligro las intenciones de limitar el aumento de la temperatura media global acordado en París. Como resultado, las partes del acuerdo podrán explorar cómo conseguir reducciones en el área de los IBF, en el cual aún queda mucho camino de mejora y aumento de la ambición de los mecanismos. Ninguno de los *INDC* contiene medidas para el control de los IBF. De cualquier modo, los países podrían incluirlas dejando de lado el problemático factor de las emisiones extraterritoriales. Desde otra perspectiva, se podría argumentar que, si son regulados por la ICAO y la IMO, los IBF serían los únicos sectores de la economía con una regulación climática centralizada e internacional con una aproximación y un enfoque descendentes.

Resumiendo, la omisión de los IBF en el *Acuerdo de París* también tiene consecuencias para la futura regulación de los sectores. Algunas de estas consecuencias serán acentuadas por los cambios que el acuerdo trae al régimen climático. Las consecuencias más inmediatas son: (1) la consolidación de la ICAO y la IMO como los foros multilaterales para la regulación de las emisiones del transporte aéreo y marítimo internacional, respectivamente; (2) el fortalecimiento de la legitimidad de las medidas nacionales o regionales; y (3) la consolidación de la acción industrial.

En conclusión, la regulación de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte aéreo y marítimo internacional es aún un evidente vacío en la arquitectura de la legislación contra el cambio climático. La exclusión de los sectores del acuerdo es una oportunidad perdida para aclarar el estado de los IBF, y para presionar a ambos sectores a aportar una contribución justa de cara a alcanzar los objetivos climáticos globales. Esto se podría haber conseguido brindando orientación a las sedes regulatorias específicas de cada sector sobre los temas clave, como la responsabilidad de regular la contribución a los objetivos climáticos y los principios que guían sus regulaciones.

4.2 Combustibles marítimos alternativos

Dadas las circunstancias, existe la necesidad de adoptar el uso de combustibles alternativos en el sector marítimo debido a dos principales razones: aportar una reducción de contaminantes locales para cumplir con la regulación vigente; y reducir los gases de efecto invernadero para mitigar el cambio climático. El cambio climático es un problema inherente global. Mientras las emisiones de gases de efecto invernadero han continuado aumentando, una rápida y potente reducción se hace cada vez más necesaria para poder lograr los objetivos climáticos.

En 2011, ya hemos visto que la IMO implementó modificaciones al *Anexo VI* del *MARPOL*, parte de la convención dedicada a la polución del aire, adoptando el *Energy Efficiency Design Index (EEDI)* y el *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*. Sin embargo, estas medidas fracasaron en la misión de combatir las emisiones, difícil tarea debido al crecimiento absoluto del comercio por mar, lo que requerirá un cambio gradual en las actividades del sector, incluida la necesidad de una regulación a la escala apropiada.

Como el sector marítimo internacional, a la par que la aviación internacional, fueron excluidos del *Acuerdo de París*, la IMO desarrolló una hoja de ruta para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, con el objetivo

de definir la estrategia del sector y su papel en la contribución al *Acuerdo de París*. Como consecuencia, busca y estudia las oportunidades para conseguir reducciones de emisiones, incluyendo, por tanto, combustibles alternativos.

La motivación para explorar nuevos combustibles alternativos tiene una naturaleza doble. Primero, a corto plazo, el sector requiere una reducción de las emisiones de contaminantes locales: limitando el contenido de azufre en el combustible hasta el 0,1% para las Emission Control Areas desde 2015, y para todo el mundo a partir de 2020; regulando las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y, exponiendo la necesidad de combatir la emisión de partículas de materia. En segundo lugar, según lo expuesto anteriormente, a largo plazo, se necesitará lograr una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. De esta manera, se definen los criterios más importantes para elegir un combustible ideal, y queda propuesta la cuestión existente entre los combustibles convencionales, que son, el Heavy Fuel Oil (HFO) y el Marine Diesel Oil (MDO), y los alternativos. Estos últimos quedan definidos como cualquier otro combustible que pueda servir para impulsar una embarcación.

Para comprender la completa extensión de las implicaciones medioambientales es importante considerar las emisiones liberadas durante todo el ciclo de vida del combustible, y no solo durante la combustión.

Existe incertidumbre acerca del comportamiento técnico y medioambiental de los combustibles alternativos, si serán posibles y cómo se podrán desplegar ampliamente en el sector, y el subsecuente impacto que todo esto tendrá. Para poder evaluar el potencial de un combustible alternativo para convertirse en una opción viable, será totalmente necesaria la realización de un análisis de cimentación, en términos de una amplia gama de posibilidades de reducción de emisiones en la captación y el suministro del combustible, que irá a través de los campos tecnológico, económico, medioambiental y social.

Considerar el impacto medioambiental durante el completo ciclo de vida de estos combustibles alternativos de forma aislada, es, por tanto, un paso esencial para asegurar que cualquier combustible alternativo sea capaz de proporcionar un ahorro significativo de emisiones para todo el sector. Las emisiones serán posiblemente causadas durante varias de las etapas de su completo ciclo de vida, por ejemplo, durante el refinado o el transporte, o incluso, durante el cultivo, si el combustible es bioderivado.

Entonces, aunque las emisiones provocadas durante las primeras etapas de la vida del combustible no sean atribuidas como causa directa del sector marítimo, será esencial tener en cuenta la totalidad de las implicaciones de la sustitución de un combustible por otro. De lo contrario, si se fracasa en contar con este tipo de emisiones, se correrá el riesgo de adoptar alternativas de alta intensidad de emisiones.

El estudio *Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels* ha proporcionado solidez a los fundamentos necesarios para la elección del combustible alternativo idóneo. En él, se evalúan las emisiones anteriores a la combustión y las provocadas durante la operación del buque. Estas últimas, son las relativas a la combustión en el motor principal. El tipo de enfoque elegido para la evaluación proporciona datos de inventario e impactos asociados al proceso de cultivo, crecimiento o manufacturación, distribución, uso y desecho de los combustibles alternativos elegidos. Las emisiones cuantificadas en el estudio son tres gases de efecto invernadero: CO₂, NH₄, y N₂O; y tres contaminantes locales: SO_x, NO_x, y materia particulada (MP). El análisis aporta el nivel de emisiones anteriores a la combustión y operacionales por unidad de potencia suministrada por el motor.

4.2.1 Evaluación de las alternativas

Analizaremos en primer y segundo lugar los combustibles empleados hasta ahora: HFO y MDO.

4.2.1.1 Heavy Fuel Oil (HFO) (1% S)

Entre los procesos necesarios para la producción se incluyen: perforación y extracción del crudo (*onshore* y *offshore*), y pretratamiento (por ejemplo, retirar las partículas sólidas). Cuando el crudo esté refinado, el **HFO** se transporta a una estación central y se almacena en instalaciones no presurizadas. La combustión se realiza en un motor diésel de baja velocidad.

Como el HFO es coproducto del proceso de refinado, las emisiones provocadas durante estas fases de su ciclo de vida se repartirán entre el HFO y el MDO, basándose en la masa relativa de cada coproducto y el contenido energético de cada combustible.

Los principales puntos clave del ciclo de vida del HFO incluyen la eficiencia del refinado, la ventilación y la quema durante la extracción y refinado del crudo y la distancia del transporte.

4.2.1.2 Marine Diesel Oil (MDO) (0.1%S)

De producción muy similar al HFO. El MDO realiza la combustión en un motor diésel también de bajas revoluciones.

Como coproducto, tiene los mismos puntos clave que el **HFO** en su ciclo de vida.

4.2.1.3 Gas Natural Licuado (GNL)

El gas natural se extrae tanto *offshore* como *onshore*. Las emisiones asociadas a la licuefacción de gas natural incluyen las emisiones por ventilación y quema. La eficiencia de este proceso es superior en Europa que en el Caribe o Estados Unidos. La combustión ocurre en motor de gas encendido por chispa durante la operación del buque.

Los principales aspectos decisivos en su ciclo de vida son: la eficiencia de la licuefacción; el grado de ventilación y quema y el *methane slip*. *Methane slip*

se entiende como la no intencionada liberación de metano sólo durante la operación del buque.

4.2.1.4 Hidrógeno + *Carbon Capture and Storage technology (CCS)*

Sus principales procesos son compartidos con los de la producción de GNL, incluida la licuefacción. La demanda de gas natural por unidad de producción de H₂ es de 3,5 kgGNL/kgH₂ y la demanda de energía para la licuefacción es de 10 kWh/kgLH₂. En el caso de emplear la tecnología CCS, el CO₂ es capturado y almacenado durante la fase de procesamiento con un índice de captación del 85% aproximadamente. Es importante saber que la práctica de CCS llevará asociada una demanda energética adicional. La transformación de la energía tendrá lugar en una célula energética o motor de hidrógeno durante la operación del buque.

Las etapas más significativas de su ciclo de vida incluyen: la elección entre hidrógeno líquido o comprimido, la intensidad de la red eléctrica, la demanda de gas natural y la eficiencia de la tecnología CCS.

4.2.1.5 Metanol

Comparte la secuencia de procesos de producción con el GNL hasta llegar a la licuefacción. Desde aquí, los principales pasos consisten en reformado con vapor, síntesis de metanol y purificación o destilación. El almacenamiento de este combustible alternativo se ha supuesto idéntico al del petróleo refinado. Se combustionará en un motor diésel de velocidad entre media y alta, convertido a motor de combustible dual.

La eficiencia de la conversión del metano y el uso de gas natural licuado o comprimido como materia prima marcarán grandes cambios en la huella de carbono de su ciclo de vida completo.

4.2.1.6 Hidrógeno renovable

La electrólisis del agua es el proceso principal de producción de este combustible alternativo. El hidrógeno líquido (Re LH₂) es renovable si la electrólisis es alimentada mediante energía renovable, en este caso se toma a la eólica como supuesta fuente de energía renovable. Se ha supuesto que la producción de hidrógeno renovable se realice en instalaciones industriales a gran escala. Se emplearán turbinas de 4MW y con una larga vida funcional. Este método de generación de energía eléctrica provoca emisiones derivadas de la fabricación, instalación y mantenimiento de las turbinas y demás instalaciones de aproximadamente 14 gCO₂/kWh. Como el hidrógeno no renovable, este también se empleará en una célula energética.

