

MÁSTER UNIVERSITARIO EN NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

ELECTRIFICACIÓN DE BUQUES

Alumno	LÓPEZ UBIRIA, JESÚS M ^a
Director	ARRIBALZAGA AURRE, JOSU
Departamento	
Curso académico	2020/2021

Bilbao 1 de Junio de 2021

RESUMEN

Este trabajo trata de exponer objetivamente la gravedad de la contaminación atmosférica, la contribución del transporte marítimo a la misma y la consiguiente necesidad de abandonar el uso de los combustibles fósiles por parte del sector marítimo.

Por otra parte, pretende demostrar que la solución pasa por la implantación progresiva de buques eléctricos y que disponemos de la tecnología necesaria para construirlos e incluso para transformar en híbridos los que navegan en la actualidad. Con este objetivo se realiza un estudio sobre las ventajas de los motores eléctricos, así como las capacidades de los actuales sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Por último, se muestra el proyecto de electrificación de una embarcación de pesca local.

LABURPENA

Lan honen bidez kutsadura atmosferikoaren larritasuna, itsas garraioak hortan duen erantzunkizuna eta beraz itsasgintzak erregai fosilak bertan behera uzteko duen beharra adierazi nahi da.

Bestalde, itsasontzi elektrikoak ezartzea dela irtenbidea azaleratzen da, gaur egun helburu hori lortzeko teknologia badugula adieraziz. Itsaontzi berriak gustiz elektrikoak egin daitezke eta orain bertan nabigatzen ari direnak hibridoak bihurtu. Helburu honekin, motor elektrikoak dituzten abantailak eta elektrizitatea gordetzeko dauden sistema ezberdinak aztertzen dira. Kostaldeko arrantza-ontzi bat elektrifikatzeko proiektua ere azaltzen da.

ABSTRACT

This work tries to objectively expose the severity of air pollution, the contribution of maritime transport to it and the consequent need to abandon the use of fossil fuels by the maritime sector. On the other hand, it is intended to demonstrate that the solution involves the progressive implementation of electric ships and that we have technology to build them and even to transform those currently sailing into hybrids. With this objective in mind, a study is carried out on the advantages of electric motors as well as the capacities of current electrical energy storage systems. The electrification project of a coastal fishing boat is also shown.

Palabras clave

Calentamiento global, gases de efecto invernadero, balance energético, contaminantes atmosféricos, punto de no retorno, inducción electromagnética, sincronismo, reluctancia variable, autonomía, ion-litio, densidad energética, eficiencia energética, retorno energético, hidrógeno, celdas de combustible.

ÍNDICE

RESUMEN	1
LISTA DE FIGURAS.....	2
LISTA DE TABLAS.....	11
LISTA DE ACRÓNIMOS	12
CONTEXTO	14
OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1ª PARTE	19
1. CALENTAMIENTO GLOBAL, CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO	20
1.1. INCIDENCIA DEL TRANSPORTE MARÍTIMO EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	23
1.2. LEGISLACIÓN.....	24
2ª PARTE	28
2. MOTORES ELÉCTRICOS Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	29
2.1. MOTORES ELÉCTRICOS	29
2.2. BATERÍAS E HIDRÓGENO	31
2.2.1. BATERÍAS VS GASÓLEO.....	31
2.2.2. HIDRÓGENO VS GASÓLEO	35
2.2.2.1. Ventajas	35
2.2.2.2. Desventajas	35
2.2.3. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	35
2.2.4. CELDAS DE HIDRÓGENO VS BATERÍAS DE LITIO.....	37
3ª PARTE	38
3. PROYECTO DE ELECTRIFICACIÓN DEL PESQUERO “MANUELAK”	39
3.1. CONTEXTO	39
3.2. MANIOBRABILIDAD	41
3.3. EFICIENCIA.....	42
3.3.1. CÁLCULO DE ENERGÍA ÚTIL Y CONSUMO REAL.....	42
3.3.1.1. Maniobra de virada	42
3.3.1.2. Maniobra de largada	43
3.3.2. CONSUMO TEÓRICO CON UN SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA	43
3.3.2.1. Maniobra de virada	43
3.3.2.2. Maniobra de largada	43
3.4. SISTEMA DE PROPULSIÓN PROPUESTO	45
3.4.1. MOTOR.....	45
3.4.2. BATERÍAS.....	45
3.4.2.1. Capacidad proyectada	45
3.4.2.2. Disposición	47
3.5. RENTABILIDAD	50
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXO I.....	61
1. CALENTAMIENTO GLOBAL Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	62
1.1. BALANCE ENERGÉTICO DE LA TIERRA Y EFECTO INVERNADERO	62
1.1.1. EFECTO INVERNADERO.....	64

1.1.1.1. Gases de efecto invernadero (GEI)	66
1.1.2. MECANISMO DEL EFECTO INVERNADERO	73
1.1.3. BALANCE ENERGÉTICO DE LA TIERRA	74
1.2. CALENTAMIENTO GLOBAL Y EMISIONES ANTRÓPICAS	77
1.3. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	91
1.3.1. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	91
1.3.1.1. Monóxido de Carbono (CO)	91
1.1.1.1. Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	92
1.1.1.2. Dióxido de Azufre (SO ₂)	92
1.1.1.3. Ozono troposférico (O ₃)	92
1.1.1.4. Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	92
1.1.1.5. Partículas en suspensión o aerosoles (PM _{2,5} y PM ₁₀)	93
ANEXO II	94
1. MOTORES ELÉCTRICOS, TIPOS Y FUNCIONAMIENTO	95
1.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA	95
1.1.1. MOTORES CC CON ESCOBILLAS	95
1.1.2. MOTORES CC SIN ESCOBILLAS (BLDC)	97
1.2. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA	101
1.2.1. MOTORES ASINCRONOS O DE INDUCCIÓN	101
1.2.2. MOTORES SÍNCRONOS	106
1.2.3. MOTORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES (PMSM)	108
1.2.3.1. MOTORES PMSM DE FLUJO AXIAL	110
1.2.4. MOTORES SÍNCRONOS DE RELUCTANCIA VARIABLE (SYNRM)	111
ANEXO III	117
1. BATERÍAS Y CELDAS DE COMBUSTIBLE	118
1.1. BATERÍAS	118
1.1.1. BATERÍAS DE ION-LITIO	120
1.1.1.1. Problemática de las celdas li-ion	124
1.1.2. NUEVAS TECNOLOGÍAS	127
1.1.2.1. Baterías de estado sólido	127
1.1.2.2. Baterías de litio-aire	128
1.1.2.3. Baterías de grafeno	128
1.2. CELDAS DE COMBUSTIBLE	129

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1** Consumo global de combustibles fósiles desde el comienzo de la industrialización hasta ahora. Vaclav Smil (2017). Energy Transitions: Global and National Perspectives. <http://vaclavsmil.com/2016/12/14/energy-transitions-global-and-national-perspectives-second-expanded-and-updated-edition/> 22
- Fig. 2** Densidad del tráfico marítimo en Europa. https://www.eldiario.es/opinion/tribuna-abierta/transporte-maritimo-contamina-miles-terrestre_129_1517031.html..... 23
- Fig. 3** Emisiones anuales de GEI en el equivalente a gigatoneladas de CO₂ por año (GtCO₂/año) entre 1970 y 2010. En marrón CO₂ proveniente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales, en rojo CO₂ proveniente de la silvicultura y otros usos del suelo, en azul claro metano, en azul oscuro óxido nítrico y en negro los gases fluorados. En 2010 se emitió una cantidad equivalente a 49 gigatoneladas de CO₂ de gases de efecto invernadero, 11 más que en 1990, es decir casi un 30% más, cuando se suponía que iban a descender un 5% en el 2012, cumpliendo el protocolo de Kyoto. http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20Synthesis%20Report/SPM/SPM.02_rev1-01.png..... 25
- Fig. 4** Curvas características de un motor semilento R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, *Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships*: Volume 194, 2017, Pages 30-54. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917301940> 32
- Fig. 5** Curvas características de motores rápidos. Fuente: Elaboración propia. 33
- Fig. 6** Mapa de consumo específico. X-engineer org *Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)*. Recuperado de <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/brake-specific-fuel-consumption-bsfc/> 34
- Fig. 7** Celda de combustible de Toyota con 67% de rendimiento. Toyota Europe. Recuperado de [Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265%20.pdf](https://toyota.com/press/2017/01/11/Toyota-Mirai-FCV-Posters_LR_tcm-11-564265.pdf) 37
- Fig. 8** Pesquero “Manuelak” en el puerto de Getaria. Imagen tomada por el autor. 39
- Fig. 9** Propulsor pod montado en la mecha del timón. Extraído de *Electric propulsión*. Recuperado de <https://fischerpanda.com/electric-propulsion/downloads-1/> 41
- Fig. 10** Aspecto y medidas de las baterías MGEH240200.MG Energy Systems 2021. *Downloads EH battery*. Recuperado de <https://downloads.mgennergysystems.eu/api/v1/resources/2dcaeb59-139c-4ee9-88bc-b7c054c2e0c7?inline=1> 49
- Fig. 11** Plano de disposición de los paquetes de baterías y el propulsor pod. Escala 1/40. 49
- Fig. 12** FP Electric Motor Pod AZ 50kw 120 rpm. Fischer Panda (2021). *Products* (imagen). Recuperado de https://elektrische-antriebssysteme.fischerpanda.de/wp-content/uploads/2020/11/Fischer_Panda_Electric_Motor_Pod_AZ_50kW_1200rpm.pdf 55

- Fig. 13** Datos técnicos de las baterías serie HE. MG Energy Systems 2021. *HE Series*. Recuperado de <https://downloads.mgennergysystems.eu/api/v1/resources/5f5addaa-9c31-4e53-a697-2b1cc49612f5?inline=1>56
- Fig. 14** Una esfera intercepta la misma cantidad de luz (radiación) que un disco del mismo diámetro. Recuperado de https://scied.ucar.edu/sites/default/files/images/long-content-page/solar_insolation_planet_sphere_disk63
- Fig. 15** Componentes de la atmósfera. Wikipedia (2018) Atmósfera terrestre. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera_terrestre#:~:text=Los%20principales%20gases%20que%20la,movimientos%20din%C3%A1micos%20est%C3%A1n%20estrechamente%20relacionados65
- Fig. 16** Absorción de las bandas de frecuencia por la atmósfera. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png66
- Fig. 17** Espectro electromagnético. Recuperado de <https://sites.google.com/site/chempendix/em-spectrum>67
- Fig. 18** Concentración de CO₂ en ppm, desde cientos de miles de años atrás hasta el 2015. Los datos históricos se han obtenido del análisis de los núcleos de hielo del Ártico y los más recientes de las estaciones que monitorizan el aire a lo largo del planeta. Las líneas de diferente color representan distintas fuentes de datos. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>68
- Fig. 19** Concentración de metano en partes por cada mil millones. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>69
- Fig. 20** Concentración de óxido nítrico en partes por cada mil millones. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>71
- Fig. 21** Concentración de varios gases halogenados en partes por billón. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>72
- Fig. 22** Contribución de cada GEI antrópico al efecto invernadero en 2015. Gráfico de elaboración propia realizado con los datos proporcionados por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA por sus siglas en inglés)73
- Fig. 23** Modelo esquemático del efecto invernadero. La lámina de vidrio es transparente frente a la radiación incidente por ser de onda más corta (radiación visible), pero absorbe la radiación reemitida por la superficie terrestre de onda más larga (radiación infrarroja). Fuente: elaboración propia.73
- Fig. 24** Balance energético de la tierra de Trenberth et al. 2009. The University Corporation for Atmospheric Research Center for Science Education, *Radiation budget* Recuperado de <https://scied.ucar.edu/radiation-budget-diagram-earth-atmosphere>75
- Fig. 25** Diagrama del balance energético actualizado por la NASA. *Earth Energy Budget*. Recuperado de https://science-edu.larc.nasa.gov/energy_budget77