Los principales puntos clave de su ciclo de vida se encuentran en la eficiencia del proceso electrolítico, la elección entre hidrógeno licuado o comprimido y el proceso de generación eléctrica en sí.

4.2.1.7 Soja: Aceite Vegetal Combustible

La materia prima para la producción de aceite vegetal combustible es el haba de soja argentina. Los procesos iniciales incluyen: la conversión de espacios forestales para el cultivo y producción del haba de soja; la cosecha, secado, extracción y aplastado del haba de soja y el almacenamiento convencional. El grano se transporta a Europa por barco, donde se procesa y refina como aceite vegetal combustible. El impacto que conlleva realizar cambios en la utilización del suelo y el uso de fertilizantes específicos forman parte de los procesos decisivos para la adopción de este combustible alternativo.

4.2.1.8 Colza: Aceite Vegetal Combustible

En este caso, la materia prima es la colza europea, concretamente sus semillas. Para lograr producir el aceite se necesitará: preparar un área de suelo cultivable, cultivar la colza y proceder a su cosecha y secado para más

tarde extraer y aplastar las semillas, todo ello seguido de un almacenamiento convencional. El aceite vegetal combustible se transporta por tubería hasta el puerto, donde se ubicarán las instalaciones para el repostaje de barcos. La combustión, una vez se esté operando el buque, se realizará en un motor diésel de baja velocidad.

Al igual que en el aceite vegetal combustible de soja, los cambios provocados en el suelo y el uso de fertilizantes forman parte de los procesos con más posibilidades de impacto medioambiental de todo el ciclo de vida del aceite vegetal combustible de colza.

4.2.1.9 Biodiesel: soja y colza

El biodiesel se obtiene de un proceso más allá del aceite vegetal combustible vía transesterificación. La combustión se produce en un motor diésel de baja velocidad.

Entre los procesos más impactantes a nivel medioambiental dentro de su completo ciclo de vida encontramos: cambios en la utilización del suelo, uso de fertilizantes y la transesterificación.

4.2.1.10 Bio-GNL

Los desechos de animales y de la agricultura se colectan a nivel local, el suministro de desechos pasa un pretratamiento y alimenta in digestor anaeróbico. Se obtiene aproximadamente 1kg de biogás por cada 9kg de desechos sólidos. Se ha supuesto un methane slip de 0,007 kgCH₄/kgbioGNL durante la operación digestiva. La combustión se hace en un motor de gas encendido por chispa durante la operación del buque.

La eficiencia de la licuefacción, el methane slip y el grado de quema son los factores con más impacto dentro del ciclo de vida de este combustible alternativo.

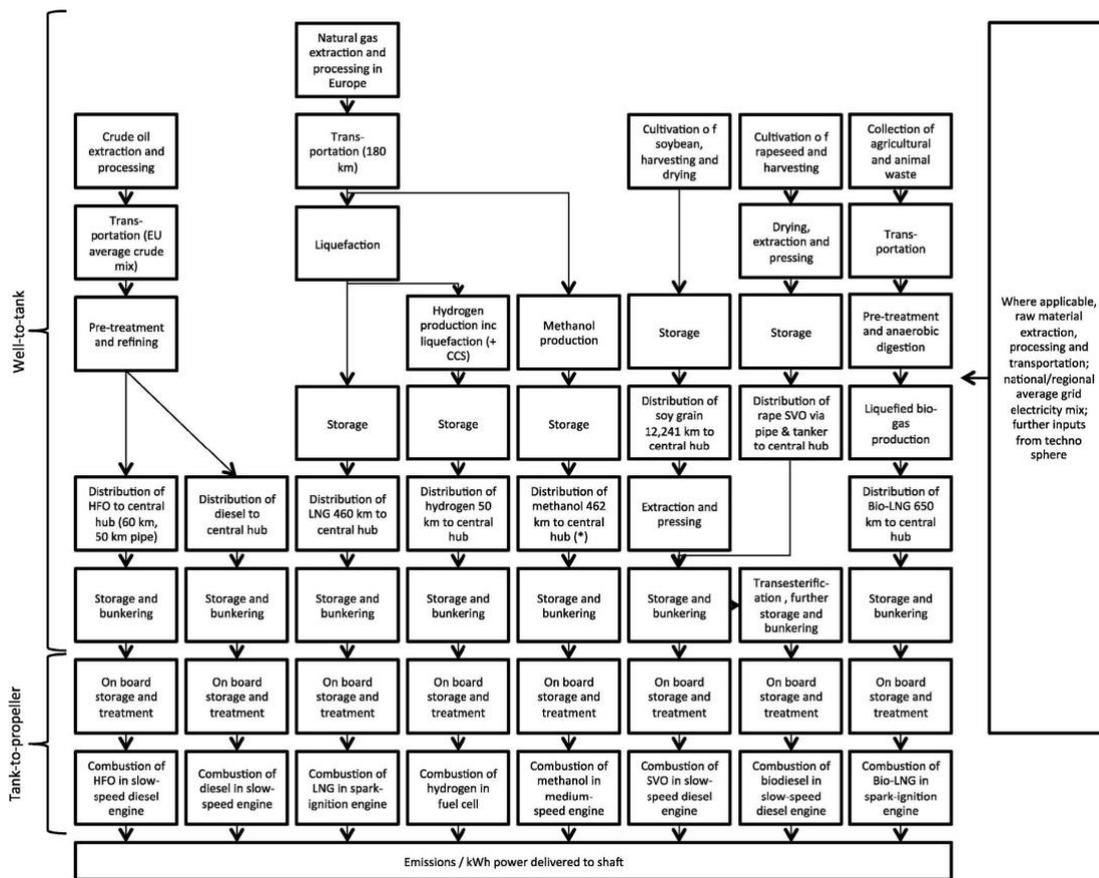


Gráfico 17: Rutas de los combustibles alternativos seleccionados. Fuente: Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels (Gilbert et al. 2017).

4.2.2 Resultados

Los 3 siguientes gráficos (Gráfico 18, Gráfico 19 y Gráfico 20) muestran las emisiones durante el ciclo de vida de cada combustible. El Gráfico 18 presenta los resultados en equivalencia de dióxido de carbono, distinguiendo entre las emisiones anteriores a la combustión (*upstream*) y las emisiones durante la operación (*operational*). El Gráfico 19 muestra los mismos resultados, pero distinguiendo entre los 3 gases de efecto invernadero (CO₂, N₂O y CH₄). El Gráfico 20 expone los resultados de emisiones de contaminantes locales (SO_x, NO_x, y MP).

4.2.2.1 Impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero

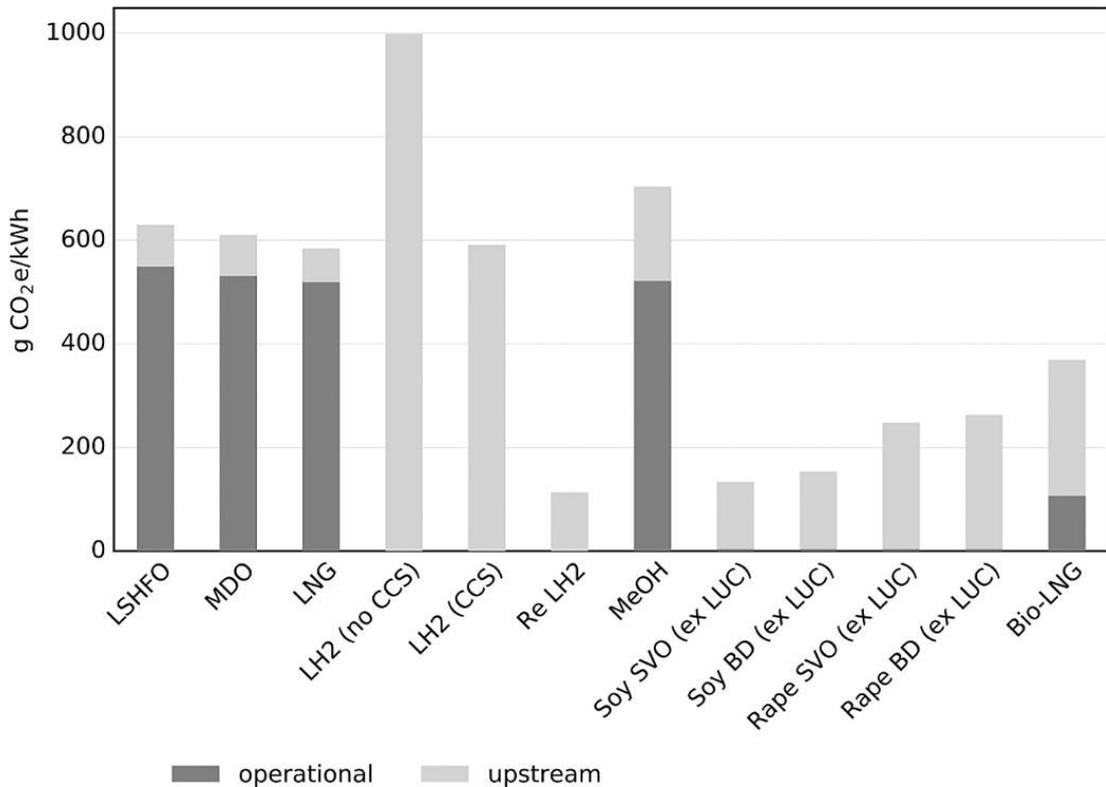


Gráfico 18: Emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida completo por kWh suministrado en el eje diferenciando operacional (durante la operación del buque) y upstream (antes de la combustión). Ex LUC (Excluding Land Use Changes) significa: sin tener en cuenta los cambios el uso del suelo. Fuente: Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels (Gilbert et al. 2017).

Los dos tipos de combustible convencional analizados y el GNL producen una cantidad comparable de emisiones de gases de efecto invernadero. Entre todas las opciones, el hidrógeno licuado sin CCS posee las más altas emisiones de gases de efecto invernadero; en cambio, con CCS, sus emisiones son similares a la de los combustibles convencionales; y solo por la ruta en que se utiliza energía renovable se puede conseguir una sustanciosa reducción. El metanol presenta un aumento del 12-15% en las emisiones comparándolo con los combustibles convencionales. En los combustibles bioderivados se observan reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero de entre un 57% y un 79%; el GNL bioderivado aporta un 40% de reducción al compararlo también con los convencionales.

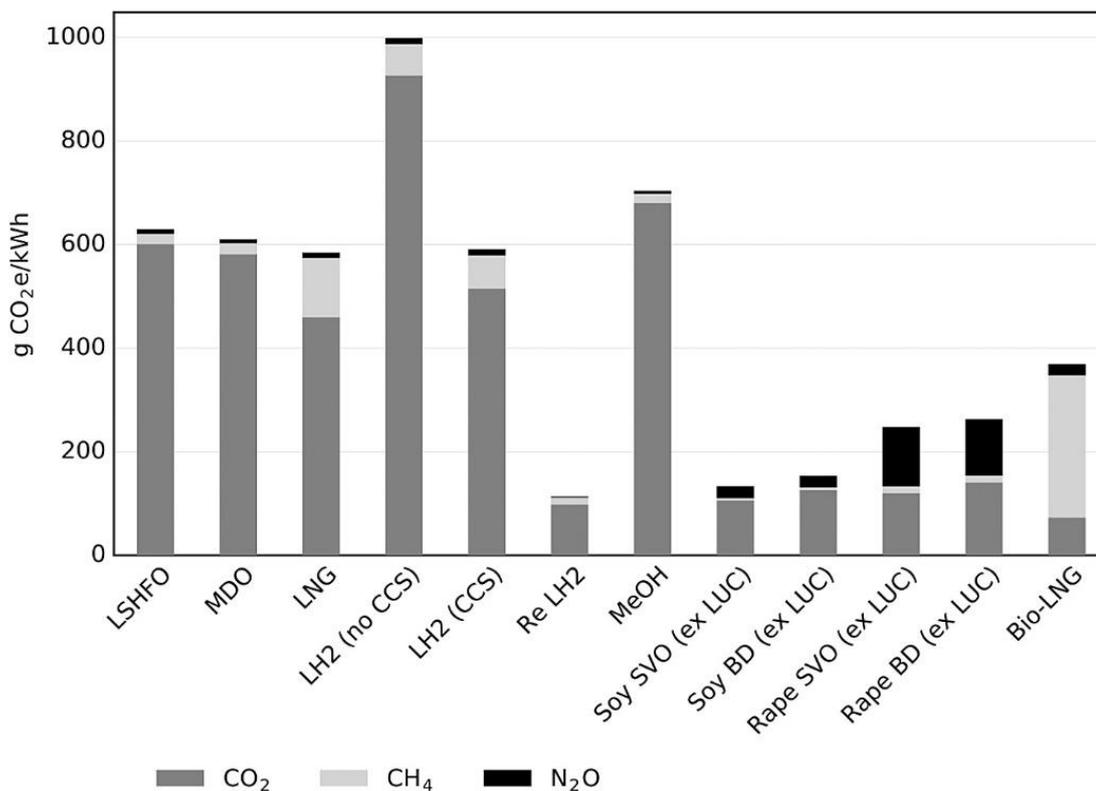


Gráfico 19: Emisiones de gases de efecto invernadero por kWh transmitido al eje diferenciando los 3 gases analizados. Ex LUC (Excluding Land Use Changes) significa: sin tener en cuenta los cambios el uso del suelo. Fuente: Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels (Gilbert et al. 2017).

El Gráfico 19 ilustra la significativa proporción que hay de gases de efecto invernadero más allá del dióxido de carbono en los combustibles bio-derivados. Las emisiones de N₂O pueden llegar a constituir casi la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la producción y aplicación de fertilizantes basados en nitrógeno durante la producción de la materia prima. En el caso del bio-GNL, la liberación de metano durante la operación del reactor resulta ser la contribución dominante a las emisiones de gases de efecto invernadero de esta alternativa.

4.2.2.2 Impacto en las emisiones de contaminantes locales

El Gráfico 20 muestra las emisiones de SO_x, NO_x, y MP por kWh transmitido al eje, distinguiendo entre las emisiones anteriores a la combustión (*upstream*) y las emisiones durante la operación (*operational*).

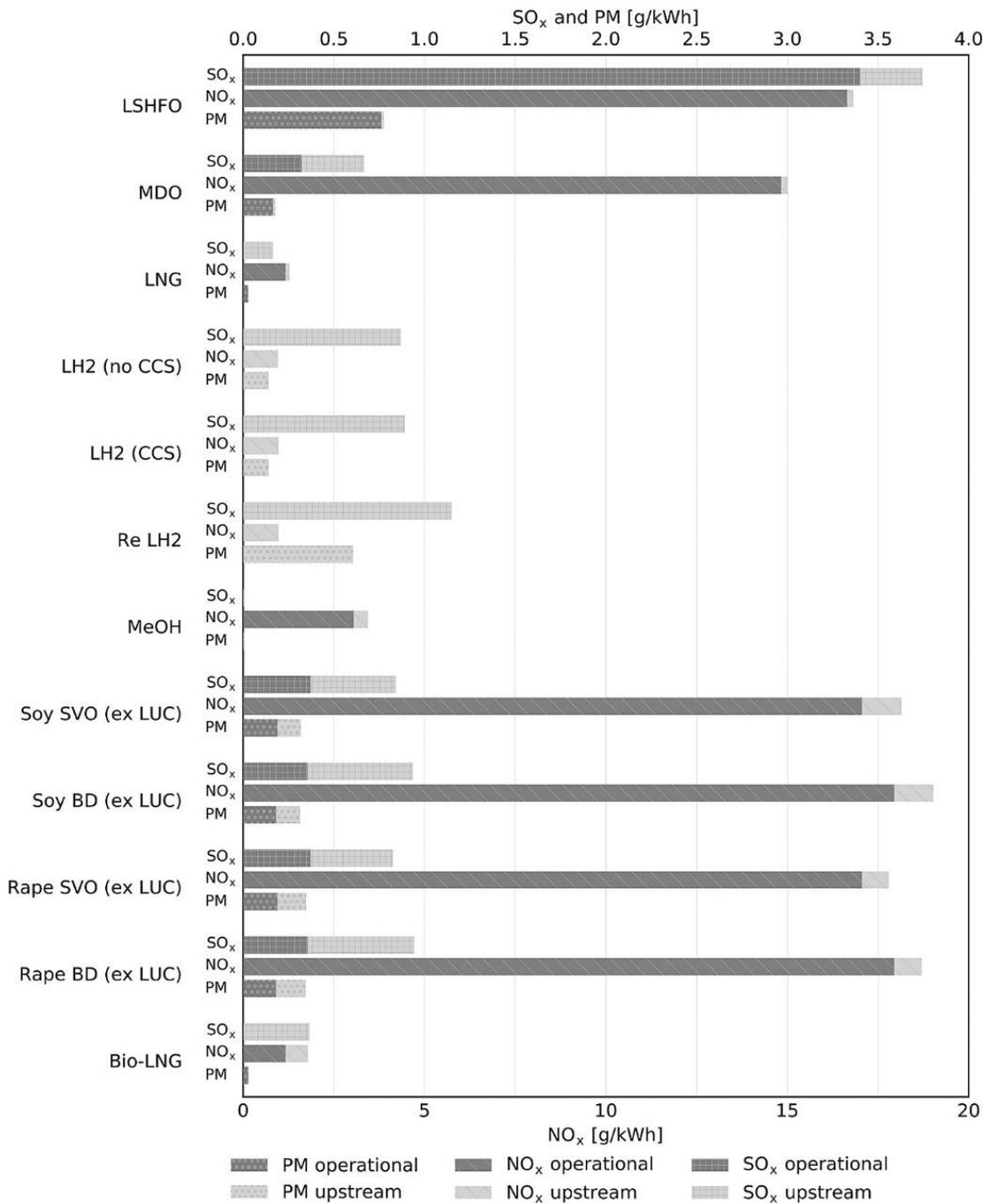


Gráfico 20: Emisiones de contaminantes locales por kWh suministrado al eje diferenciando operacional (durante la operación del buque) y upstream (antes de la combustión). Ex LUC (Excluding Land Use Changes) significa: sin tener en cuenta los cambios el uso del suelo. Fuente: Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels (Gilbert et al. 2017).

Aunque el Low Sulphur Heavy Fuel Oil sea una alternativa al Heavy Fuel Oil baja en azufres, su contenido de azufre del 1% duplica la limitación a nivel global que habrá de 2020 en adelante. Las emisiones de SO_x del resto de alternativas son significativamente menores, lo cual indica un directo cumplimiento con el máximo global. Considerando el más estricto límite

(0,1% SO_x) para las Áreas de Control de Emisiones (ECA), los resultados, exceptuando el LSHFO, también indican cumplimiento, pues las emisiones anteriores a la combustión no están contempladas en la regulación.

Respecto a las emisiones de NO_x, los resultados muestran una clara distinción entre los combustibles líquidos convencionales (15-17 g/kWh) y los bio-derivados (18-19 g/kWh) por un lado, y bio-GNL (1-2 g/kWh), hidrógeno (1 g/kWh) y metanol (3 g/kWh) por otro.

El LSHFO es el que tiene mayor intensidad de emisiones de MP (0,78 g/kWh). En relación, el MDO emite un 23% de MP. Las emisiones de MP del H₂ por reformado por vapor son el 18% de las de LSHFO. Por el método electrolítico de energía renovable, las emisiones de MP son el 78% de las de LSHFO. En los 4 combustibles bio-derivados, las emisiones varían del 41% (biodiésel de soja) al 45% (aceite vegetal combustible de colza), mientras que el bio-GNL como el GNL fósil, emite con mucha menor intensidad (alrededor del 4% de lo que emite el LSHFO).

4.2.3 Conclusiones

Actualmente, no encontramos una opción factible que se adapte a los requisitos del futuro, que consistirán en reducir tanto los contaminantes locales como los gases de efecto invernadero. En consecuencia, los esfuerzos necesitan estar dirigidos a superar barreras para explotar el potencial de los combustibles, o encontrar alternativas no expuestas aquí.

En particular, el GNL parece una opción prometedora para cumplir la regulación vigente, pero no es un combustible de bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Los combustibles bioderivados muestran cierto potencial, pero solo si podemos asegurar que se efectúen ahorros reales; los cambios en la utilización del suelo y otras emisiones anteriores a la combustión (por ejemplo, las derivadas del uso de fertilizantes) han de tenerse en cuenta. La viabilidad del hidrógeno, o cualquier otro combustible sintético que no se haya considerado en este texto, depende crucialmente

de la descarbonización del proceso de producción, bien mediante la descarbonización de la red, o sustituyendo las materias primas por renovables.