- Fig. 26** Aumento de la ratio del calentamiento global en los últimos años. “*CLIMATE CHANGE 2007: The Physical Science Basis*” Recuperado de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/fig/faq-3-1-figure-1.jpeg 79
- Fig. 27** Diagrama realizado con distintas bases de datos grid : CRUTEM3 de la agencia meteorológica del Reino Unido, NCDC de la NOAA, GISS de la NASA y la creada por los científicos rusos Lugin et al. Se muestran las variaciones en las temperaturas medias anuales respecto a la temperatura global media entre 1961 y 1990. “*CLIMATE CHANGE 2007: The Physical Science Basis*” Recuperado de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/fig/figure3-1.jpeg 80
- Fig. 28** Predicción del calentamiento global para fin de siglo respecto de la temperatura media registrada entre 1986 y 2005. La línea marrón clara corresponde a la predicción media de 39 modelos utilizados suponiendo una concentración de CO₂ de 1.313 ppm para 2100 y la línea morada a la de 32 modelos que suponen una concentración de 475ppm (los distintos resultados de los modelos se representan por las zonas sombreadas). La línea negra corresponde a los registros observados y la zona sombreada en gris representa los resultados de 42 modelos utilizados. Recuperado de <https://scied.ucar.edu/sites/default/files/images/long-content-page/4.future.jpg>..... 81
- Fig. 29** Extensión superficial del hemisferio norte cubierta de nieve en marzo y abril, extensión del ártico en verano, variación del contenido calorífico medio de la capa superior (0-700m) relativa a 1970 y aumento del nivel medio del mar relativo al periodo 1900-1905. Las líneas de diferente color indican distintas fuentes de datos y las zonas sombreadas el margen de incertidumbre. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/SPM/FigSPM-03.jpg> 82
- Fig. 30** Diferencias en las temperaturas combinadas de las superficies oceánicas y continentales en el periodo 1850-2012 respecto de la temperatura media registrada durante los 30 años entre 1961 y 1990. <http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/SPM/FigSPM-01.jpg> 83
- Fig. 31** Comparación entre las anomalías observadas (líneas negras) y los máximos y mínimos obtenidos de las simulaciones realizadas con los modelos desarrollados por el IPCC (zonas sombreadas), donde se demuestra la capacidad de predicción de los modelos climáticos. Las anomalías en las temperaturas de la superficie están referenciadas al periodo entre 1880 y 1919, las correspondientes al contenido calorífico de los océanos están referenciadas al periodo entre 1960 y 1980 y las correspondientes a la superficie del casquete polar lo están al periodo entre 1979 y 1999. Las zonas sombreadas en rosa corresponden a modelos que tienen en cuenta las emisiones antropógenas, mientras que las sombreadas en azul no las tienen en cuenta. <http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/SPM/FigSPM-06.jpg> 84
- Fig. 32** Esta gráfica se ha extraído de la revista online de la NASA *Earth Observer*. Las diferencias de temperatura en este caso se dan respecto a la temperatura media del periodo

1951-1980, dado que los análisis de las temperaturas del programa GISS de la NASA comenzaron en 1980 y los 30 años más recientes correspondían a ese periodo (un intervalo de 30 años se considera suficiente para evitar el falseamiento de las lecturas debido a años extraordinariamente anómalos). Las diferencias anuales se muestran en base a los datos recogidos de forma independiente por la NASA, el NOAA, la MOHC británica y la JMA japonesa. Con alguna ligera variación, los 4 registros muestran picos y valles sincronizados entre sí. Todas muestran un calentamiento más rápido en las últimas décadas y todas muestran la última década como la más calurosa. Recuperado de https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/48000/48574/adjusted_annual_temperature_anomalies_eo.png.....85

Fig. 33 Cambios en la extensión de los casquetes polares respecto al periodo 1986-2005. La segunda mitad del siglo XX corresponde a los modelos CMIP5 del *World Climate Research Programme*, mientras que el siglo XXI está cubierto por los modelos del IPCC para los cuatro escenarios previstos. Las líneas muestran la media de los resultados arrojados por los modelos utilizados para cada escenario, cuyo número aparece en las leyendas de las esquinas izquierdas inferiores. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/Chapter%2012/Chapter%2012/Fig12-28.jpg>.....86

Fig. 34 La línea roja fina muestra los cambios de temperatura anuales mientras que la gruesa muestra la media en periodos de 11 años medidos por el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA. La línea azul fina muestra la variación anual de la radiación solar y la gruesa la media en periodos de 11 años. Los datos desde 1880 a 1978 fueron recogidos por Krivova et al 2007 y desde 1979 a 2015 por el Centro de Datos de Radiación Mundial perteneciente a la Organización Meteorológica Mundial. <https://skepticalscience.com/pics/TvsTSI.png>87

Fig. 35 La denominada “curva Keeling” muestra el rápido aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera desde que Keeling comenzó sus mediciones. Las ondulaciones de la línea roja indican el ciclo estacional, mientras que la línea negra pasa por las concentraciones medias de CO₂. Solamente desde 1958 hasta 2016 ha aumentado en 85 ppm. <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/styles/medium/public/2016-07/keelingcurve-large.png>.....88

Fig. 36 Relación evidente entre el aumento de CO₂ en la atmósfera (en la gráfica se ha eliminado el ciclo anual) y el calentamiento global. <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/page5.php>89

Fig. 37 Concentraciones en la atmósfera de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso desde el año 0 hasta el comienzo de la industrialización (izquierda) y desde el comienzo de la misma hasta el presente (derecha). Los puntos de color representan las concentraciones determinadas mediante el estudio de núcleos de hielo, mientras que las líneas azules representan las determinadas por mediciones directas en el observatorio de Cape Grim. <http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/Chapter%2006/Chapter%2006/Fig6-11.jpg>.....90

- Fig. 38** Motor CC elemental. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAtpHANEfQo&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=3&t=15s> 95
- Fig. 39** Motor CC con el núcleo de hierro en el rotor . Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAtpHANEfQo&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=3&t=15s> 96
- Fig. 40** Estátor motor CC. . Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAtpHANEfQo&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=3&t=15s> 96
- Fig. 41** Motor CC sin carcasa. . Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAtpHANEfQo&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=3&t=15s> 97
- Fig. 42** Rotor exterior. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4> 97
- Fig. 43** Rotor exterior y estátor interior. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4> 97
- Fig. 44** Bobinados. Lesics Engineers PVT LTD. 2021 *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4> 98
- Fig. 45** Atracción entre los polos. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4> 98
- Fig. 46** Flujo magnético en el bobinado “A” Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4> 98
- Fig. 47** Polos del rotor siguiendo a los polos del bobinado “A”. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4> 98
- Fig. 48** Secuencia de alimentación de las bobinas del estátor Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it Works* (vídeo). Recuperado de *Brushless DC Motor, how it works?* (imagen). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4> 99
- Fig. 49** Fuerzas de atracción y repulsión entre los polos de los imanes permanentes y los polos de los bobinados Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?*

(vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4>100

Fig. 50 Control electrónico. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4>100

Fig. 51 Patente del motor de inducción de Nikola Tesla. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Patentes_de_Tesla102

Fig. 52 Campo rotatorio creado por una corriente alterna atravesando 3 conductores conectados en estrella. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=9&t=110s>103

Fig. 53 Fuerzas tangenciales creadas por el campo estatórico en la jala del rotor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=9&t=110s>104

Fig. 54 Estátor de un motor de inducción. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=9&t=110s>104

Fig. 55 Motor de inducción de Tesla, Inc. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=3s>104

Fig. 56 Un disco de los que está formado el rotor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=9&t=110s>105

Fig. 57 Rotor macizo con todos los discos montados. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=9&t=110s>105

Fig. 58 Corrientes inducidas en el motor del Tesla Model 3. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=3s>106

Fig. 59 Motor síncrono. Ali, Zahid. *Types of Synchronous Motor*. Recuperado de <https://www.theengineeringknowledge.com/types-of-synchronous-motor/>106

Fig. 60 Campo rotórico y sus polos alineados con los polos del estátor Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Working of Synchronous Motor* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZlHs&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=8&t=2s>106

- Fig. 61** Montaje jaula de ardilla. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Working of Synchronous Motor* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZIhs&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=8&t=2s> 107
- Fig. 62** Montaje del rotor en el estátor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Working of Synchronous Motor* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZIhs&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=8&t=2s> 107
- Fig. 63** Motor PMSM. *How a car works. Electric car.* Recuperado de <https://www.newkidscar.com/electric-car/permanent-magnet-synchronous-motor-construction/> 108
- Fig. 64** Rotor SPMSM a la izq. y IPMSM a la der. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12> 109
- Fig. 65** Construcción de los rotores SPMSM y IPMSM. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12> 109
- Fig. 66** Rotor exterior. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12>..... 110
- Fig. 67** Motor PMSM de flujo axial con rotor interior Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12> 110
- Fig. 68** Motor PMSM de flujo axial con rotor exterior dividido en dos. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12> 110
- Fig. 69** Clavo absorbiendo las líneas de flujo, convertido en imán temporal. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s> 111
- Fig. 70** Fuerza de reluctancia en una barra de hierro dentro de un campo magnético. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s> 111
- Fig. 71** Barra de hierro en el seno de un campo magnético giratorio. . Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s> 112

- Fig. 72** Ángulo de carga. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>112
- Fig. 73** Controlador de ángulo de carga. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>112
- Fig. 74** 2 barras a 90°. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>113
- Fig. 75** Rotor con reluctancia variable a la izq. y con reluctancia invariable a la der. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>.....113
- Fig. 76** Simulación informática de las líneas de flujo magnético a través del rotor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>.....113
- Fig. 77** Rotor diseñado teniendo en cuenta las líneas de flujo. Simulación informática de las líneas de flujo magnético a través del rotor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>114
- Fig. 78** Posición de reluctancia mínima a la izq. y máxima a la derecha. Rotor con reluctancia variable a la izq. y con reluctancia invariable a la der. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM | A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>114
- Fig. 79** Fabricación del rotor mediante discos a la izq. y mediante capas superpuestas de material ferromagnético y no ferromagnético a la derecha. El montaje de la derecha es más eficiente pero menos práctico. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>114
- Fig. 80** Motor Syn RM de ABB. ABB, LTD. *Start saving energy with ABB's IE5 SynRM motors* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=3g9IDqkCP3g&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=2&t=55s>.....115
- Fig. 81** Nuevo motor IPMSynRM de Tesla. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=3s>115
- Fig. 82** Motores IPMSynRM de Tesla y Toyota. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=3s>116
- Fig. 83** Serie electroquímica. VCE Chemistry 2021. *Spontaneous Reactions*. Recuperado de <https://chemistryvce.weebly.com/spontaneous-reactions.html>118

- Fig. 84** Batería de plomo-ácido. Studentlesson 2021. *Understanding battery used in automobiles*. Recuperado de <https://studentlesson.com/automotive-battery-definition-functions-components-diagram-working/>..... 119
- Fig. 85** Densidad energética de distintas clases de celdas. Sinovoltaics Group 2021. *Energy density and specific energy of battery*. Recuperado de <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/energy-density-and-specific-energy-of-battery/>..... 120
- Fig.86** Celda de ion-litio descargada. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?(video)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>..... 120
- Fig.87** Celda de ion-litio en carga. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?(video)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>..... 121
- Fig. 88** Celda de ion litio a punto de descargarse del todo. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?(video)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>..... 121
- Fig. 89** Compuesto de intercalación adherido a la lámina de cobre (izq) y oxido de litio y cobalto a la de aluminio (der). Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?(video)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>..... 121
- Fig. 90** Distintos tipos de baterías de ion litio. Curious Elephant. *Tesla Battery, How does it Work? (vídeo)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=9fCRWOa9gQk&list=PLV-PtkGwDV8givqNn2aj2ig761gtfE6A2&index=2&t=55s> 122
- Fig.91** Celda individual. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?(video)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s> 122
- Fig. 92** Paquete de celdas y sistema de refrigeración (izq). Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?(video)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>..... 123
- Fig. 93** Batería estructural de Tesla con celdas 46800. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?(video)* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>..... 123
- Fig. 94** Curva de degradación Hosen, Md Sazzad et al. *iScience*, Volume 24, Issue 2, 102060 Recuperado de [https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042\(21\)00028-6.pdf](https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042(21)00028-6.pdf)..... 125
- Fig. 95** Formación de dendritas con carga normal o pulsada. Hosen, Md Sazzad et al. *iScience*, Volume 24, Issue 2, 102060 Recuperado de [https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042\(21\)00028-6.pdf](https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042(21)00028-6.pdf) 125
- Fig. 96** Celda de combustible de hidrógeno de Intelligent Energy. Intelligent Energy (2021). *Product Cataloge*. Recuperado de <https://www.intelligent-energy.com/our-products/> ... 129
- Fig. 97** Funcionamiento celda de combustible Quora (2021). *Why do all of the fuel cell cars use PEMFC in combination with a hydrogen tank?* Recuperado de

<https://www.quora.com/Why-do-all-of-the-fuel-cell-cars-use-PEMFC-in-combination-with-a-hydrogen-tank>129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Datos tomados del libro de estabilidad del “Manuelak”40

Tabla 2 Los consumos, la velocidad y la carga se han medido a bordo del “Manuelak”. Los kw obtenidos para cada régimen se han calculado utilizando las curvas de potencia que aparecen en la documentación del motor. Estas curvas se obtienen a plena carga, por lo que los valores para cada régimen se han multiplicado por el porcentaje de la carga del motor. La carga del motor se corresponde con el recorrido de la cremallera, siendo máxima cuando la cremallera está totalmente metida.40

Tabla 3 Eficiencia del motor para cada régimen de giro.....42

Tabla 4 Datos de consumos estimados durante la navegación y durante la maniobra, cuando el motor gira a régimen de ralentí.43