Entonces, como la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es el mayor reto por superar, es, por tanto, muy importante asegurar que ninguna medida tomada durante el corto plazo sea capaz de disminuir el potencial de los combustibles de baja intensidad de emisiones para salir adelante durante el medio plazo, en particular, al tener en cuenta la larga duración de la vida de los buques y de la infraestructura necesaria para el abastecimiento de combustible. Para cualquier opción prometedora, se requerirán esfuerzos: primero, para demostrar la aplicabilidad práctica; y segundo, para hacer crecer la escala hasta un nivel industrial, con instalaciones de abastecimiento en los importantes centros de transporte mundiales. Además, será necesaria la actuación de un gran abanico de sectores que envuelva tanto a la industria como a la política con el objetivo de asegurar la sostenibilidad del sector a medio y largo plazo.

El conjunto de desafíos necesita ser resuelto y cualquier combustible alternativo deberá cumplir con numerosos requisitos, incluyendo la correcta contabilidad de las emisiones durante su ciclo de vida. Si fuese de otra forma, el sector podrá verse avanzando hacia sus objetivos a corto plazo, pero olvidando las inminentes restricciones a largo plazo.

4.3 Transición energética global

El desarrollo energético global está adentrándose en un nuevo período histórico. Siguiendo la transición de la madera al carbón, y del carbón al petróleo y gas, el futuro verá la tercera gran transición del petróleo y gas hacia las nuevas energías. Con el mantenido crecimiento en la demanda energética y el requisito de una sociedad baja en emisiones de carbono, esta transformación llegará inevitablemente.

4.3.1 Previsiones

Teniendo en cuenta el desarrollo energético y las tendencias generales de las grandes empresas petroleras de estabilizar la producción de petróleo y aumentar la oferta de suministro de gas, el gas natural podría significar la *primera revolución*, la nueva era del desarrollo del gas natural está al llegar. Cuando se alcancen ciertos críticos avances tecnológicos, la *segunda revolución* llegará, especialmente la del gas no convencional, hidrato de gas natural (NGH), que será mayor que la primera. Las fuentes energéticas renovables completarán la *revolución final*. La energía del sol, del viento y de la tierra, el almacenamiento energético y la energía del hidrógeno están progresando rápidamente. Puede que esta última transición hacia las nuevas energías llegue antes de lo esperado (Zou et al. 2016).

El momento del pico de producción de petróleo se está alargando en el tiempo y puede que lo siga haciendo hasta mediados del siglo XXI, en parte, debido a las innovaciones técnicas en los métodos para la extracción, que posibilitan explotar zonas de gran profundidad bajo las capas de la región del Ártico.

Como es el combustible fósil más limpio, el gas natural ha entrado en una fase de rápido desarrollo y se convertirá en el puente para la transición energética, jugando así, un papel importante para el desarrollo sostenible del futuro. Durante los últimos 50 años, su parte correspondiente a la mezcla energética ha aumentado. Se trata de la opción más realista y accesible de energía limpia que puede satisfacer la demanda del mercado mundial durante un largo período temporal. Puede que el pico más alto de la producción global de gas se alcance entorno a 2060 (Zou et al. 2016).

Siendo el más barato, el carbón continuará siendo una parte significativa de la mezcla energética. Con la incrementada necesidad de protección ambiental, tenderá a emplearse un 50% más eficientemente. En su mayor parte, es utilizado para la generación eléctrica, y consumirá más de la mitad de las reservas mundiales.

Las nuevas energías pueden ser el camino hacia el desarrollo bajo en carbono. Gracias a los avances tecnológicos, los costes para el desarrollo y la utilización de estas energías continuarán descendiendo, haciéndolas más competitivas con las energías fósiles. Estas nuevas fuentes energéticas están entrando gradualmente en su época dorada. Se han convertido en un tema común de investigación. En parte, la *revolución de las nuevas energías* dependerá también de las innovaciones en acumulación energética.

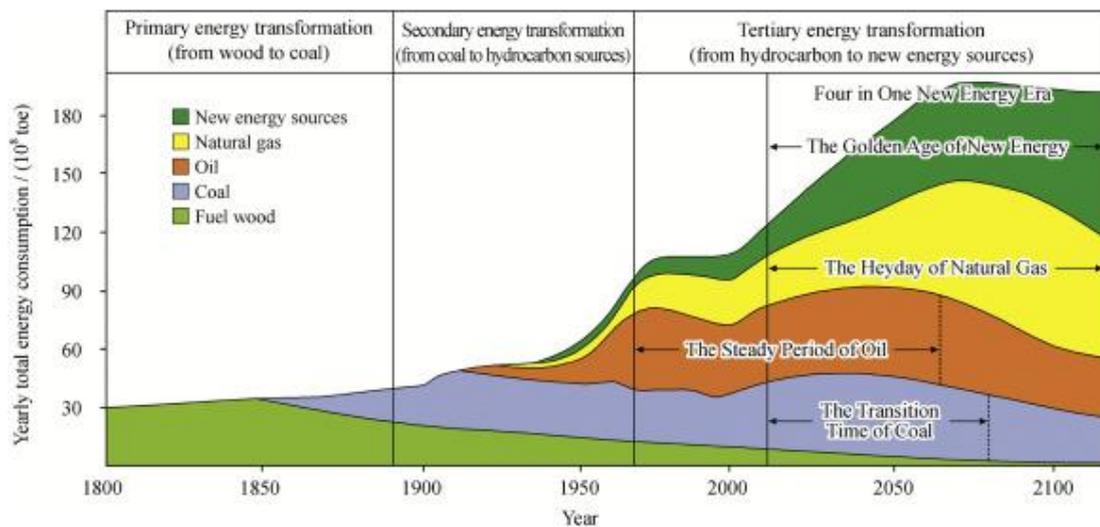


Gráfico 21: Las fases en la futura evolución del uso de las distintas fuentes de energía. Fuente: *Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era* (Zou et al. 2016).

En resumen, la industria del petróleo se ha estabilizado y verá su valor máximo de producción anual cerca del 2040. La industria del gas entrará en su mejor época y culminará en 2060 para entonces, servir de pivote hacia el desarrollo sostenible. La industria del carbón se convertirá en baja en emisiones de carbono y para 2050 habrá bajado hasta el 25% de la mezcla energética (Zou et al. 2016). El desarrollo y utilización de las nuevas energías seguirá avanzando hacia su *época dorada*, y traerá consigo una nueva fase energética, que podría estar aquí antes de lo esperado.

4.3.2 Nuevas energías para la generación eléctrica

La generación eléctrica ha sido la mayor aplicación de las energías renovables y dirigirá su futuro desarrollo. Observemos qué proceso se

pretende descarbonizar cuando empleamos las fuentes de energía renovables para la generación eléctrica. Dado que la energía se conserva, la industria energética nunca produce ni genera energía, solo la transforma de una forma a otra y la transporta. Sin embargo, el término popular para este proceso es “generación” de energía.

Aquí va una breve descripción de lo que sucede entre la planta de generación tradicional y, por poner un ejemplo, una bombilla de su casa. La fuente de energía original podría ser química (carbón o gas) o nuclear (uranio). En la planta, la energía es transformada en calor, que aumentará la temperatura de una corriente de agua, creando así vapor caliente a alta presión. El vapor comprimido circula a través de una serie de coronas de álabes que forman la turbina haciendo que estos giren sobre un eje que transmite esta rotación al generador eléctrico. No vamos a entrar en el funcionamiento del generador, pero basta con entender que transforma la rotación mecánica en corriente eléctrica (electrones moviéndose a través de un cuerpo metálico). La gran ventaja de la energía eléctrica es que se transporta hasta la bombilla de su casa utilizando básicamente cables metálicos.

En una planta eléctrica convencional, no toda la energía contenida en la fuente se transforma en energía eléctrica, de hecho, alrededor de dos tercios se disipa en forma de calor. En ocasiones, el calor residual se emplea en las cercanías de la propia planta. Las plantas que producen y aprovechan energía de dos o más tipos son plantas de cogeneración.

4.3.2.1 Energías renovables

Los tres siguientes métodos de generación eléctrica a partir de renovables se acompañan de elementos almacenadores energéticos. Las baterías son el dispositivo más común utilizado para este fin, pero actualmente, existen nuevas alternativas en desarrollo como el aire licuado o comprimido.

4.3.2.1.1 Energía eólica

Los lugares donde el fenómeno del viento es algo habitual han sido apreciados como fuente de energía desde hace miles de años. El interés por la energía eólica va en aumento desde que se abrieron las posibilidades de transformarla en energía eléctrica por medio de la tecnología existente en las turbinas eólicas.

4.3.2.1.2 Energía hidráulica

La utilización de la fuerza del agua tiene una larga historia, siendo de gran importancia para el desarrollo de la sociedad industrial moderna y esencial para la electrificación del planeta. Durante el siglo XIX, la fuerza del agua se convirtió en una fuente de energía eléctrica. La generación hidroeléctrica continúa madurando y su desarrollo industrial está muy marcado por la distribución geográfica de los recursos hídricos.

4.3.2.1.3 Energía solar

¿Con qué potencia ilumina el Sol la superficie terrestre? La luz solar tiene una potencia de aproximadamente $1\text{KW}/\text{m}^2$. Toda esta energía es transmitida en forma de luz. Cuando alcanza la superficie de la Tierra, parte de ella se refleja (por eso somos capaces de ver), y la otra parte se transforma en calor, que hace que la superficie se caliente.

La energía solar puede convertirse en electricidad por dos caminos, térmico o fotovoltaico. La energía térmica solar es la que se puede obtener cuando la luz solar calienta una superficie; las centrales de este tipo utilizan espejos para redireccionar la luz de una gran área hacia un solo punto por el que se hace circular agua para producir vapor y, a partir de esta fase, emplear las mismas tecnologías de generación eléctrica que en las plantas convencionales.



Ilustración 10: Vista aérea de la central térmica solar que está situada en los alrededores de Sevilla, pionera en su categoría. Fuente: Propia; fotografía tomada desde una aeronave AIRBUS A-319 durante un vuelo Madrid-Jerez, de Iberia Líneas Aéreas de España, el día 24 de diciembre de 2018.

Por otro lado, la energía solar fotovoltaica es la obtenida por medio de la tecnología de las placas o células solares fotovoltaicas.