Tabla 5 Consumos teóricos con un sistema de propulsión eléctrico.....44

Tabla 6 Pesos y momentos obtenidos del libro de estabilidad.....46

Tabla 7 Balance de pesos47

Tabla 8 KG en rosca y con plena carga después de instalar las baterías y el propulsor pod.48

Tabla 9 CAPEX propulsión eléctrica vs CAPEX propulsión tradicional.51

Tabla 10 Costos operacionales de los dos sistemas, en el primer caso contando con gasoil subvencionado, en el segundo sin subvencionar y en el tercero subvencionando la electricidad en lugar del gasoil.....52

Tabla 11 Años hasta amortizar los gastos de adquisición.....53

Tabla 12 Gastos de mantenimiento54

LISTA DE ACRÓNIMOS

- AC/CA Alternating Current/Corriente alterna
- BLDC Brushless Direct Current
- CAPEX Capital Expenditures
- CERES Clouds and the Earth's Radiant Energy System
- CFC Clorofluorocarburos
- DC/CC Direct Current/Corriente Continua
- ECA Emission Control Area
- EEA/AEMA European Environment Agency/Agencia Europea de Medio Ambiente
- EPA United States Environmental Protection Agency (EEUU)
- ERBE Earth Radiation Budget Experiment
- GAW Global Atmosphere Watch (dependiente de la WMO)
- GDPFS Global Data-Processing and Forecasting System (dependiente de la WMO)
- GECOS Global Climate Observing System (dependiente de la WMO)
- GEI Gases de Efecto Invernadero
- GWP Global warming potential
- HFC Hidrofluorocarburos
- ICE Internal Combustion Engine
- IMO/OMI International Maritime Organization/Organización Marítima Internacional
- IMSynRM Internal Magnet Synchronous Reluctant Motor
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change/Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
- IPMSM Internal Permanent Magnet Synchronous Motor
- JMA Japan Meteorological Agency
- LCO Óxido de Litio y Cobalto
- MARPOL Maritime pollution
- MOHC Met Office Hadley Centre (UK)
- NASA National Aeronautics and Space Administration (EEUU)
- NCA Níquel-Cobalto-Aluminio
- NCAR National Center for Atmospheric Research (EEUU)
- NCDC National Climatic Data Center (dependiente de la NOAA)
- NECA NO_x Emission Control Area
- NMC Níquel-Manganeso-Cobalto
- NMVOC/COVDM Non Methane Volatile Organic Compound/Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos al Metano
- NOAA National Ocean and Atmospheric Agency (EEUU)
- OPEX Operational Expenditures
- PFC Perfluorocarburos
- PM/MPParticulate Matter/ Materia particulada
- PMSM Permanent Magnet Synchronous Motor
- SECA Sulphur Emission Control Area
- SM Synchronous Motor
- SMPS Switch Mode Power Suplay
- SPMSM Surface Permanent Magnet Synchronous Motor

- **SORCE** Solar Radiation and Climate Experiment
- **SynRM** Synchronous Reluctant Motor
- **UCAR** University Corporation for Atmospheric Research (EEUU)
- **UNEP/PNUMA** United Nations Environment Programme/Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente
- **UNO/ONU** United Nations Organization/Organización de las Naciones Unidas
- **UV** Ultravioleta
- **VOC/COV** Volatile Organic Compound/Compuestos Orgánicos Volátiles
- **WHO/OMS** World Health Organization/Organización Mundial de la Salud
- **WMO/OMM** World Meteorological Organization/Organización Meteorológica Mundial

CONTEXTO

El presente trabajo se enmarca en la emergencia climática que vivimos en la actualidad y el papel que el transporte marítimo juega en la misma. La industrialización del último siglo y medio nos ha traído grandes comodidades y riqueza, pero a un precio demasiado alto. Tal industrialización y desarrollo no hubiera sido posible sin el transporte marítimo, base de toda la economía a escala mundial. Siendo un sector que depende totalmente de los combustibles fósiles, cuya quema es la principal causante de la crisis climática, este trabajo se centra en las alternativas que tenemos para propulsar los buques de una forma sostenible.

OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

Como ya se ha adelantado en el resumen, son dos los objetivos principales de este trabajo. Por un lado, alertar sobre la gravedad del calentamiento global que estamos padeciendo y sobre sus causas. Para ello en la primera parte y su anexo se muestran los argumentos científicos que nos llevan a concluir que efectivamente estamos ante una emergencia climática y que la principal causa es la quema masiva de combustibles fósiles.

Por otra parte, se pretende mostrar el camino para paliar esta crisis climática, al menos en lo que respecta al transporte marítimo. Este camino está al alcance de nuestra mano, a un costo extremadamente bajo, en relación a la magnitud del problema que se quiere solucionar y pasa por la electrificación paulatina de todos los buques.

Sólo existen razones económicas, que únicamente afectan a las grandes corporaciones, para no dar el paso. Como se muestra en el segundo y tercer capítulo, el estado del arte en cuanto a sistemas eléctricos para propulsar los buques es suficiente para comenzar ya mismo con esta transición.

Es totalmente incomprensible que en las escuelas náuticas no sólo no se priorice, sino que ni siquiera se tenga en cuenta, el estudio de sistemas de propulsión puramente eléctricos, cuando, independientemente de la crisis climática, estos pueden ser mucho más efectivos.

Lo expuesto en este trabajo no sólo debería llegar a los sectores económicos y legislativos, sino principalmente a la docencia, puesto que, si no preparamos profesionalmente a las nuevas generaciones para la electrificación de los buques y seguimos instruyéndolos en la fabricación y mantenimiento de motores contaminantes, será muy difícil superar esta crisis que, dicho sea de paso, va a ser la mayor en toda la historia de la humanidad.

INTRODUCCIÓN

Pese a que el transporte marítimo es el más eficiente en cuanto a consumo de combustible por tonelada transportada, también es el sector que más toneladas mueve, por lo que tiene una gran incidencia en la contaminación atmosférica. Las emisiones de los buques aumentan continuamente y se prevé que en el futuro aumenten aún más debido al crecimiento del mercado a escala mundial. En Europa, en 2007, el 15% de las emisiones globales de NO_x provenían de los buques, así como el 10% de las emisiones de SO_x y casi el 3% de las emisiones de CO₂¹.

Según la Agencia Europea del Medio Ambiente, desde 1998 a 2008 estas emisiones han aumentado un 48% y en 2017 el transporte marítimo ya era el responsable del 16% de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por todos los medios de transporte, siendo el único sector, junto a la aviación, que sigue aumentando sus emisiones desde 1990. Este organismo estima que para 2050 el 40% de las emisiones mundiales de CO₂ provengan del transporte marítimo y aéreo.

Conviene señalar que, a diferencia de la aviación, el transporte marítimo consume principalmente fuel pesado (combustible fósil de muy baja calidad), que es el residuo obtenido del crudo una vez extraídos el resto de los productos derivados del mismo, incluidos la gasolina y el gasoil. El fuel pesado es mucho más contaminante que el resto de los combustibles derivados del petróleo, por su alto contenido en azufre. Aunque en la primera década del s. XXI Europa había conseguido reducir en un 54% las emisiones de SO_x en tierra, resulta decepcionante que ahora estas emisiones hayan vuelto a subir por el aumento del tráfico marítimo. Este se concentra en las zonas costeras, donde se realizan las maniobras de aproximación y de salida de los puertos, que son las que producen mayores emisiones. En la costa sur del Mar del Norte y en la que bordea el Canal de la Mancha, el 24% de las emisiones de óxidos de azufre proviene de los buques, siempre según la AEMA.

Hay que tener en cuenta que la contaminación atmosférica es una de las más graves para el planeta, puesto que la atmósfera no tiene la capacidad de regeneración que tienen los océanos o la superficie terrestre. Tanto es así que la comunidad científica internacional no deja de advertir de lo cerca que estamos de alcanzar el punto de no retorno. Estamos aproximándonos peligrosamente a un punto en el que será demasiado tarde para revertir la contaminación de la atmósfera y evitar un efecto invernadero descontrolado, con el consiguiente calentamiento global y subida del nivel medio de los mares.

Por todo esto nos urge actuar y en este contexto el sector marítimo, dado su alcance global y su papel histórico en promulgar normas internacionales, así como por su propia contribución al cambio climático, ha de liderar el camino hacia el fin de la dependencia energética de los combustibles fósiles. Es esencial que la flota internacional de buques dedicados al mercado marítimo inicie una transición hacia la propulsión puramente eléctrica, tal y como está sucediendo en el mundo de la automoción. Naturalmente, la electrificación tanto de los buques

¹ Viana, M., Hammingh, P., Coltte, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Vlieger, I., van Aardenne, J. (2014). Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, 90, 96-105. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.046

como de los vehículos terrestres ha de venir acompañada de una producción de electricidad sostenible, prescindiendo de las centrales térmicas dependientes de combustibles fósiles.

Llevamos más de un siglo desarrollando y mejorando los motores de combustión, tanto para generación de electricidad como para el transporte, realizando inversiones astronómicas para tratar de aumentar su rendimiento y reducir las emisiones contaminantes. La realidad es que ya no podemos aumentar más su eficiencia, puesto que prácticamente hemos alcanzado el límite teórico². Y por lo que respecta a las emisiones, podemos eliminar un porcentaje relativamente alto del monóxido de carbono y de los óxidos de nitrógeno mediante el uso de catalizadores, pero no podemos hacer nada con el dióxido de carbono, que junto al agua es el producto principal de la combustión. Seguimos inyectando una cantidad masiva de CO₂ a la atmósfera que antes no estaba, puesto que es de origen fósil, de manera que la concentración actual de CO₂ en la atmósfera es la más alta de los últimos 2 millones de años según la ONU.

Por otro lado, los motores eléctricos, además de no contaminar durante su funcionamiento y ser mucho más eficientes, poseen otra serie de ventajas respecto a los de combustión interna que los hace muy superiores a la hora de propulsar cualquier tipo de vehículo, incluidos los buques. Esto último no es desconocido por las grandes navieras y la mayor parte de los buques mercantes construidos hoy día son de propulsión diésel-eléctrica, lo que significa que las hélices son accionadas por motores eléctricos, mucho más adecuados para tal fin, aunque la electricidad con que se alimentan sea generada por motores diésel o turbinas de gas. Este tipo de propulsión facilita la transición futura hacia buques totalmente eléctricos, puesto que sólo nos quedaría instalar un sistema de almacenaje de energía eléctrica, que sustituyese los grandes motores de combustión.

Todavía no disponemos de baterías que ofrezcan tal capacidad, pero con la tecnología actual sí que podemos fabricar celdas de combustible capaces de sustituirlos, que funcionan con hidrógeno y que sólo emiten vapor de agua. Ocurre que es más barato extraer la energía de los combustibles fósiles que del hidrógeno.

De todas formas, la capacidad de las baterías actuales es suficiente para recorridos cortos, por lo que es totalmente factible la adición de paquetes de baterías a los buques con propulsión diésel-eléctrica y convertirlos en híbridos, de manera que la salida y entrada de los puertos, donde precisamente mayor contaminación se produce, se hicieran en modo exclusivamente eléctrico.

También hay que tener en cuenta que apenas llevamos una década investigando seriamente en sistemas de almacenaje de energía eléctrica, aun así, con la tecnología actual, ya es posible construir buques 100% eléctricos que en distancias cortas superan en prestaciones y costos de mantenimiento a los buques tradicionales.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, este trabajo pretende exponer tanto la necesidad como la viabilidad de la implantación de buques eléctricos en el transporte marítimo.

Para ello el trabajo se ha dividido en 3 partes. En la primera se aborda la emergencia climática y la influencia del transporte marítimo en la misma. En el Anexo I, complementando esta parte, se explica el mecanismo del calentamiento global.

² López, J.M. (2017). *Eficiencia de los motores de combustión interna* (Trabajo de Fin de Grado no publicado). EHU, País Vasco.

En la segunda parte se analizan las ventajas de los motores eléctricos frente a los de combustión y se comparan los dos sistemas de almacenamiento de energía usados para alimentar dichos motores; las baterías y el hidrógeno, enfrentándolos a los combustibles fósiles. A esta segunda parte corresponden los anexos II y III, donde se describe el estado del arte de los motores eléctricos y las baterías respectivamente.

En la tercera parte se muestra un proyecto real sobre la electrificación de una embarcación de pesca local.

El trabajo se completa con las conclusiones realizadas por el autor y una bibliografía donde consta el material consultado, así como diferentes publicaciones que puedan servir para ahondar más en los temas tratados a quien tenga un mayor interés.