Esta tecnología se encuentra en pleno desarrollo. Se busca mejorar la eficiencia, ya que, por ahora, son capaces de extraer entre un 15% y un 40% de la energía que reciben. Si cubriésemos una superficie de 1 km², podríamos generar entre 150 y 400 MW de electricidad.

4.3.2.1.4 Energía de biomasa

La producción de combustibles de biomasa tiene la característica de ser muy específico de cada región y de estar afectado por el producto agrícola.

Los combustibles bio-derivados son básicamente combustibles que provienen de las plantas. Las chimeneas de las viviendas utilizan normalmente la madera para mantener caliente la casa, esto es un claro

ejemplo de utilización de un combustible bio-derivado. Durante la combustión, se libera dióxido de carbono, pero no más del que absorbieron de la atmósfera cuando crecían como plantas. Por esta razón se los describe como neutrales en carbono. Pero no es siempre cierto, como las plantas crecen en cultivos, necesitan fertilizantes y maquinaria para crecer, y también combustible para los tractores, que normalmente lo usan de tipo fósil. Para transportar el combustible bio-derivado también libera dióxido de carbono. Descarbonizando el proceso de producción, los combustibles bio-derivados podrían aportar una significativa contribución tanto para reducir las emisiones como para conseguir la independencia energética.

4.3.3 Otras innovaciones en fuentes de energía

4.3.3.1 La energía del hidrógeno

Contiene 2,6 veces más energía por unidad de masa que la gasolina. Otro dato atractivo del hidrógeno es que el único desecho que produce es el agua, se crea cuando el hidrógeno se combina químicamente con oxígeno del aire para obtener H₂O (agua). Además, esta combinación se puede llevar a cabo con un alto nivel de eficiencia al aplicar la avanzada tecnología llamada célula energética o *fuel cell*, en inglés, para transformar la energía química en eléctrica directamente.

Una célula energética puede presentar ciertas similitudes de funcionamiento con una batería, aunque la célula energética tiene algunas ventajas distintivas. Cuando la energía química de una batería llega a su fin, es decir, toda su energía química ha sido transformada en eléctrica, hay que recargar la batería utilizando electricidad que fue generada en otro lugar y momento. Pero cuando hablamos de célula energética, solo habría que recargarla de más hidrógeno y oxígeno.

La configuración del proceso de electrolisis se asemeja mucho a la de la célula energética. Durante la electrolisis, una corriente eléctrica circula entre dos terminales a través del agua, descomponiendo hidrógeno y oxígeno de

la molécula de agua en los terminales. En la célula energética el mismo proceso ocurre en sentido inverso. Los gases hidrógeno y oxígeno se comprimen en los electrodos, se combinan para formar agua y eso hace que la corriente eléctrica fluya por los cables que conectan ambos terminales.

Últimamente es común, o al menos cada vez más, encontrarse con noticias o comentarios sobre la futura posibilidad de una economía de hidrógeno. Dicha posibilidad se sustenta en el dato de que contiene 2,6 veces más energía por unidad de masa que la gasolina y otros llamativos factores como por ejemplo que no deja residuos o que es el elemento más abundante del universo.

La principal dificultad técnica de este modelo es que el hidrógeno es poco denso. Incluso una vez licuado, su densidad es de $0,071 \text{ g/cm}^3$, unas 10 veces menos denso que la gasolina. Si lo combinamos con el dato de la energía por unidad de masa en comparación con la gasolina obtendremos que el hidrógeno contiene $0,071 \times 2,6 = 0,18$ veces la energía de la gasolina por unidad de volumen. Estamos ante un factor de alrededor de 5 veces peor combustible que la gasolina, en este aspecto. Aun así, numerosos expertos argumentan que el factor se reduce a 3, dado que el hidrógeno puede emplearse más eficientemente que la gasolina.

El almacenamiento de hidrógeno líquido resulta peligroso porque puede aumentar hasta 1000 veces su volumen si se calienta. Se podría proporcionar una mayor protección diseñando depósitos con un gran espesor en las paredes, también se puede almacenar como gas a alta presión. A una presión de 66 atm, el gas es casi la mitad de denso que el hidrógeno líquido, lo cual dificultaría encontrar espacio suficiente para almacenarlo. Los depósitos de hidrógeno llegan a pesar unas 10 o incluso 20 veces más que el hidrógeno que contienen, así que esto retira por completo la ventaja de su baja densidad. Como el hidrógeno ocupa tanto espacio, podría llegar a utilizarse en autobuses y camiones antes que en coches. También cabe la posibilidad de que sea más valorado como combustible para aviones, ya que en aviones grandes el bajo peso del

hidrógeno sería más importante que el hecho de que ocupe más espacio que cualquier combustible tradicional. La célula energética comenzó su carrera en el programa espacial como método de almacenamiento de energía utilizado por los astronautas. Durante la misión a la Luna, la ligereza era más importante que el espacio que pudieran ahorrar en la cápsula. Además. El agua desechada por la célula podría ser reutilizada por los astronautas y así no habría dióxido de carbono del que deshacerse.

El hidrógeno líquido hierve a 20K y esto puede resultar ser una dificultad técnica porque para transportarlo se necesitan recipientes especiales que soporten la diferencia de temperatura, técnicamente conocidos como **Dewar**, debido a su inventor James Dewar¹.

El hidrógeno presente en el medioambiente se encuentra principalmente en el agua y en los combustibles fósiles (hidrocarburos), pero no se encuentra libre, es decir, la molécula H₂ como tal. Eso es lo que necesitaríamos para alcanzar una supuesta economía del hidrógeno. Así que, es necesario liberar el hidrógeno de otros compuestos. Entonces, esto puede conseguirse por medio de electrolisis del agua o haciendo reaccionar hidrocarburos con agua. Cualquiera de las dos opciones requiere un aporte de energía.

Una planta de producción de hidrógeno del futuro empezaría por una planta eléctrica (de cualquier tipo) que alimentaría la reacción electrolítica para obtener el hidrógeno. Después se enfriaría el hidrógeno y se transportaría hasta los lugares de consumo. Cuando se utilizan métodos como este, solo podemos recibir de vuelta del hidrógeno una fracción de la energía que se aportó para producirlo. Aunque las células energéticas no contaminen, no

¹ James Dewar es famoso por ser el primero en licuar hidrógeno (1904) enfriándolo a 20,13K. Se trataba de un proceso muy peligroso, su ayudante Robert Lennox perdió un ojo en una explosión. Dewar inventó el vaso Dewar (1892), que consiste en un recipiente con la función de aislar térmicamente. Se utiliza para almacenar líquidos fríos o calientes. Hoy en día, su invento posee aplicaciones de nivel cotidiano como, por ejemplo, en un termo para café. El invento está formado por un vaso de vidrio dentro de otro, ambos sellados por la boca, dejando un vacío parcial entre ellos. Consiguió llegar a este diseño mientras estudiaba la criogenización.

sería correcto afirmar que una economía basada en el hidrógeno no es contaminante, a no ser que la planta de producción tampoco lo sea. Aún así, sería menos dañino para los ecosistemas por dos razones: una planta de generación eléctrica puede, en principio, ser mucho más eficiente que, por ejemplo, un automóvil (así, se libera menos dióxido de carbono); y la planta eléctrica puede tener más y mejores dispositivos o mecanismos de control para la contaminación que un automóvil. Otra de las razones que hacen de esta opción una alternativa atractiva es que movería los focos de contaminación lejos de las ciudades, donde las altas concentraciones de sustancias contaminantes afectan de forma directa a la salud humana.

Ya expuse que el hidrógeno es el elemento más abundante del Universo, y lo es por mucho. El 90% de los átomos del Sol son hidrógeno, ocurre lo mismo en planetas grandes como Júpiter o Saturno. Pero, sin embargo, se encuentra prácticamente desaparecido de la atmósfera terrestre, ¿por qué? La respuesta es sencilla, se debe a la gravedad. La Tierra una vez tuvo abundante hidrógeno, pero lo perdimos en el espacio. En aquel momento, la temperatura global era inferior a la actual. Los diferentes gases que formaban el aire tenían la misma energía interna y estaban a la misma temperatura. Cuando la temperatura terrestre fue aumentando, también lo hizo la energía interna de los gases del aire. Los gases más ligeros, como el hidrógeno, experimentaron un mayor aumento en la velocidad de sus átomos que los gases más pesados. Llegó un punto en el que los átomos de hidrógeno alcanzaron la velocidad de escape de la Tierra y comenzó a desaparecer del planeta como molécula libre. En cambio, el Sol y Júpiter tienen una gravedad mucho mayor que la de la Tierra y conservan su hidrógeno.

4.3.3.2 Innovaciones en la alimentación energética del automóvil

El alto contenido energético por unidad de masa es el fundamento físico por el cual la gasolina es tan popular. La otra razón es que, tras la combustión, todos los residuos son gaseosos, mayormente dióxido de carbono y vapor

de agua, así que no hay residuos que retirar. En el caso del carbón, por ejemplo, habría que retirar las cenizas.

Una batería también almacena su energía de forma química. Utiliza la energía para sustraer electrones de los átomos y transportarlos en cables hasta donde sea necesario. De esta manera es sencillo transportar la energía y convertirla en movimiento mediante un motor eléctrico.

Una batería de coche contiene una cantidad de energía 300 veces menor que la que obtendríamos de la misma cantidad de masa si fuese de gasolina. Incluso una batería sofisticada de un ordenador portátil de alta gama contiene aproximadamente, 100 veces menos energía. Por esta razón física se puede pensar que la mayoría de los automóviles usan gasolina en vez de baterías. Solo se utiliza la batería para el arranque debido a su fiabilidad y rapidez a la hora de provocar el movimiento inicial.

4.3.3.2.1 Automóviles eléctricos

La típica batería de un coche es de plomo y ácido, porque emplea la reacción química entre el plomo y el ácido sulfúrico para generar electricidad. Hemos visto que posee un contenido energético muy inferior al de la gasolina, sin embargo, se puede llegar a aprovechar esa energía de la batería para dar tracción con un 85% de eficiencia. Un motor de gasolina es mucho peor en este aspecto, pues solo el 20% del contenido energético del combustible llegará a las ruedas en forma de movimiento y el 80% restante se transforma en calor, inútil.