1^a PARTE

1. CALENTAMIENTO GLOBAL, CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

Resulta incomprensible que aun hoy día una gran parte de la sociedad siga considerando que el calentamiento global y consiguiente cambio climático se deban a causas naturales o que simplemente son una invención. Es muy cómodo pensar que no existen o que no lo estamos causando nosotros. Sin embargo, el calentamiento global es ya un hecho aceptado por los 194 países miembros de la ONU y las evidencias de que se debe a las actividades humanas, principalmente a las emisiones provocadas por la masiva utilización de combustibles fósiles, son abrumadoras. Es cierto que cuando se comenzó a investigar seriamente a finales de los años 70 del siglo pasado, era muy fácil cuestionar los estudios que sugerían una conexión entre las emisiones antrópicas y el calentamiento global. Los datos de los que se disponía no eran tan abundantes como ahora y se podían interpretar de varias formas, además no se había llegado al nivel de conocimiento que tenemos ahora sobre el clima. Hoy día en cambio, recién estrenada la segunda década del siglo XXI, la Tierra está totalmente monitorizada; hay centenares de satélites equipados con instrumentos de última generación que transmiten diversos parámetros del Sol y la Tierra continuamente, estaciones y buques repartidos por todo el mundo que realizan toda clase de mediciones y una colaboración internacional sin precedentes entre científicos expertos en una gran variedad de disciplinas relacionadas con el clima y con acceso a todos estos datos. Por si todo esto fuera poco estamos en plena era del “big data”, en la que disponemos de ordenadores con una capacidad de procesamiento miles de veces mayor que los de entonces.

Lo cierto es que existe un consenso científico sobre el hecho de que estemos viviendo un calentamiento global producido por las emisiones antrópicas, como reflejan el 97% de los estudios publicados sobre el tema³, o el hecho de que la Organización Meteorológica Mundial y la Organización Mundial de la Salud lo corroboren.

También hay una parte muy minoritaria de científicos que cuestionan el calentamiento global antrópico, esto debe considerarse aceptable y normal, puesto que no existe la unanimidad de opiniones y tampoco sería saludable que aceptáramos cualquier teoría sin cuestionarla, pues esta actitud promueve la investigación y está en la base del método científico. Pero tenemos que ceñirnos a las evidencias.

Ciertos sectores de la política y la economía siguen negando que el calentamiento se deba a la actividad humana. Existe una corriente negacionista que tal y como ocurría en tiempos de Galileo o de Darwin se niega a aceptar las evidencias, donde no ve más que intereses ocultos y conspiraciones internacionales para engañar a la opinión pública.

Resulta irónico el argumento de los intereses ocultos detrás de quienes defienden el calentamiento global antrópico, cuando la gran mayoría de las medidas medioambientales son tumbadas por los lobbies industriales, energéticos y financieros, quienes argumentan, con evidente interés, que no se puede demostrar la influencia humana en el calentamiento global.

³ John Cook et al (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literatura. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024024. doi: 10.1088/1748-9326/8/2/024024

También es difícil de digerir que instituciones pertenecientes a los países más industrializados y contaminantes como la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (NOAA) del gobierno de los Estados Unidos, el Instituto de Asuntos Medioambientales de China, la Agencia Meteorológica de Japón o la más cercana Agencia Europea para el Medio Ambiente, debido a intereses ocultos, afirmen que el calentamiento global es consecuencia de la actividad humana debido.

Aun así, si se intenta buscar bibliografía científica que refute la influencia humana en el cambio climático, no hallamos más que artículos de opinión que no se apoyan en ningún estudio de rigor. Es curioso además que los argumentos utilizados siempre sean los mismos, la mayoría de ellos expuestos en el documental *“The Greenhouse Conspiracy”* de 1990 y posteriormente en *“The Great Global Warming Swindle”* de 2007 (una repetición del primero). Estos documentales, o al menos los argumentos que en ellos se muestran, parecen ser el decálogo de los negacionistas, aunque la mayor parte de dichos argumentos sean de los años 90 y estén desfasados. Muchos son erróneos y el resto o bien han sido refutados por investigaciones posteriores o bien no se han encontrado evidencias que los confirmen. A pesar de que varios de los científicos entrevistados demandaran a los productores por haber tergiversado sus palabras, parece que su mensaje, sobre todo en los países más industrializados, ha calado hondo.

Ante este panorama, uno de los objetivos principales del presente trabajo es la concienciación sobre la gravedad del calentamiento global y la necesidad de abandonar de una vez por todas el uso de combustibles fósiles. Este debe de ser el principal motivo por el que el sector marítimo debería iniciar una transición hacia el empleo de buques eléctricos, aunque también pueda suponer ventajas económicas y operacionales. Es importante demostrar de manera objetiva, mediante evidencias científicas, que el calentamiento global está causado por la quema de combustibles fósiles. De otra manera este trabajo carecería de argumentos suficientes para señalar la necesidad de utilizar buques eléctricos y naufragaría en la consecución de sus objetivos.

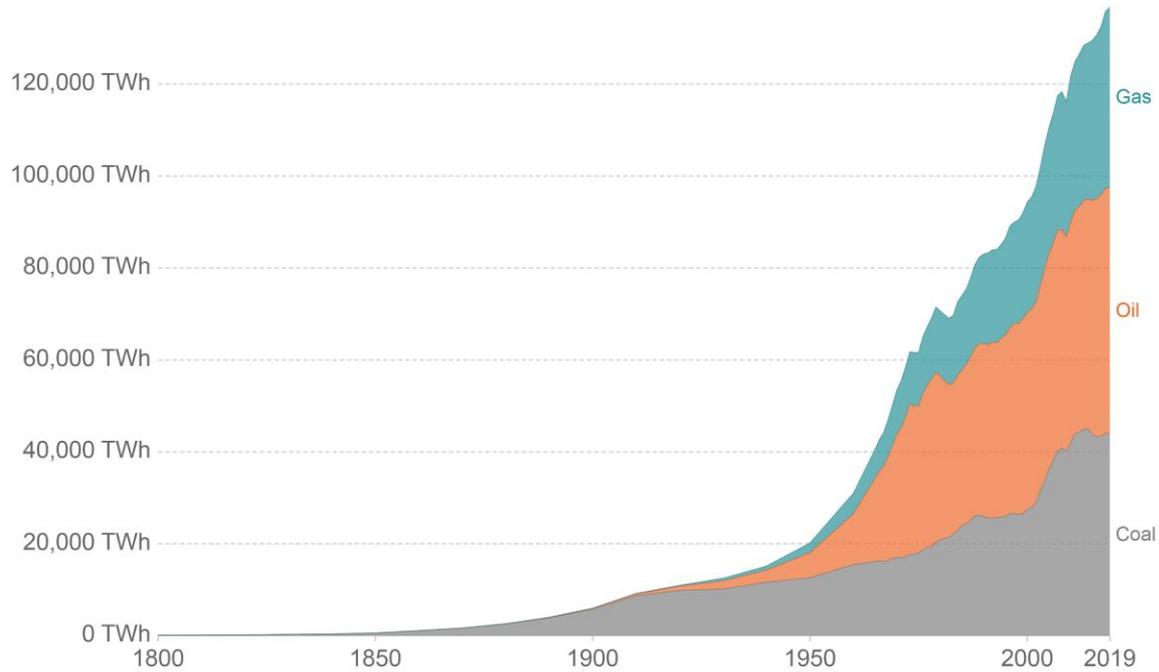
Por esa razón se ha añadido el Anexo I, donde se muestra de forma rigurosa cómo y por qué sabemos que estamos viviendo un calentamiento global y cuáles son sus causas. Todos los datos, conclusiones y predicciones que se muestran provienen de publicaciones científicas o pertenecientes a instituciones intergubernamentales. También se han utilizado publicaciones de las entidades estadounidenses UCAR, NOAA y NASA, por su reconocido prestigio y por pertenecer a un país altamente dependiente de los combustibles fósiles, que nunca ratificó el Protocolo de Kioto o el más reciente Acuerdo de París, lo que desmontaría cualquier argumento que pretenda sugerir un interés de dichas instituciones en establecer como causa y efecto la quema de combustibles fósiles y el calentamiento global.

La realidad es que la temperatura media de la Tierra ha subido casi 1,5°C desde la era preindustrial. Desde entonces hemos quemado tanto combustible que actualmente un tercio del dióxido de carbono que hay en la atmósfera es de origen antrópico; casi hemos triplicado la concentración del metano y doblado la de los ácidos nitrosos; hemos dañado el ozono “bueno” y aumentado el “malo” y por si fuera poco hemos creado nuevos gases, los halógenos, cuyo potencial de calentamiento y permanencia en la atmósfera es miles de veces superior a la del CO₂ o el CH₄.

En apenas un siglo hemos alterado un equilibrio de millones de años, durante los cuales la concentración de los gases de efecto invernadero se mantenía prácticamente constante y lo peor es que seguimos quemando cada vez más. Se ha consumido más combustibles fósiles en los últimos 30 años que en toda la historia de la Humanidad.

Global fossil fuel consumption

Global primary energy consumption by fossil fuel source, measured in terawatt-hours (TWh).



Source: Vaclav Smil (2017). Energy Transitions: Global and National Perspective & BP Statistical Review of World Energy
OurWorldInData.org/fossil-fuels/ • CC BY

Fig. 1 Consumo global de combustibles fósiles desde el comienzo de la industrialización hasta ahora. Vaclav Smil (2017). Energy Transitions: Global and National Perspectives. <http://vaclavsmil.com/2016/12/14/energy-transitions-global-and-national-perspectives-second-expanded-and-updated-edition/>

1.1. INCIDENCIA DEL TRANSPORTE MARÍTIMO EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En base a los datos de la OMI, el tráfico marítimo ocasiona el 15% de las emisiones globales de origen antrópico de NO_x y el 13% de las de SO_x. Se sigue permitiendo que los buques usen fuel pesado, mucho más barato que el gasoil, pero sin refinar y con alto contenido en azufre. Hasta 2021, el límite máximo de contenido de azufre en los combustibles para el transporte marítimo, establecido por la misma organización, ha sido de 35.000 ppm, frente a los 10 ppm permitidos en la Unión Europea en los carburantes para el transporte por carretera. A partir del 1 de enero de 2021, este límite máximo se ha reducido a 5.000 ppm, pero sigue siendo 500 veces superior que el permitido para el diésel en carretera, pero de momento no se ha aplicado. Esto ha provocado que sólo 15 de los barcos más grandes del mundo emitan tanto dióxido de azufre y óxidos nitrosos como 760 millones de automóviles, es decir, todo el parque mundial, atendiendo a los datos publicados por el periódico *The Guardian* en 2010⁴.

Según la organización europea Transport&Environment, sólo la compañía Carnival Corporation, el mayor operador mundial de cruceros de lujo, emitió en 2017 casi 10 veces más dióxido de azufre (SO_x) alrededor de las costas comunitarias, que el total de los 260 millones de coches europeos.

A este respecto, cabe señalar que España, Italia y Grecia, seguidas de cerca por Francia y Noruega, son los países europeos más expuestos a la contaminación generada por los cruceros.

Estos países están tan expuestos a esta contaminación no sólo porque son los principales destinos turísticos, sino también porque son los que tienen estándares de niveles de azufre en el combustible marino menos estrictos, por lo que se permite a los cruceros quemar un combustible mucho más sucio y con mayores niveles de azufre a lo largo de sus costas.

Según datos oficiales del Gobierno de España, referidas al total del Estado español en el año 2016, el tráfico marítimo internacional representó el 40% de las emisiones a la atmósfera de los NO_x, el 44% de las de SO_x y el 22% de las de partículas finas (PM_{2,5}).

La contaminación producida por el sector marítimo pasa más desapercibida porque en gran medida sucede en alta mar, pero para las zonas costeras y las ciudades portuarias, el tráfico

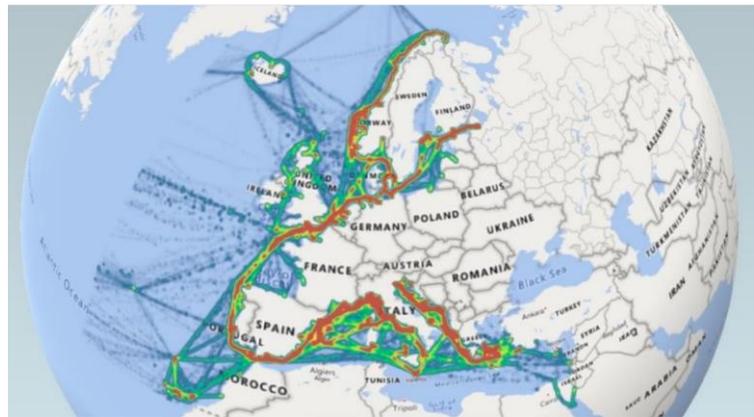


Fig. 2 Densidad del tráfico marítimo en Europa.

https://www.eldiario.es/opinion/tribuna-abierta/transporte-maritimo-contamina-miles-terrestre_129_1517031.html

⁴ Bravo, C. y Buschell, I. (2019, junio 05). *El transporte marítimo contamina miles de veces más que el terrestre*. El Diario. Recuperado 20 mayo 2020, de https://www.eldiario.es/opinion/tribuna-abierta/transporte-maritimo-contamina-miles-terrestre_129_1517031.html

marítimo es una fuente especialmente importante de contaminación atmosférica, y una seria amenaza para la salud pública y el medio ambiente. De hecho, la Comisión Europea estima que las emisiones de contaminantes atmosféricos de los barcos causan anualmente en la Unión Europea 50.000 muertes prematuras y 60.000 millones de euros en costes sanitarios.