Teniendo en cuenta las diferentes eficiencias, ahora el motor de gasolina solo es 80 veces mejor, y no 300. Factor suficientemente pequeño como para que los automóviles eléctricos sean factibles. De hecho, se construyen y funcionan. Esta industria especializada se encuentra en continuo desarrollo tecnológico; el almacenamiento de energía eléctrica, en concreto, ha supuesto un gran reto desde los inicios del propio concepto.

Indudablemente, el gran peso y bajo contenido energético de las baterías frente a la gasolina supone grandes desventajas para los vehículos

eléctricos. Una razón para escoger la alternativa eléctrica, sabiendo que estaríamos renunciando a cierta capacidad de autonomía, sería ahorrar dinero. En efecto, la energía suministrada por la red eléctrica es más económica que la que podemos sustraer de la gasolina. Sin embargo, las baterías de nuestro automóvil tendrán que ser renovadas cada cierto número de ciclos de carga. Cuando incluimos los gastos que genera este tipo de mantenimiento, resulta que los costes de operación son muy superiores a los de un vehículo convencional de iguales prestaciones, exceptuando claro, la autonomía.

Por otro lado, en la actualidad, existe una creciente corriente de compañías y organizaciones que investiga para mejorar las características de las baterías. La nanotecnología se encuentra emergiendo. La aplicación de esta tecnología acelerará el desarrollo de la tecnología de las nuevas energías. El excelente comportamiento del grafeno asegurará que se convierta en el siguiente *oro negro* después del petróleo. Según algunas predicciones preliminares, para 2030, la nanotecnología habrá contribuido a reducir un 40% los costes de la generación eléctrica a partir de energía solar. Además, también acelerará los adelantos en las baterías.

Durante la conferencia climática de París, Alemania propuso su objetivo de prohibición total de coches alimentados por diésel y gasolina para 2050. Puede que los grandes progresos, basados en el grafeno y otros materiales, conseguidos en el campo de las baterías sirvan para la producción en masa de baterías que se carguen rápidamente y den un largo servicio y durabilidad. La tecnología de acumulación energética en baterías muestra gran potencial. Si tuviese éxito en proporcionar gran capacidad, rápida carga y larga durabilidad, podría acelerar la llegada de la *nueva era energética*.

4.3.3.2.2 Automóviles híbridos

A pesar de las limitaciones que, de momento, existen en las baterías, estas forman parte de una tecnología cada vez más conocida: automóvil híbrido. En un híbrido, un pequeño motor de gasolina sirve para dar carga a la batería; las ruedas reciben la energía de las baterías. Puede que esto sea

más útil de lo que parece. Cuando el motor de gasolina trabaja en condiciones ideales, es decir, manteniendo el ritmo para el que se diseñó constante, puede llegar a ser hasta casi tres veces más eficiente de lo habitual. Además, en un vehículo híbrido, se reutiliza parte de la energía en determinadas situaciones. Cuando hay un exceso de energía cinética (durante el descenso o la frenada), esta es reconvertida en energía eléctrica para recargar las baterías.

Con métodos como éste, se están aproximando dos problemas simultáneamente. Primero, desde el punto de vista de un motor de gasolina convencional, se ha reducido el consumo notablemente; y, en segundo lugar, viéndolo desde el ángulo de la alternativa eléctrica, se está alargando la vida de las baterías, pues por cada ciclo de carga habremos recorrido una distancia de viaje mayor.

4.3.3.3 Energía nuclear

Desde el siglo pasado, se desarrolló la energía nuclear para la generación eléctrica. No obstante, recientemente, el progreso en materia de energía nuclear se ve está viendo muy influenciado por el desastre de Fukushima y tiende a ser cauto. Las dos grandes regiones donde se emplea son Europa y Norteamérica.

4.3.3.3.1 Fisión nuclear

Con fisión nos referimos a un tipo especial de radioactividad, es la repentina división de un núcleo en dos o más partes. Obtuvo su nombre de forma análoga a la fisión que ocurre en las células biológicas. Este proceso puede ocurrir de dos maneras: espontánea o inducida.

En la fisión espontánea, el núcleo se comporta como otros núcleos radioactivos, es decir, permanece invariable normalmente durante una semivida, para después, en un tiempo aleatorio descomponerse de repente. La fisión espontánea es prácticamente inexistente en la naturaleza, pero ocurre en algunos isótopos que han sido producidos artificialmente.

El segundo tipo es la fisión inducida. Puede ocurrir cuando un tipo indicado de núcleo es bombardeado por un neutrón. El neutrón es así absorbido, y el núcleo resultante, aún con esta diminuta aportación, se vuelve inestable y se fisiona. Este tipo de fisión es el fundamento básico de los reactores y las armas nucleares.

En una fisión, la masa del núcleo se divide habitualmente en dos partes desiguales llamados fragmentos de fisión. Estos, suelen ser radioactivos con semividas relativamente cortas (pueden durar de segundos a años), y pueden ser realmente peligrosas para la vida. Son la fuente primaria de radioactividad residual tras la explosión de un arma nuclear y el principal peligro en las consecuencias radioactivas de un arma de este tipo.

4.3.3.3.2 Fusión nuclear

Con fusión nos referimos a la unión de partículas. Se trata de la fuente de energía del Sol, y como consecuencia, es la fuente de energía fundamental para casi la totalidad de la vida en la Tierra².

La principal fuente de fusión del Sol viene de unir 4 núcleos de hidrógeno para formar helio. Otras partículas aparecen en el proceso. En la fusión solar más habitual encontraremos, además de helio, cinco rayos gamma (γ), dos neutrinos (ν) y dos positrones (e^+).



Puede que el hecho de que haya más partículas tras el proceso de fusión que en el instante previo genere cierta confusión en cuanto a su etimología, pues, hemos visto que fusión significa unión y, fisión, separación. En la fisión, la suma de la masa de los elementos creados no alcanza la del uranio

² Es sabido que existen formas de vida submarina que no precisan de la radiación solar para su desarrollo. Estas habitan a 6.000 metros de profundidad y se nutren quimiosintéticamente. Aprovechan las grandes cantidades de gases y minerales que emergen del suelo debido al delgado espesor de la corteza terrestre en zonas tan profundas.

o plutonio original. La razón etimológica del nombre de fusión se basa en el hecho de que un nuevo elemento es creado, y este es siempre más pesado que cualquiera de los núcleos con los que se inició el proceso.

Son las partículas de luz (e^+ , γ y ν) las que contienen la mayor parte de la energía. Los neutrinos escapan del Sol, pero las demás partículas colisionan con otros átomos, en su mayoría hidrógeno, comparten su energía con estos átomos, y calientan el Sol. Es este calor inducido radioactivamente el responsable de que el Sol brille. La mayoría de los elementos pesados, incluyendo el carbono, nitrógeno y oxígeno (básicos para la vida) fueron formados mediante fusión nuclear en alguna antigua estrella.

El hidrógeno podría ser el *combustible* para la fusión, y todo lo que se obtendría sería helio, un gas inofensivo.

La fusión descontrolada se utilizó en la bomba de hidrógeno, pero la obtención de energía a partir de la fusión nuclear controlada lleva siendo objetivo de científicos desde la década de los 50, mostrándose muy difícil de lograr. El problema es simple: la mayoría de los proyectos para producir fusión requieren temperaturas más altas que las que puede haber en el interior del Sol. El obstáculo fundamental es que los núcleos de hidrógeno se repelen entre sí por sus cargas eléctricas. Este es el motivo por el que se necesita aportar mucha energía para superar la fuerza de repulsión eléctrica, es decir, calentar el hidrógeno a unos millones de grados Celsius. Si queremos utilizar la fusión para generar electricidad, entonces necesitamos temperaturas aún más elevadas. Por supuesto, cualquier material tan caliente tendría una presión altísima y explotaría, además, el plasma de hidrógeno fundiría cualquier contenedor físico que fuese utilizado. Los planes para los reactores termonucleares incluyen temperaturas de unos 100 millones de grados centígrados. Si la reacción ocurre en una millonésima de segundo (como sucede en la bomba de hidrógeno), la temperatura será aún mayor. Pero es posible que existan soluciones.

Hay dos ramas principales en la investigación de la energía de fusión. Una, es la del confinamiento magnético, que pretende utilizar un campo

magnético como recipiente para el hidrógeno. Esto es el método Tokamak, nombrado así por el dispositivo ruso que por primera vez logró algún avance. Otra, podría ser la de fusionar cantidades muy reducidas de hidrógeno y permitir que explote, lo cual sería un concepto similar al que aplicamos con la gasolina en el interior de un cilindro de un motor de combustión interna. Por último, existe un tercer principio para el cual se desarrollan programas de investigación, este es el de la fusión fría. Estos proyectos demuestran de forma habitual su gran dificultad para progresar, aunque las nuevas ideas siempre pueden traer consigo un futuro prometedor. La primera de las líneas, el confinamiento magnético, es la opción más plausible dados los resultados obtenidos en las últimas décadas. Por este motivo, un consorcio internacional formado por 35 países (que incluyen China, la Unión europea, EE. UU., India, Japón, Corea y Rusia) desarrollan en el sur de Francia el proyecto ITER, un reactor experimental que esperan que en las dos próximas décadas demuestre la viabilidad de los reactores comerciales de fusión nuclear. El tamaño de estas infraestructuras para producir electricidad, con nuestro conocimiento actual, debería ser enorme, muy superior a los actuales reactores de fisión y, paradójicamente, emplearía cantidades de combustible despreciables. La cantidad de materia necesaria es increíblemente pequeña. Para una planta de 1 GW, la masa total de combustible sería de 100 kg al año, aproximadamente el 10% de la masa de Uranio-235 que se utiliza en una central de fisión nuclear de la misma capacidad. El combustible de una planta de fusión nuclear, hidrógeno, se puede extraer del agua aplicando una cantidad mínima de energía en comparación con la que podríamos obtener de la posterior fusión. Sin embargo, se requiere una temperatura menor si se recurre a isótopos pesados (deuterio y tritio) de este elemento. El deuterio se encuentra naturalmente en el agua en una proporción de 1 a 6.000, y no es complicado de extraer. El tritio es inusual, pero se puede crear bombardeando litio con neutrones. Además, los neutrones se pueden obtener del proceso de fusión, así que, la planta podría generar su propio tritio.