Por otra parte, según el cuarto estudio sobre los gases de efecto invernadero producidos por el transporte marítimo realizado por la OMI (*Fourth IMO GHG Study*), publicado en 2020, los buques emitieron algo más de 1.000 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera en 2018, suponiendo un 3% de las emisiones globales. El mismo estudio prevé que si no se toman medidas, en 2050 este porcentaje subirá al 10%.

Es un hecho incontestable que, pese a su creciente participación en la economía, la industria del transporte marítimo está significativamente por detrás de otros sectores en lo que respecta a sus esfuerzos por la reducción de la contaminación atmosférica que produce. De manera sorprendente, ha conseguido estar muy poco presente en el debate público.

Si no se toman medidas, la evolución creciente del tráfico marítimo de mercancías y pasajeros conllevará inevitablemente a un aumento de las emisiones contaminantes de este sector, lo que socavaría los avances conseguidos en la reducción de la contaminación atmosférica en las fuentes terrestres.

1.2. LEGISLACIÓN

Los contaminantes atmosféricos se encuentran legislados en las siguientes directivas y convenios.

Europea:

- Directiva 2008/50/CE, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.
- Directiva 2001/80/CE, sobre la limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión
- Directiva 2010/75/UE, sobre las emisiones industriales.
- Directiva UE 2016/2284, relativa a la reducción de determinados contaminantes atmosféricos.
- Normas Euro para turismos (1, 2, 3, 4, 5 y 6)

Internacional:

- Anexo VI del Convenio Marpol
- Convenio LRTAP.

Incomprensiblemente, salvo el anexo VI del convenio Marpol, cuyo reglamento 13 regula la emisión y transporte de los COV (se incluye el metano), en ninguna de estas directivas o convenios están regulados los tres gases responsables del calentamiento global, ya que tanto el CO₂, el N₂O, como el CH₄ no son considerados contaminantes, por no ser peligrosos para la salud (salvo en cantidades tan grandes que pudieran desplazar el oxígeno y provocar asfixia). De hecho, todas las legislaciones, tanto las nacionales como las comunitarias y extracomunitarias hacen una diferenciación entre las emisiones de contaminantes atmosféricos y las emisiones de gases de

efecto invernadero, que no entran en el primer grupo. El problema está en que no hay ninguna norma que limite eficazmente la emisión de los segundos, tal como sí ocurre con los primeros.

En Europa sólo existen dos instrumentos para limitar la emisión de los GEI. Uno es el reglamento europeo n°443/2009, que impone ciertos límites a las emisiones de CO₂ de los turismos fabricados a partir de 2016. Básicamente es un reglamento para obligar a los fabricantes a desarrollar motores que consuman menos. El otro es la directiva 2003/87/CE, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. Este, al igual que el anterior, sólo contempla el CO₂ y su objetivo es crear un sistema regido por las mismas reglas del mercado para premiar o castigar económicamente a las compañías y países en función de sus emisiones de CO₂. No parece que ninguno de los dos haya servido demasiado, el primero debido a que cada vez hay más vehículos que, aunque consuman menos, en conjunto emiten más y a la inminente norma Euro 7, que penaliza los vehículos diésel provocando un aumento de las ventas de los vehículos de gasolina, que consumen más que los diésel. El segundo instrumento tampoco está evitando notablemente las emisiones de CO₂, ya que las compañías han encontrado la forma de evitar el coste de las sanciones económicas cargándoselas al usuario, como las eléctricas, que aumentan la factura de la luz en función del precio de los derechos de emisión.

A nivel internacional, en un intento de reducir las emisiones de los GEI, surgieron el protocolo de Kyoto y el actual acuerdo de París, por el que todos los países que los ratifiquen se comprometen a reducir sus emisiones. Sin embargo, no hay obligación real de cumplir los compromisos. EEUU, por ejemplo, nunca ratificó el protocolo de Kyoto y en el 2018 se ha salido del acuerdo de París, pese a ser el segundo país que más GEI emite a la atmósfera.

En el Protocolo de Kioto se marcó el objetivo en 1990 de reducir en un 5% la emisión mundial de los GEI para 2012 y sin embargo desde entonces ha sido la mayor de la historia.

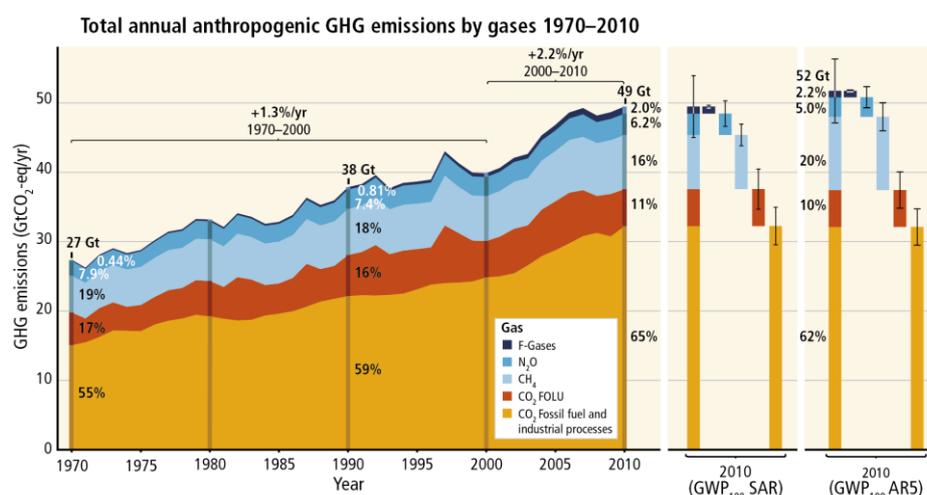


Fig. 3 Emisiones anuales de GEI en el equivalente a gigatoneladas de CO₂ por año (GtCO₂/año) entre 1970 y 2010. En marrón CO₂ proveniente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales, en rojo CO₂ proveniente de la silvicultura y otros usos del suelo, en azul claro metano, en azul oscuro óxido nítrico y en negro los gases fluorados. En 2010 se emitió una cantidad equivalente a 49 gigatoneladas de CO₂ de gases de efecto invernadero, 11 más que en 1990, es decir casi un 30% más, cuando se suponía que iban a descender un 5% en el 2012, cumpliendo el protocolo de Kyoto. [http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment% 20Reports/AR5% 20-% 20Synthesis% 20Report/SPM/SPM.02_rev1-01.png](http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20Synthesis%20Report/SPM/SPM.02_rev1-01.png)

Hace 5 años los 194 países de la ONU firmaron el Acuerdo de París, donde se comprometieron a tomar las medidas necesarias para mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales, pero la quema de combustibles fósiles sigue aumentando y no parece que haya servido de mucho.

En cuanto al sector marítimo, las emisiones contaminantes están reguladas por la OMI a través del Anexo VI del Convenio MARPOL, el cual fue adoptado por primera vez en 1997 y entró en vigor el 19 de mayo de 2005. Hasta entonces no hubo ningún control. Mediante este convenio se establece un límite de contenido de azufre en el combustible de 45.000 ppm y para las emisiones de NO_x de 17g/kwh. Este es el estándar Tier I, que se aplicó retroactivamente para todos los motores instalados a partir de 2.000. En esos años los límites para el transporte terrestre correspondían a la norma Euro III y eran de 500 ppm y 5g/kwh respectivamente.

En octubre de 2008, se introduce la primera enmienda del Anexo VI para reducir las emisiones de SO_x, NO_x y partículas en suspensión y se propone crear las Áreas de Control de Emisiones (ECA, por sus siglas en inglés) en áreas marinas especialmente designadas donde los límites a las emisiones sean más estrictos. Estas enmiendas se traducen en la norma Tier II, cuyos nuevos límites son de 35.000 ppm para el azufre en los combustibles y 14,4g/kwh para las emisiones de NO_x. Esta norma entra en vigor el 1 de enero de 2011 y para entonces en tierra comienzan a aplicarse los límites Euro V; 10 ppm para el azufre y 2g/kwh para los óxidos de nitrógeno.

El 1 de enero de 2016 entra en vigor la norma Tier III, se reducen los límites a 5.000 ppm y 3,4 g/kwh. En tierra se estrena la norma Euro VI, que mantiene el límite para el azufre y rebaja las emisiones de los óxidos nitrosos a 0,8g/kwh.

Sin embargo, para cumplir con las emisiones Tier III los buques han de instalar catalizadores y sistemas poscombustión que suponen un gran gasto económico. Ante las quejas de todo el sector marítimo, la OMI se echa para atrás y aplica los límites Tier III únicamente en las zonas ECA, recién creadas.

Desde el 1 de enero de 2021 se supone que las emisiones Tier III se han de cumplir globalmente; 1.000 ppm en contenido máximo de azufre de los combustibles marinos en las Áreas de Control de Emisiones de azufre (SECA) y de 5.000 ppm fuera de ellas. Para los NO_x se mantiene el límite de 3,4g/kwh. Todos los motores instalados a partir de esta fecha han de superarla, pero de momento se siguen concediendo moratorias y no hay una aplicación real de la norma.

En la práctica las emisiones se reducen muy poco en la regulación genérica de la OMI, ya que a todos los efectos se sigue aplicando la Tier II, solo hay una reducción apreciable dentro de las zonas SECA y NECA.

La creación de ECAs es una de las maneras más efectivas de reducir drásticamente las emisiones contaminantes procedentes del sector marítimo y limitar sus efectos negativos para la salud pública y el medio ambiente. La demostración palpable más cercana está en el Norte de Europa donde, tras la creación de una ECA en el Mar Báltico, el Mar del Norte y el Canal de la Mancha (es SECA desde 2015 y desde 2021 será también NECA), la calidad del aire ha mejorado un 80% desde el año 2015 y los beneficios socioeconómicos asociados se valoran en muchos miles de millones de euros.

En las ciudades costeras del mar Mediterráneo, donde viven alrededor de 325 millones de personas, el tráfico marítimo representa hasta un 40% de la contaminación atmosférica. Se

calcula que un 30% de todo el tráfico marítimo internacional se dirige a puertos del Mediterráneo o pasa por sus aguas con destino a otros lugares. Dado que este mar representa sólo el 0,8% de la superficie oceánica mundial, es obvio que la densidad de este tráfico en el Mediterráneo es extremadamente alta (especialmente en su parte más occidental). Actualmente, se estima que en cualquier momento hay aproximadamente 2.000 barcos mercantes de más de 100 toneladas en el Mediterráneo. Un total de 200.000 barcos lo cruzan anualmente. Por si fuera poco, se prevé un aumento de cerca del 250% del tránsito de barcos para 2050. Sin embargo, no está protegido.

El éxito continuado de las Áreas de Control de Emisiones existentes en el norte de Europa, en las costas continentales del Atlántico y del Pacífico de Canadá y EEUU, y en otras zonas, demuestra que la creación de una ECA en el mar Mediterráneo también generaría notables beneficios en la mejora de la calidad del aire, no sólo en las rutas marítimas y zonas costeras sino también en las ciudades portuarias y del interior. En este sentido, el Gobierno francés ha presentado recientemente en la OMI un informe sobre la factibilidad y potenciales beneficios socioeconómicos del establecimiento de una ECA en el Mediterráneo.

Ese informe destaca que, en comparación con la situación actual, la implantación de una regulación más estricta sobre las emisiones contaminantes que se establecería en la ECA del Mediterráneo, permitiría reducir los niveles de dióxido de azufre en un 77%, los de dióxido de nitrógeno en un 76% y las partículas en suspensión hasta un 20%, logrando así que cada año se evitara cerca de 6.000 muertes prematuras y se ahorraran de 8.000 a 14.000 millones de euros en costes sanitarios. En el caso de España el 69,2% de la población total se vería beneficiada, según el estudio, que también advierte que si los diversos gobiernos involucrados cooperasen activamente, la ECA podría entrar en vigor en el mar Mediterráneo a más tardar en 2022.

Esta iniciativa alentaría también la adopción de tecnologías de bajas emisiones y la transferencia de los conocimientos necesarios dentro de la Unión Europea, mejorando su liderazgo en tecnología y fomentando la creación de puestos de trabajo en el sector marítimo.

De todas formas, aunque estas medidas puedan ir en la dirección correcta, son a todas luces insuficientes, como siempre, se prioriza la economía de mercado frente a la salud o el cuidado del medio ambiente. Además, la legislación internacional sólo regula la emisión de contaminantes atmosféricos y deja de lado los gases de efecto invernadero. La disminución de estos últimos únicamente se contempla en los acuerdos internacionales como el protocolo de Kioto y el acuerdo de París. Pero las medidas acordadas no son de obligado cumplimiento y vergonzosamente ningún país las lleva a cabo.

2^a PARTE

2. MOTORES ELÉCTRICOS Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

2.1. MOTORES ELÉCTRICOS

Es curioso que la sociedad en general esté tan familiarizada con los motores de combustión y tan poco con los motores eléctricos, cuando ambos llevan con nosotros aproximadamente el mismo tiempo. Cualquiera sabe distinguir entre un motor diésel y uno de gasolina y todos hemos oído hablar de motores atmosféricos, turboalimentados, de inyección electrónica, multiválvulas, etc. Es más, los fabricantes, especialmente los del sector de automoción, se afanan por explicarnos la tecnología que hay detrás de sus productos. Sin embargo, muy pocos conocen los diferentes tipos de motores eléctricos que hay ni la tecnología que emplean.

Los primeros motores eléctricos con utilidad práctica comenzaron a fabricarse a finales del siglo XIX, más o menos al mismo tiempo que los de combustión interna. A diferencia de estos últimos, los motores eléctricos son mucho más sencillos. Fabricar un motor de combustión es extremadamente complicado. Uno de 4 cilindros normalito tiene más de un millar de piezas, unas 200 de ellas en movimiento, mientras que uno eléctrico apenas se compone de una docena de partes, de las cuales solo giran tres, contando los rodamientos. De otro lado, su rendimiento no tiene comparación con el de los motores de combustión, que suele rondar el 35% en los motores diésel, mientras que el primer motor trifásico de Dobrovolsky ya en 1889 ofrecía un rendimiento del 80%. Los motores eléctricos actuales pasan del 90% holgadamente y ofrecen un ratio potencia/peso superior a 8 kw/kg, más del doble que, por ejemplo, los motores de la fórmula 1, cuyo ratio es de 3 kw/kg. Pero quizás su mayor ventaja es que tienen prácticamente el mismo rendimiento independientemente del régimen de giro, ofreciendo el mismo par desde las primeras vueltas. Esto evita el uso de reductoras en las embarcaciones o cajas de cambio en los vehículos terrestres, ofreciendo una tracción mucho mayor que el conjunto motor-reductora desde la primera vuelta. Por si fuera poco, su rango de giro es mucho mayor, pudiendo girar mucho más lento (realmente no tienen un límite por abajo) y mucho más rápido. Los motores de combustión en cambio no pueden girar más lento que a ralentí, pues se calarían, y tampoco pueden girar excesivamente rápido, dada la cantidad de piezas en movimiento y la dificultad que supone el llenado de los cilindros a regímenes muy altos.

La eficiencia de un motor de combustión está directamente relacionada con su rendimiento volumétrico, es decir, su capacidad de llenar los cilindros de aire. Pero no es lo mismo llenar estos a bajas vueltas, a medias, o a altas. A bajas vueltas se dispone de más tiempo para el llenado de los cilindros y los conductos de admisión deben de ser largos y de poca sección, para aprovechar mejor la inercia de los gases y las ondas de presión generadas por las pistonadas. Sin embargo, a altas vueltas han de ser cortos y de gran sección para facilitar la entrada de aire en tan poco tiempo. Girando a 1.000 rpm un motor de combustión dispone de menos de 3 centésimas de segundo para el llenado de los cilindros. Por otro lado, las válvulas de admisión y escape han de abrirse con cierto adelanto y cerrarse con retraso, para que estén totalmente abiertas durante ese lapso tan corto de tiempo, pero a bajas vueltas los adelantos y retrasos no pueden ser tan grandes.

El problema es que, si diseñamos un motor para tener un buen rendimiento volumétrico a bajas vueltas, a altas será escaso y si lo diseñamos al revés ocurrirá lo contrario. La industria trata de solucionar estos problemas mediante sistemas como inyección controlada electrónicamente, turbos de geometría variable, distribución variable e incluso admisión variable, instalando una especie de compuertas en los tubos de admisión que se abren o cierran para que el recorrido del aire sea más corto o largo respectivamente, según el régimen de giro. Todos estos sistemas son extremadamente complejos, restan fiabilidad y encarecen el producto. A todo lo dicho hay que añadir que tienen que convertir el movimiento rectilíneo del pistón en un movimiento de giro mediante el sistema biela-cigüeñal, lo que genera pérdidas de energía.

El funcionamiento de los motores eléctricos es muchísimo más sencillo y se basa en el aprovechamiento de las fuerzas electromagnéticas. Se componen básicamente de una parte fija, el estátor, y una móvil, el rotor. Ambos están contruidos sobre un núcleo de hierro a través del cual circulará el flujo magnético y que también sirve como soporte para los bobinados que van alojados en unas ranuras practicadas en el mismo. Cuando se establece una corriente en los bobinados, según la ley de Ampere se crea un flujo magnético en el núcleo de hierro convirtiéndose tanto el estator como el rotor en electroimanes, de manera que la fuerza magnética que aparece entre ambos hace girar el rotor. Estas fuerzas son tangenciales al mismo, por lo que el movimiento resultante es giratorio, no rectilíneo, de forma que se ahorra la necesidad de convertirlo. El sistema de control de potencia y velocidad de giro tampoco tiene comparación con el de los motores de combustión. Mientras en los últimos se ha de controlar una explosión de naturaleza intrínsecamente caótica, en los motores eléctricos basta con variar el voltaje o la frecuencia para controlar la velocidad de giro y alimentarlos con más o menos intensidad de corriente para variar su par. Lo cierto es que no hay ningún aspecto en el que un motor eléctrico no sea netamente superior a uno de combustión.

Todos los motores eléctricos giran por el mismo principio, en general se establecen dos campos magnéticos: uno de ellos en el estator y el otro en el rotor. Estos campos magnéticos pueden ser generados por la excitación de los bobinados alrededor del núcleo de hierro, por imanes permanentes, o por corrientes inducidas. La fuerza producida por la interacción de estos dos campos magnéticos produce el par que hace girar al rotor. Sin embargo, también existen los motores de reluctancia variable que sólo usan el campo magnético creado por el estátor.

2.2. BATERÍAS E HIDRÓGENO

Existen dos formas principales de almacenar la energía necesaria para alimentar los motores eléctricos: las baterías y el hidrógeno. Los primeros son dispositivos electroquímicos que almacenan energía eléctrica transformándola en energía química y luego la devuelven en forma de corriente eléctrica otra vez.

El hidrogeno por su parte, se usa en las celdas de combustible para generar electricidad. Mientras que los acumuladores almacenan “directamente” la energía eléctrica suministrándoles corriente, las celdas de combustible funcionan más bien como generadores de electricidad cuyo combustible es el hidrógeno.

2.2.1. BATERÍAS VS GASÓLEO

La realidad es que las baterías aún están lejos de ofrecer la densidad energética y por tanto autonomía, que ofrecen los combustibles fósiles. En 2021, las celdas NCA, con estándar 46800, son las más eficientes que hay en el mercado y las de mayor densidad energética. Aun así, sus 276wh/kg quedan muy lejos de los 12.000wh que contiene un kg de gasoil. Para rematar, esos 276wh/kg corresponden a la celda en sí, pero en la práctica la cifra es menor, puesto que las celdas forman baterías o paquetes a los que hay que añadir el peso de la estructura que sujeta las celdas, el de las conexiones eléctricas, del circuito de refrigeración...etc.

Los paquetes que fabricaba Tesla con celdas 18650 de la primera generación, tenían una densidad energética poco mayor de 100wh/kg, es decir, la mitad que la celda individual. Los paquetes con celdas de la segunda generación aumentaron a 150wh/kg. Con las celdas de la tercera y última generación hasta ahora, se fabrican baterías de 200wh/kg. Por otra parte, el rendimiento de las baterías se va reduciendo según se van degenerando y como se explica en el anexo II, su vida útil acaba cuando el mismo baja hasta el 80%, por cuanto se puede estimar un rendimiento medio del 90%, durante toda su vida útil. Asimismo, hace falta un dispositivo SMPS para convertir la corriente continua generada por las baterías en corriente alterna o pulsada para alimentar los motores, cuya eficiencia ronda el 90%. Considerando además que los motores eléctricos actualmente ofrecen un rendimiento del 96%, llegamos a la conclusión de que sólo se pueden aprovechar 156wh por cada kilogramo ($200 \times 0,9 \times 0,96$).

Por lo tanto, usando las mejores baterías del momento conseguimos 156wh/kg frente a los 12.000wh/kg que ofrecen combustibles fósiles como el gasóleo o el fuel-oil. A priori parece que estemos muy lejos de poder sustituir dichos combustibles como fuente de energía, pero lo cierto es que las baterías se pueden utilizar en sistemas de propulsión híbridos que resultan más eficientes, y en algunos casos, incluso en sistemas puramente eléctricos, alimentados exclusivamente por baterías. Esto es debido a que los motores de combustión tienen un rendimiento muy bajo, pese a que la densidad energética del gasóleo sea tan alta.

Si bien es cierto que el gasoil posee un poder calorífico de aproximadamente 12.000wh/kg, es imposible fabricar un motor de combustión que pueda aprovechar toda esa energía. Aunque fabricásemos un motor sin rozamiento interno, lo cual es imposible, las leyes de la termodinámica

imponen un límite en el rendimiento de este tipo de motores, que se sitúa aproximadamente en el 55%⁵.

En la actualidad el motor de 4 tiempos más eficiente del mercado es el Wartsila 31, que homologa un consumo específico de 167,7g/kwh. Los motores lentos de dos tiempos aún consiguen rebajarlo hasta los 160g/kwh, lo que se traduce en un rendimiento de casi el 52%. Estos enormes motores de cruceta se fabrican en un rango de potencias entre los 5.000 y 80.000 kw y al igual que los motores semilentos de cuatro tiempos, como el Wartsila 31, con un rango entre los 2.000 y 10.000kw, son utilizados en los grandes cargueros de travesías transoceánicas, tanto en buques container como tanqueros. Estos buques mantienen una velocidad constante, lo que permite diseñar motores para funcionar de manera óptima en el régimen de giro correspondiente a la velocidad de diseño del buque, sin importar que debajo de ese régimen el consumo aumente considerablemente,

Se debe señalar que los consumos anunciados por los fabricantes se miden en bancos de pruebas, sin tener en cuenta las pérdidas en la línea de ejes, además de otros factores que en condiciones reales aumentan ese consumo en un 8% de media⁶. En los motores semilentos de 4 tiempos como el W31 este consumo aumenta todavía más, ya que su mayor régimen de giro hace necesaria la instalación de una reductora, cosa que no ocurre en los motores de cruceta, cuyo régimen nominal apenas supera las 100 revoluciones por minuto.

Sea como fuere podemos considerar un consumo específico mínimo de 173g/kwh durante la navegación de los buques más modernos equipados con motores de dos tiempos (160+8%), y algo más en los de cuatro. Esto supone un rendimiento del 48% y en consecuencia un aprovechamiento de 5.760 wh por cada kilogramo de fuel o gasoil, esto es, 33 veces más energía por kilogramo que la obtenida por las baterías más modernas. Teniendo en cuenta que el peso del combustible supone aproximadamente el 10% del desplazamiento máximo de este tipo de buques, si tuviéramos que sustituir el combustible por baterías que suministren la misma energía,

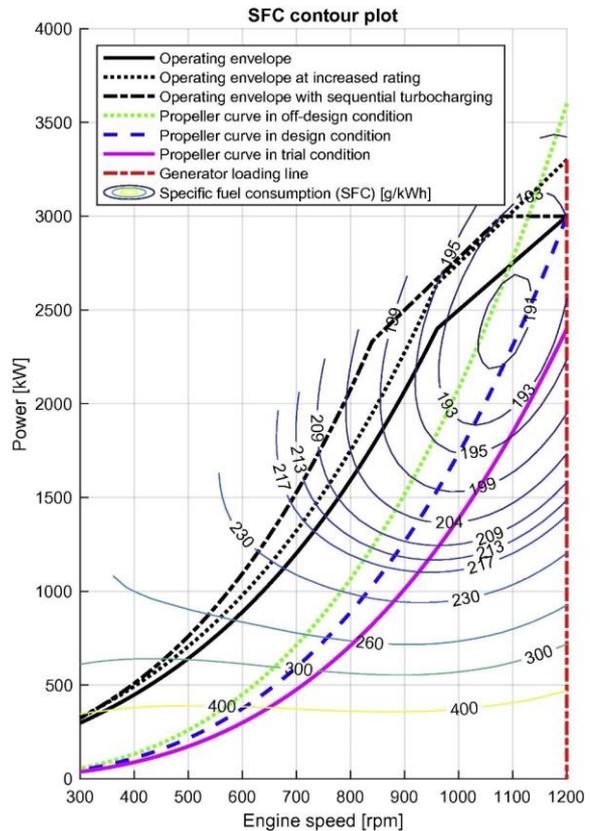


Fig. 4 Curvas características de un motor semilento R.I Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, *Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: Volume 194*, 2017, Pages 30-5. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03061917301940>

⁵ López, J.M. (2017). *Eficiencia de los motores de combustión interna* (Trabajo de Fin de Grado no publicado). EHU, País Vasco.