5 Conclusiones

Los primeros pasos en el consumo energético humano externo al de nuestro organismo dieron pie a cambios en los rasgos evolutivos, constituyeron la base para el desarrollo de la civilización, mejoraron la calidad de vida y fomentaron el sedentarismo. Con el transcurso del tiempo, las innovaciones tecnológicas permitieron la visión de la naturaleza como posible recurso energético explotable, y así, se desencadenó la búsqueda de nuevas fuentes de energía entre las diferentes regiones, que evolucionarían por separado debido a sus características individuales. El desarrollo de la tecnología ligada al transporte contribuyó a ampliar la extensión geográfica de las técnicas de producción energética, mejoró el comercio y unificó los métodos de las regiones más desarrolladas. Las circunstancias más desfavorables provocan cambios; la escasez, en algunos casos, aceleró las pasadas transiciones energéticas que, finalmente, se tradujeron en mejoras de manufacturación y comercio. Esto dio paso a las revoluciones industriales, responsables de la aceleración en el consumo energético y crecimiento demográfico esenciales para encarar la globalización. En las últimas décadas, el incrementado consumo energético y crecimiento demográfico han generado preocupación, que ha desembocado en un aumento de la concienciación de la situación medioambiental actual, originada por la producción energética a partir de combustibles fósiles. De esta forma, creció la investigación de nuevas fuentes de energía; la creciente inversión en esta área ha generado desarrollo tecnológico hacia la sostenibilidad, lo cual, se puede observar en el reciente incremento de la proporción de energías renovables presente en la mezcla energética.

En la actualidad, las tendencias del pasado en cuanto a consumo global y cambios en la proporción de la mezcla energética están teniendo consecuencias negativas para el desarrollo de la vida en el planeta. Las ansias de conocimiento científico para mejorar el entendimiento del sistema climático terrestre han contribuido enormemente en la aportación de datos para estimar la variabilidad de este. De las observaciones realizadas, los

expertos concluyen que la influencia de nuestra especie en el sistema climático es clara, se está incrementando, se observa en la totalidad de los continentes y océanos y que la velocidad de los cambios observados no ha tenido precedentes en los últimos milenios. Conclusiones de este tipo han avivado la cooperación y respuesta internacional, cuyos efectos podrían estar comenzándose a visualizar en algunos países. Es posible, que la naturaleza de voluntariedad de los objetivos propuestos por cada país interfiera en el objetivo global de los 2 grados Celsius ya que, en algunos casos, la ambigüedad de las promesas refleja debilidad en el acuerdo. Además, la gestión de las restantes reservas de combustibles fósiles será determinante para el cumplimiento de los objetivos. Los datos aportados sobre esta materia pueden ser contradictorios debido a la alteración que en los informes pueden provocar los potentes intereses políticos y financieros; han de ser interpretados con cautela. Es cierto que se necesitará una mayor sofisticación en los métodos de extracción, pero puede que las innovaciones tecnológicas amortigüen el incremento en el coste de explotación. Las fluctuaciones en el precio del barril de petróleo influyen en la economía global debido a la estratégica posición del sector energético. De este modo, resulta interesante conocer el momento en el que se agotarán las reservas; no obstante, se muestra muy complicado y, además, los objetivos del *Acuerdo de París* limitarían su uso antes del agotamiento.

Según las últimas tendencias, las trayectorias muestran un futuro incierto para la implementación del acuerdo y sitúan sus objetivos como inalcanzables. Por otra parte, la exclusión de los IBF del acuerdo aumenta la debilidad de este, pues la aviación y el transporte marítimo internacionales suponen una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales. Cada sector, desarrollará sus propios planes para la búsqueda de nuevas alternativas; en el sector marítimo, el análisis del completo ciclo de vida de los combustibles alternativos demuestra la imposibilidad de encontrar una opción que cumpla con todos los requisitos. El GNL cumpliría con la regulación vigente, pero es de alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero; los bio-derivados, muestran gran potencial, pero solo en el caso de conseguir la descarbonización del

proceso. Con todo esto, la transición energética está por llegar, y lo hará por fases. Las energías solar, eólica, hidráulica, nuclear, de biomasa y el uso de hidrógeno como vector energético podrían formar parte de las nuevas energías fundamentales en la próxima transición. Es posible, incluso, que se consiga en este siglo que la base de nuestra producción energética sea la energía nuclear de fusión, la energía de las estrellas, logro esencial para alcanzar una civilización sostenible según algunos visionarios del siglo XX como Isaac Asimov. En conclusión, siendo afectados por el ritmo de los avances tecnológicos, la estructura política, el crecimiento económico y las fluctuaciones en los precios del petróleo y el gas, los procesos revolucionarios en materia de energía estarán sujetos a una gran incertidumbre y las previsiones sobre los momentos de máxima producción de petróleo, gas y carbón permanecerán abiertas al cambio.

Se ha recorrido un largo camino; los desarrollos conseguidos se deben a las contribuciones de muchos pioneros. Ciertamente, al final de cada fase de mejora en particular, nuestros ingenieros predecesores pudieron pensar que se aproximaron a la perfección, y es crucial para el progreso tener en mente que esto nunca es así. Es importante saber que existe un consenso científico del que obtener conclusiones. Como en todo, habrá posicionamientos a favor y en contra. En ambos lados, se exagerarán y distorsionarán los resultados, haciéndonos creer que son propios del IPCC. Esto puede llevarnos a pensar que dichas conclusiones son erróneas, y perder el interés, dando por hecho que todo es una falacia; pero esto es una lógica falsa. Aunque una hipótesis se sostenga sobre argumentos incorrectos no significa que la hipótesis sea falsa. Existen muchas razones para concienciarse.

Entonces, las acciones tienen que estar motivadas por el entendimiento de lo que es real y lo que no. Algunas acciones serán simbólicas, otras serán diseñadas para servir de ejemplo y otras para dar el primer paso; pocas resolverán el problema. Es importante distinguir entre gesto simbólico y acción eficaz. La aplicación de medidas políticas deberá fundamentarse en el completo entendimiento de la relación petróleo – PIB en el contexto de

una economía basada en el petróleo, consiguiendo así, reconocer la situación y operar rápidamente para introducir medidas de reducción de consumo y fomentar el uso de nuevas fuentes energéticas. Por tanto, la indeterminación a la hora de tomar decisiones aumentará los riesgos derivados de las consecuencias macroeconómicas de los cambios en el precio del petróleo en el futuro, demandando así, medidas políticas aún más drásticas y urgentes. La auto-regulada relación entre el precio del barril y la actividad económica tendrá que romperse para promover la inversión en fuentes energéticas alternativas, y terminará haciéndolo, pero hasta entonces, se complicará y extenderá la transición hacia las nuevas energías.

Para una pronta transición hacia el desarrollo sostenible será necesario un rápido cambio de mentalidad que conlleve la urgente transformación del *statu quo*. De no ser así, cuanto más tarde se produzca la reacción, más exageradas serán las consecuencias y más potentes serán los desafíos que afrontar. El IPCC nos ha aportado los conocimientos necesarios para tomar las decisiones, los argumentos motivadores para dar una respuesta y la información sobre las consecuencias de una actitud pasiva, la ignorancia ya no está justificada.

Una posible dirección que tomar en las futuras medidas políticas climáticas es hacia las soluciones tecnológicas. Las negociaciones internacionales deberían enfatizar los esfuerzos cooperativos en la investigación para lograr avances tecnológicos. El foco debería incluir la energía de fusión nuclear, *carbon-capture-storage-reuse*, fertilización del océano, energía solar, energía hidroeléctrica, vehículos eléctricos, tecnología de almacenamiento de energías, y otras muchas aproximaciones del problema e innovadoras soluciones para frenar el calentamiento global.

Bibliografía

ALTIN, M., 2016. Buildings of the Future : Solar Architecture. *Solar TR2016 Solar Conference & Exhibition* [en línea]. Istanbul: s.n., pp. 413-417.

Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/327844146_BUILDINGS_OF_THE_FUTURE_SOLAR_ARCHITECTURE.

BENNETT, F.M., 1896. *The steam navy of the United States: a history of the growth of the steam vessel of war in the U.S. Navy, and of the Naval Engineer Corps*. [en línea]. Pittsburg, Pa: Warren & co. ISBN 9780511705953. Disponible en: <http://tinyurl.com/y85yix6q>.

BREEZE, P., 2018. An Introduction to Hydropower. *Hydropower* [en línea]. S.I.: Elsevier Science & Technology, pp. 1-12. ISBN 9780128129067. Disponible en: <http://tinyurl.com/ycc2ld6v>.

BREIDENICH, C., MAGRAW, D., ROWLEY, A. y RUBIN, J.W., 2018. The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *The American Journal of International Law* [en línea], vol. 92, no. 2, pp. 315-331. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/2998044>.

BRESSE, J.A.C., 1876. *Water-wheels: Or, Hydraulic Motors* [en línea]. New York: Wiley. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2027/nyp.33433066399811>.

BRITISH PETROLEUM COMPANY, 2018. BP Statistical Review of World Energy 2018. *BP Statistical Review of World Energy* [en línea], vol. 67, pp. 1-56. Disponible en: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.

BROWN, K.S., MAREAN, C.W., HERRIES, A.I.R., JACOBS, Z., TRIBOLO, C., BRAUN, D., ROBERTS, D.L., MEYER, M.C. y BERNATCHEZ, J., 2009. Fire As an Engineering Tool of Early Modern Humans. *Science* [en línea], vol. 325, no. 5942, pp. 859-862. DOI <http://dx.doi.org/10.1126/science.1175028>. Disponible en: <http://tinyurl.com/yddntpm4>.

CATALDI, R. y CHIELLINI, P., 1995. Geothermal energy in the Mediterranean area before the middle ages. *Proceedings* [en línea], vol.

1, pp. 373-380. Disponible en: <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1995/1-cataldi.pdf>.

CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, 1998. Protocolo de Kioto. *Protocolo de Kioto* [en línea]. Kioto: Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.

CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, 2015. Acuerdo de París. [en línea]. París: Disponible en: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE, 2017. Indicators 2017 - Temperature. *EUROPEAN STATE OF THE CLIMATE 2017 | HEADLINE CLIMATE INDICATORS* [en línea]. [Consulta: 4 febrero 2019]. Disponible en: <https://climate.copernicus.eu/node/335>.

DAEMEN, J.J.K., 2004. Coal Industry, History of. *Encyclopedia of Energy* [en línea]. S.l.: Elsevier, pp. 457-473. ISBN 978-0-12-176480-7. Disponible en: <http://tinyurl.com/ydxwsakq>.

DODSON, J., LI, X., SUN, N., ATAHAN, P., ZHOU, X., LIU, H., ZHAO, K., HU, S. y YANG, Z., 2014. Use of coal in the Bronze Age in China. *The Holocene* [en línea], vol. 24, no. 5, pp. 525-530. ISSN 14770911. DOI 10.1177/0959683614523155. Disponible en: <http://tinyurl.com/y8gs8afc>.

DONG, C., DONG, X., JIANG, Q., DONG, K. y LIU, G., 2018. What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 622-623, no. December 2015, pp. 1294-1303. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.12.093. Disponible en: <http://tinyurl.com/ybtkrnvk>.

EDWARDS, P.N., 2006. Meteorology as Infrastructural Globalism. *Osiris* [en línea], vol. 21, no. 1, pp. 229-250. ISSN 0369-7827. DOI 10.1086/507143. Disponible en:

<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/507143>.

FASOL, K.H., 2002. A Short History of Hydropower Control. *IEEE Control Systems* [en línea], vol. 22, no. 4, pp. 68-76. ISSN 1066033X. DOI 10.1109/MCS.2002.1021646. Disponible en: <http://tinyurl.com/y7fjum4x>.

GIEBELHAUS, A.W., 2004. Oil Industry, History of. *Encyclopedia of Energy* [en línea]. S.I.: Elsevier, pp. 649-660. ISBN 978-0-12-176480-7. Disponible en: <http://tinyurl.com/y9xm7kw7>.

GILBERT, P., WALSH, C., TRAUT, M., KESIEME, U., PAZOUKI, K. y MURPHY, A., 2017. Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 172, pp. 855-866. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.10.165. Disponible en: <http://tinyurl.com/y7dd2joj>.

GOWLETT, J.A.J., 2016. The discovery of fire by humans: a long and convoluted process. *Philosophical Transactions B* [en línea], vol. 371, no. 1696, pp. 1-12. ISSN 0962-8436. DOI 10.1098/rstb.2015.0164. Disponible en: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/371/1696/20150164>.

GULLIVER, J.S. y ARNDT, R.E.A., 2004. Hydropower, History and Technology of. *Encyclopedia of Energy* [en línea]. S.I.: Elsevier, pp. 301-314. ISBN 978-0-12-176480-7. Disponible en: <http://tinyurl.com/y9nn692p>.

HANSEN, J.E. y SATO, M., 2011. Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change. *Climate Change* [en línea], pp. 1-25. DOI http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-0973-1_2. Disponible en: <http://tinyurl.com/y9o6yc3a>.

HARRISE, H., 1892. *The discovery of North America* [en línea]. London: Stevens and son. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2027/coo1.ark:/13960/t2h710f6h>.

- HASHIM, E.T., JASSIM, S.S. y JBRAEL, S.J., 2013. تقييم كفاءة الخلية الشمسية لمتطلبات التخطيط الحضري لمنطقة الجادرية. *Al-Ma'mon College Journal* [en línea], vol. 0, no. 22, pp. 273-282. Disponible en: <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&ald=81630>.
- HUBBERT, M.K., 1956. Nuclear energy and the fossil fuels. *Shell Development Company. Exploration and Production Research Division* [en línea], vol. 95, pp. 80. Disponible en: <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf>.
- IONESCU, C., BARACU, T., VLAD, G.E., NECULA, H. y BADEA, A., 2015. The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 49, pp. 243-253. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2015.04.062. Disponible en: <http://tinyurl.com/y9ftzgx>.
- IPCC, 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [en línea]. Ginebra: Disponible en: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- KALDELLIS, J.K. y ZAFIRAKIS, D., 2011. The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy* [en línea], vol. 36, no. 7, pp. 1887-1901. ISSN 09601481. DOI 10.1016/j.renene.2011.01.002. Disponible en: <http://tinyurl.com/y7raxvk2>.
- KENT, D. V y MUTTONI, G., 2008. Equatorial convergence of India and early Cenozoic climate trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [en línea], vol. 105, no. 42, pp. 16065 LP-16070. DOI 10.1073/pnas.0805382105. Disponible en: <http://tinyurl.com/yapplv89>.
- LUND, J.W., BJELM, L., BLOOMQUIST, G. y MORTENSEN, A.K., 2008. Characteristics, development and utilization of geothermal resources - a Nordic perspective. *Episodes* [en línea], vol. 31, no. 1, pp. 140-147. ISSN 0276-1084. DOI 10.1007/978-3-540-75997-3_13. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/238784790_Characteristics_development_and_utilization_of_geothermal_resources_-_a_Nordic_perspective.

MARKWICK, P.J., 1998. Fossil crocodylians as indicators of Late Cretaceous and Cenozoic climates: implications for using palaeontological data in reconstructing palaeoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* [en línea], vol. 137, no. 3-4, pp. 205-271. DOI [https://vpnuc.unican.es/10.1016/DanaInfo=doi.org,SSL+S0031-0182\(97\)00108-9](https://vpnuc.unican.es/10.1016/DanaInfo=doi.org,SSL+S0031-0182(97)00108-9). Disponible en: <http://tinyurl.com/yaevgqxw>.

MINISTERIO DE AGRICULTURA PESCA Y ALIMENTACIÓN, 2016. Principales elementos del Acuerdo de París. [en línea], pp. 1-4. Disponible en: <https://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/elmentos-acuerdo-paris.aspx>.

MULLER, R., 2010. *Physics and technology for future presidents: an introduction to the essential physics every world leader needs to know*. S.I.: Princeton University Press. ISBN 0691135045.

NACIONES UNIDAS, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas Contra el Cambio Climático. [en línea]. S.I.: [Consulta: 4 febrero 2019]. Disponible en: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf.

NASA, 2019. Graphic: The relentless rise of carbon dioxide. *Explore* [en línea]. [Consulta: 5 febrero 2019]. Disponible en: https://climate.nasa.gov/climate_resources/24/graphic-the-relentless-rise-of-carbon-dioxide/.

NESS, G.D., 2004. Population Growth and Energy. *Encyclopedia of Energy* [en línea]. S.I.: Elsevier, pp. 107-116. ISBN 978-0-12-176480-7. Disponible en: <http://tinyurl.com/yallftan>.

- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, 2018. Boletín sobre los gases de efecto invernadero. [en línea]. Ginebra: Disponible en: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=6887#.XFh49S2ZNE4.
- OWEN, N.A., INDERWILDI, O.R. y KING, D.A., 2010. The status of conventional world oil reserves-Hype or cause for concern? *Energy Policy* [en línea], vol. 38, no. 8, pp. 4743-4749. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2010.02.026. Disponible en: <http://tinyurl.com/ycxn9e8v>.
- PASQUALETTI, M.J., RIGHTER, R. y GIPE, P., 2004. Wind Energy, History of. *Encyclopedia of Energy* [en línea]. S.I.: Elsevier, pp. 419-433. ISBN 978-0-12-176480-7. Disponible en: <http://tinyurl.com/ycwbwtuf>.
- PERIMAN, R.D., 2004. Early Industrial World, Energy Flow in. *Encyclopedia of Energy* [en línea]. S.I.: Elsevier, pp. 849-858. ISBN 978-0-12-176480-7. Disponible en: <http://tinyurl.com/ybl3thqm>.
- PERLIN, J., 2004. Solar Energy, History of. *Encyclopedia of Energy* [en línea]. S.I.: Elsevier, pp. 607-622. ISBN 978-0-12-176480-7. Disponible en: <http://tinyurl.com/y8f53yzf>.
- RITCHIE, H., 2017. How long before we run out of fossil fuels? *Our World in Data* [en línea], pp. 4-7. Disponible en: <https://ourworldindata.org/how-long-before-we-run-out-of-fossil-fuels>.
- RITCHIE, H. y ROSER, M., 2019. Energy Production & Changing Energy Sources. *Our World in Data* [en línea], Disponible en: <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>.
- ROMERA, B.M., 2016. The Paris agreement and the Regulation of International Bunker Fuels. *Review of European, Comparative and International Environmental Law* [en línea], vol. 25, no. 2, pp. 215-227. ISSN 20500394. DOI 10.1111/reel.12170. Disponible en: <http://tinyurl.com/y92l75h4>.

- SCOTESE, C.R. y PARRISH, J.T., 2004. A Continental Drift Flipbook. *Journal of Geology* [en línea], vol. 112, no. 6, pp. 729-741. DOI 10.1086/424867. Disponible en: <http://tinyurl.com/ycotf6lm>.
- SEO, S.N., 2017. Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions. *Regional Science Policy & Practice* [en línea], vol. 9, no. 2, pp. 121-140. ISSN 1757-7802. DOI <http://dx.doi.org/10.1111/rsp3.12090>. Disponible en: <http://tinyurl.com/ycavj84d>.
- TIAN, L. y QIN, Y., 2007. Utilization of renewable energy in architectural design. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China* [en línea], vol. 1, no. 1, pp. 114-122. ISSN 16737407. DOI 10.1007/s11709-007-0012-4. Disponible en: <http://tinyurl.com/ydyf368j>.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2019. History of WMO. *About Us* [en línea]. [Consulta: 3 febrero 2019]. Disponible en: <https://public.wmo.int/en/about-us/who-we-are/history-of-wmo>.
- WRANGHAM, R. y CARMODY, R., 2010. Human Adaptation to the Control of Fire. *Evolutionary Anthropology* [en línea], vol. 19, no. 4, pp. 187-199. ISSN 0954-3007. DOI 10.1002/evan.20275. Disponible en: <http://tinyurl.com/y7znn5rq>.
- ZOU, C., ZHAO, Q., ZHANG, G. y XIONG, B., 2016. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. *Natural Gas Industry B* [en línea], vol. 3, no. 1, pp. 1-11. ISSN 10000976. DOI 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.01.001. Disponible en: <https://vpnuc.unican.es/science/article/pii/S2352854016300109#fig3>.

Se ha utilizado el estilo ISO: 690 para las referencias bibliográficas. Todos los enlaces de acceso en línea son de carácter permanente y han sido consultados exitosamente por última vez el 7 de febrero de 2019.

AVISO:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado, así como el profesor tutor/director, no son responsables del contenido último de este Trabajo.

Antes de imprimir este documento, pregúntese si realmente necesita una copia en papel. Por favor, tenga en cuenta su responsabilidad ambiental.