⁶ Shi, W., Grimmeliuss, H.T., and Stapersma, D. ‘Analysis of Ship Propulsion System Behaviour and the Impact on Fuel Consumption’. 1 Jan. 2010 : 35 – 64.

estas pesarían más del triple que el barco y toda su carga. Queda claro pues que, a día de hoy, las baterías no pueden sustituir a los combustibles fósiles en los grandes mercantes.

Sin embargo, no todas las embarcaciones se dedican al transporte de mercancías ni pueden equipar este tipo de motores diseñados para funcionar a régimen constante. Los remolcadores y buques de servicios, los pesqueros, las embarcaciones de recreo y demás se alejan mucho de este modo de funcionamiento y los motores que equipan sufren continuas variaciones de régimen y carga, lo que reduce mucho su rendimiento. Estos motores habitualmente proceden del sector industrial y agrícola o directamente del sector de automoción cuando no se requiere demasiada potencia. Son motores mucho más elásticos cuyas curvas de potencia y par son muy distintas a las de los motores lentos y semilentos, ya que se diseñan buscando un compromiso de respuesta tanto en altas como en bajas vueltas, consiguiendo un funcionamiento aceptable en todo su rango, pero renunciando a lograr un funcionamiento óptimo en un régimen determinado. Como dice el refrán, quien mucho abarca poco aprieta.

Si uno mira los consumos homologados en motores por debajo de los 1.000 kw, como Caterpillar, Volvo, John Deere, Yanmar, Mitsubishi, Kubota, Doosan o Ford, por citar algunos, se encuentra con valores por encima de los 200g/kwh. Estos valores, obtenidos en bancos de pruebas, se corresponden con el mínimo obtenido en todo el rango de funcionamiento del motor. Este mínimo surge en unas condiciones muy determinadas de funcionamiento; cuando el motor gira a plena carga y aproximadamente al 75% de su régimen nominal, un poco por encima de su régimen de par máximo.

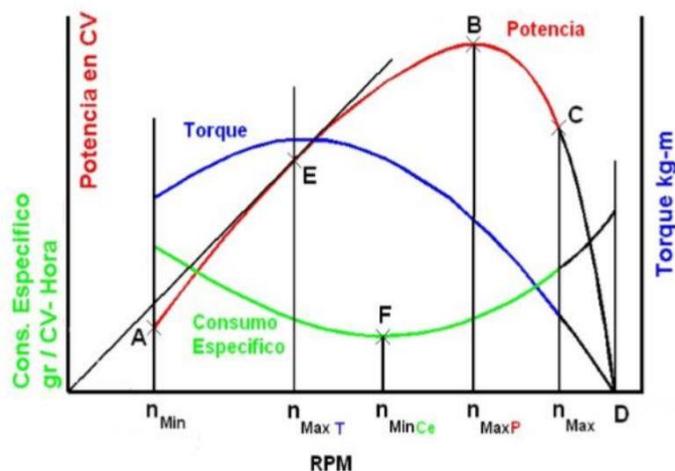


Fig. 5 Curvas características de motores rápidos. Fuente: Elaboración propia.

En una embarcación con este tipo de motores, tal consumo mínimo es imposible de conseguir, puesto que nunca lograremos que el motor funcione en esas condiciones, esto es, a plena carga y al 75% de su régimen nominal al mismo tiempo. La razón es que, si ponemos el motor a ese régimen y le metemos todo el gas para aumentar la carga al 100%, subirá de vueltas y se alejará de la zona de mínimo consumo específico (a no ser que estemos remolcando), ya que no hay ningún freno como el del banco de pruebas que lo impida. Si quitamos gas para mantener las vueltas, entonces no podemos hacer que el motor funcione a plena carga. En la práctica estos motores funcionan a cargas parciales y, dependiendo del tipo de barco en el que se monten, pueden funcionar en regímenes muy alejados de la zona de mínimo consumo, aunque ésta sea más amplia que en los motores lentos y semilentos, pudiendo sobrepasar los 400g/kw. Muchas embarcaciones de pesca y de servicios portuarios, por ejemplo, funcionan la mayor parte del tiempo a ralentí o muy cerca de dicho régimen.

En estas condiciones los consumos superan los 600g/kwh en el banco de pruebas, pero en funcionamiento real ese consumo es aún mayor debido a las pérdidas en el tren propulsor, que con cargas tan bajas aumentan considerablemente, y a las pérdidas ocasionadas por el accionamiento hidráulico de la diversa maquinaria de cubierta, como maquinillas o grúas.

Este tipo de actividades provocan que el rendimiento medio de los motores llegue a bajar hasta el 10%, lo que supone que sólo se aprovechen 1.200wh de los 12.000 que contiene cada kilogramo de gasoil. En estos casos un sistema híbrido es mucho más eficiente, aprovechando la autonomía que ofrece el gasoil para la navegación y el rendimiento de la propulsión eléctrica cuando funcionan con cargas muy bajas, ya que los motores eléctricos tienen prácticamente el mismo rendimiento independientemente de la carga y el régimen de giro.

De hecho, aunque se sigan empleando los motores diésel, lo más sensato es usarlos como generadores de electricidad, de forma que cuando se requiera, toda la potencia del generador se traspase al motor eléctrico encargado de mover la hélice y cuando la demanda sea menor, la potencia sobrante pueda ser utilizada para cargar las baterías. Una vez cargadas, el motor se puede apagar hasta que éstas se descarguen, momento en que habría que volver a encenderlo. Se consigue de esta manera que los motores de combustión funcionen todo el tiempo a un régimen de giro y carga constantes, siendo mucho más fácil diseñar los sistemas de inyección, distribución y sobrealimentación para obtener el máximo rendimiento, de forma análoga a como se diseñan los motores de los grandes mercantes.

También existen embarcaciones para las cuales la autonomía de las baterías es suficiente, como los ferris, embarcaciones de servicios portuarios o turísticos, de recreo y de pesca local, donde ni siquiera hace falta un generador, por lo que se pueden implementar sistemas puramente eléctricos.

Por todo ello, pese a su baja densidad energética, las baterías son una buena solución para evitar o reducir la emisión de gases, ya sea en aplicaciones donde la autonomía no es un problema o en sistemas híbridos cuando sí lo es.

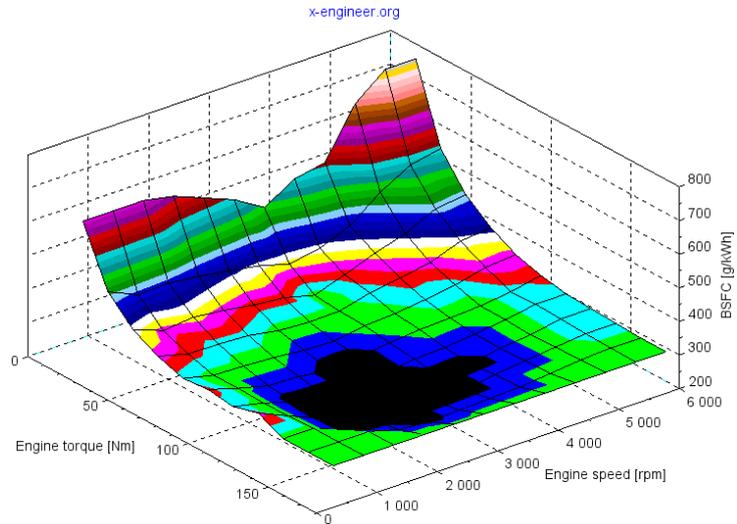


Fig. 6 Mapa de consumo específico. X-engineer.org *Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)*. Recuperado de <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/brake-specific-fuel-consumption-bsfc/>

2.2.2. HIDRÓGENO VS GASÓLEO

2.2.2.1. Ventajas

La principal ventaja del hidrógeno es que cuando reacciona con el oxígeno solo produce vapor de agua y calor, sin emitir ningún tipo de contaminante. Asimismo, las celdas de combustible que lo utilizan son muy fáciles de reciclar y su vida útil es equiparable a la de los motores de combustión. Toyota por ejemplo, ofrece una garantía mayor para sus celdas de combustible que para sus motores de combustión.

Por otro lado, la densidad energética del hidrógeno es más de tres veces la de los combustibles fósiles, aproximadamente 40.000wh/kg, por lo que se consiguen mayor autonomía con la misma cantidad de combustible.

2.2.2.2. Desventajas

El hidrogeno es el elemento químico más ligero que existe, ya que sólo contiene un protón y un electrón. En condiciones de presión y temperatura estándar se encuentra en estado gaseoso, formando moléculas diatómicas cuya masa molar es de 2 gramos. Según la ley de los gases ideales cada mol ocupa 22,7 litros en estas condiciones, por cuanto su densidad es muy baja, siendo un 7% de la del aire, es decir, 14 veces más ligero.

Este es el mayor problema; una cantidad muy pequeña ocupa muchísimo espacio, por lo que si queremos acumular una cantidad aceptable hay que almacenarlo a presiones muy elevadas, con el gasto energético y dificultades técnicas que ello supone. Asimismo, al tener tan poca densidad es muy fácil que se produzcan fugas en los tanques de almacenamiento o en las tuberías de suministro, si estas tienen cierta porosidad o las juntas no están perfectamente selladas.

Asimismo, aunque el hidrógeno es muy abundante en la Tierra (constituye aproximadamente un 75% de la materia bariónica del universo), se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno, formando moléculas de agua, o el carbono, formando compuestos orgánicos. No es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que se tiene que producir, separándolo de las moléculas de las que forma parte, para luego aprovechar la energía que desprende al volver a formar dichas moléculas. Por tanto, no es un combustible primario, sino un vector energético (un acumulador de energía), que cumpliendo las leyes de la termodinámica nunca nos va a proporcionar más energía que la consumida para su producción, por lo que su tasa de retorno energético siempre será inferior al 100%.

Cabe señalar que las celdas de hidrógeno son relativamente caras, principalmente por el uso de metales preciosos como el platino, para fabricar el catalizador, pero pronto todos los motores diesel marinos también tendrán que instalar uno, que pese a tener una función distinta, será igual de caro, por lo que esta desventaja desaparece.

2.2.3. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Actualmente la forma más barata de producir hidrógeno es mediante el reformado de gas natural con vapor de agua, copando más del 90% de la producción mundial. Es el llamado hidrógeno gris, pues con este método se emiten grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Aun así, usar

hidrogeno gris en lugar de combustibles fósiles reduce las emisiones contaminantes. Como el reformado se realiza en espacios cerrados, el CO₂ generado se puede capturar, evitando su emisión a la atmósfera, obteniéndose así el llamado hidrógeno azul. Sin embargo, este método no está exento de emisiones, ya que para alcanzar las altas temperaturas necesarias en el reformado se han de quemar combustibles fósiles, normalmente el propio gas natural.

Por último está el hidrógeno verde, que se produce a partir del agua mediante electrolisis, utilizando energías renovables como la eólica o solar, de forma que se evita cualquier tipo de emisión nociva.

La producción de hidrógeno es más cara que la del gasoil, en parte debido a que su tasa de retorno energético ronda el 80%, independientemente del método de producción, mientras que la TRE del gasoil es del 300%, según la Agencia Internacional de Energía. Además, se pierde otro 13% de energía para poder comprimirlo (700 bares). Sin embargo, una mejor planificación del uso de las energías renovables puede anular estas desventajas, pues al ser un vector energético, el hidrógeno se puede usar para almacenar el excedente que producen las energías renovables, de manera que podríamos dejar de ver desaguar las presas sin producir energía en época de mucha lluvia, o los molinos parados cuando su producción excede la demanda. Actualmente un 1 kg de hidrógeno cuesta entre 3,5 y 5€, mientras que la misma cantidad de gasoil cuesta 80 céntimos, siempre según la Agencia Internacional de Energía.

No obstante, según las previsiones de la misma agencia, el coste del gasoil continuará subiendo, ya que cada vez es más costoso extraer el petróleo del que se deriva, mientras que se espera que el precio del hidrógeno verde baje hasta los 2 dólares para 2026. En este sentido, algunas de las compañías de energía más grandes del mundo, entre las que se encuentra Iberdrola, se han unido al proyecto de la ONU bautizado como “Green Hydrogen Catapult”, con el objetivo de reducir el coste de producción del hidrógeno verde. Esta plataforma está vinculada a la campaña “Rise to Zero” de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Las siete empresas asociadas pretenden hacer caer el coste con 25 GW de producción de hidrógeno verde para 2026, aproximadamente 50 veces más de lo que se produce actualmente. El proyecto cita un estudio del grupo empresarial Hydrogen Council, que establece que 2 dólares por kilogramo representan un punto de inflexión en la producción de hidrógeno. Esto ya lo están consiguiendo países como Japón, que desde el desastre de Fukushima han hecho una apuesta sería por el hidrógeno. En esa ciudad ya han construido una planta que suministra 10 MW mediante energías renovables con la que producen hidrógeno, y entre los planes del gobierno se encuentra la introducción de 200.000 automóviles de pilas de combustible de hidrógeno y 900 estaciones de servicio para 2025, así como el compromiso de reducir el precio del hidrogeno en más de un 90% para 2050.

En este escenario, Iberdrola ha puesto en marcha la que será la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa. La planta de Puertollano (Ciudad Real) estará integrada por una planta solar fotovoltaica de 100 MW, un sistema de baterías de iones de litio con una capacidad de almacenamiento de 20 MWh y un sistema de producción de hidrógeno mediante electrolisis de 20 MW. Mientras tanto, se espera que la primera planta de producción de hidrógeno verde para uso en celdas de combustible, esté operativa en la planta que tiene Bizkaia Energía en Amorebieta para el año 2022. Tendrá una capacidad inicial también de 20 MW y su objetivo es

generar 1.500 toneladas de hidrógeno verde por año, proveniente de fuentes 100 % renovables y evitar así la emisión de más de 12.000 toneladas de CO₂.

2.2.4. CELDAS DE HIDRÓGENO VS BATERÍAS DE LITIO

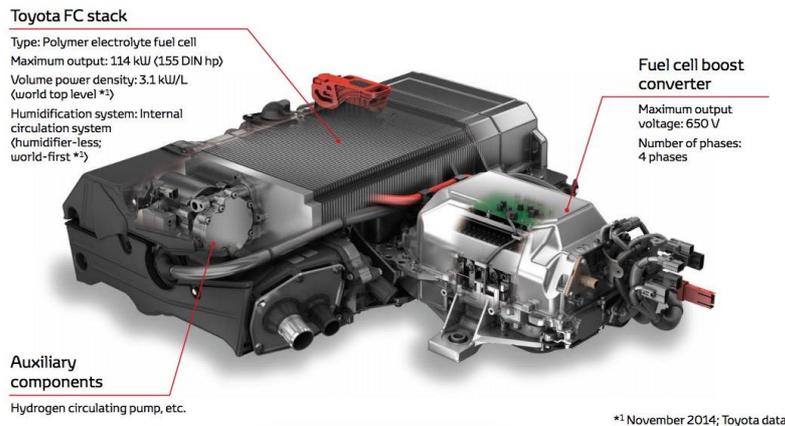


Fig. 7 Celda de combustible de Toyota con 67% de rendimiento. Toyota Europe. Recuperado de Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265%20.pdf

Las celdas de hidrógeno actuales logran una eficiencia en torno al 52%, descontando las pérdidas ocasionadas por los equipos auxiliares como las bombas de circulación, el compresor de aire y SMPS. Las baterías de litio en cambio llegan hasta el 81%, descontando las pérdidas por degradación y por conversión de la corriente en el SMPS.

Fuera del sector marítimo quizás las baterías sean una

mejor opción que las celdas de combustible. Tienen una mayor eficiencia, no necesitan de una gran infraestructura para ser recargadas y, a día de hoy, ofrecen una autonomía suficiente para los vehículos que las montan. Estos son más baratos que los de pila de combustible y al almacenar la electricidad tomándola directamente de la red, el kwh se paga a precio de mercado. Las celdas de combustible en cambio, son más caras, y debido a las pérdidas durante la producción de hidrógeno, el kwh producido por las mismas también lo es. A todo esto hay que añadir que la infraestructura para la distribución del hidrógeno entre las estaciones de servicio es complicada. Sin embargo, en el sector marítimo, sobre todo si hablamos de grandes buques, el hidrógeno es la única opción viable sin recurrir a la hibridación. Puede competir en autonomía con el gasóleo y se pueden instalar plantas productoras de hidrógeno en los mismos puertos o muy cerca de ellos, sin necesidad de una gran infraestructura de distribución. De todas formas, sin un buen plan para la producción de hidrógeno, éste será bastante más caro que el gasoil, por lo que va a ser muy difícil que pueda sustituirlo en un futuro inmediato.

3^a PARTE

3. PROYECTO DE ELECTRIFICACIÓN DEL PESQUERO “MANUELAK”



Fig. 8 Pesquero “Manuelak” en el puerto de Getaria. Imagen tomada por el autor.

3.1. CONTEXTO

El “Manuelak” es un pesquero de 8 m de eslora dedicado a las artes menores, principalmente a la pesca del pulpo. Este tipo de pesca se realiza con nasas, que se largan al fondo unidas a una línea madre mediante brazoladas de 4 o 5 metros. Ambos extremos de la línea están señalizados con sendas boyas donde figuran el nombre de la embarcación y el tipo de arte. El “Manuelak” faena con líneas de 20 a 80 nasas, según la zona de largada. Las nasas se colocan cada 10 m a lo largo de la línea, formando palangres de 200 a 800m.

El barco dispone de un sistema de propulsión compuesto de: un motor diésel de 7,5l, reductora de ratio 4,5:1, mecanismo de marcha lenta, hélice fija de cuatro palas y timón.

El motor es un modelo SoléDiesel SFN-210, cuya base es el Ford CNH 7,5. Ofrece 154 kw de potencia y 700Nm de par. Su peso es de 790kg, incluida la reductora TwinDisc de Technodrive, modelo TM200, con una reducción de 4,5:1 En la siguiente página se muestran las medidas del barco, así como los datos de consumo, carga, potencia, par y velocidad.

MEDIDAS DEL "MANUELAK"

Eslora (E)	8,06 m
Entre perpendiculares (Epp)	6,99 m
Manga (B)	2,80 m
Manga de flotación (Bw)	2,60 m
Puntal (H)	0,9 m
Desplazamiento	4,73 ton
Calado (d)	0,66 m
Francobordo (Fb)	0,24 m
Regala	1,35 m
Área de flotación (Aw)	13,69 m ²
Coefficiente de flotación (cw)	0,69
Coefficiente de bloque (cb)	0,35
Altura metacéntrica (GM)	0,84 m
Altura del centro de gravedad (kG)	0,74m

Tabla 1 Datos tomados del libro de estabilidad del “Manuelak”

CURVAS DE CONSUMO, POTENCIA Y VELOCIDAD

RPM	CONSUMO (l/h)	CREMALLERA (%)	POTENCIA (KW)	PAR (Nm)	VELOCIDAD (nudos)
800 ₁	2,5	0	1	12	0
800 ₂	3,5	5	2,5	30	3,5
1050	5	10	7	64	4,5
1300	7	15	14	103	5,5
1500	10	25	27,5	175	6,5
1700	14,5	40	50	280	7,2
1900	20	50	75	377	7,9
2100	26	70	100	455	8,6
2350	40	100	140	570	11

¹ Motor girando en vacío pero con el halador y el caballo en marcha

² Motor avante pero sin el halador, con la PTO desembragada. La bomba de agua en marcha.

Tabla 2 Los consumos, la velocidad y la carga se han medido a bordo del “Manuelak”. Los kw obtenidos para cada régimen se han calculado utilizando las curvas de potencia que aparecen en la documentación del motor. Estas curvas se obtienen a plena carga, por lo que los valores para cada régimen se han multiplicado por el porcentaje de la carga del motor. La carga del motor se corresponde con el recorrido de la cremallera, siendo máxima cuando la cremallera está totalmente metida.

El “Manuelak” va a ser reformado aprovechando que hay que sustituir el motor. El objetivo principal es instalar un sistema de propulsión más adecuado al arte de las nasas, que dote al barco de mayor maniobrabilidad y que funcione de manera más eficiente en base al uso real, ahorrando costos.

Para cumplir con dichos objetivos se ha proyectado un sistema de propulsión puramente eléctrico, compuesto por un motor “pod”, las baterías y el control electrónico.

3.2. MANIOBRABILIDAD

En la pesca del pulpo las nasas se largan muy cerca de la costa, en los tramos donde hay rocas, a escasos metros de las mismas y a muy poca profundidad. Durante el virado de la línea los enganchones suelen ser habituales y hace falta cierta pericia para liberar el aparejo.

Cuando una nasa queda atrapada entre las rocas, la línea actúa como un ancla, comprometiendo el gobierno de la embarcación. Normalmente hace falta largar parte del aparejo para tener más cancha y poder maniobrar tirando en distintas direcciones hasta desenganchar la nasa. Si la maniobra de zafada se prolonga, la situación puede llegar a ser comprometida, sobre todo si hay mala mar y el barco queda proa a las rocas con parte del aparejo a popa. En estas situaciones, disponer de una hélice transversal es extremadamente útil, pues permite poner el rumbo necesario sin necesidad de dar atrás, evitando el peligro de enganchar la línea con la hélice.

El “Manuelak” no dispone de hélices transversales, pero instalando un sistema de propulsión mediante un motor pod con giro azimutal, se ahorra la instalación, puesto que el propio pod se puede orientar transversalmente. En el mercado existen diferentes modelos, pero los que incluyen el mecanismo de giro resultan demasiado caros para barcos de este porte. No obstante, los pods pueden instalarse en la mecha del timón y usar el sistema de gobierno existente para poder girarlos en sentido azimutal. Esta disposición es la que se propone implementar en el Manuelak.



Fig. 9 Propulsor pod montado en la mecha del timón.

Por otro lado, el control de la velocidad de giro de un motor eléctrico es extremadamente preciso, permitiendo hacerlo girar muy lentamente si es necesario, sin ningún perjuicio para el motor. Esta capacidad es especialmente útil durante la largada, cuando la velocidad del barco ha de ser muy lenta para realizar la maniobra con seguridad, ya que las nasas se echan una a una y hay que vigilar que el aparejo no se enrede, a menudo cebando cada nasa según van saliendo, lo que requiere cierto tiempo. La velocidad a régimen de ralentí resulta demasiado alta, por lo que estos barcos llevan instalado un mecanismo de marcha lenta en la reductora. Este mecanismo es un sobrecoste más y acorta la vida útil de la reductora, pues obliga a que los discos patinen para reducir las vueltas de la hélice. Con la propulsión eléctrica este problema desaparece.

3.3. EFICIENCIA

El puerto base del “Manuelak” es Getaria y su caladero habitual la costa entre Mutriku e Igeldo. Son aproximadamente 16 millas, pero sólo se cubren tramos de unas dos millas al día, de forma que se tardan 8 días en cubrirla por completo. Evidentemente, cuanto más lejos de Getaria se larguen las nasas, más se alarga la faena y más distancia se recorre, resultando jornadas de entre 3 y 7h. Al final del año sale una media de 5 horas al día y 200 días al año, completando aproximadamente 1.000 horas de motor y 2.000 millas, a razón de 10 millas por día. El consumo medio anual es de 5.000 litros de gasoil, lo que suponen 5l/h.

En principio puede parecer un consumo reducido, pero hay que tener en cuenta que en esta modalidad de pesca se ocupa el doble de tiempo largando o virando que navegando, maniobras que se realizan con el motor a ralentí. En estas condiciones, se desperdicia una cantidad considerable de combustible, resultado de hacer funcionar el motor con cargas tan bajas. En la tabla 5 se ha calculado la eficiencia con la que trabaja el motor del “Manuelak” a distintos regímenes, dividiendo la energía saliente del motor por la aportada por el combustible. Se observa claramente cómo el rendimiento disminuye con las cargas bajas, siendo mínimo a régimen de ralentí.

RPM	L/H	KWh disponible (1)	KWh generado	EFICIENCIA (%)
800	2,5	30	1	3,33
800	3,5	42	2,5	5,95
1050	5	60	7	11,67
1300	7	84	14	16,67
1500	10	120	27,5	22,92
1700	14,5	174	50	28,74
1900	20	240	75	31,25
2100	26	312	100	32,05
2350	40	480	140	29,17

(1) 12kwh/l

Tabla 3 Eficiencia del motor para cada régimen de giro.

3.3.1. CÁLCULO DE ENERGÍA ÚTIL Y CONSUMO REAL

3.3.1.1. Maniobra de virada

Mientras dura la maniobra el motor está en marcha pero girando en vacío. Únicamente acciona el halador, a través de una PTO en el motor, y el caballo, cuya bomba está acoplada al motor mediante correas. Estos componentes demandan 1 kw entre los dos y se consumen 2,5 l/h, como se puede observar en la tabla 4.

3.3.1.2. Maniobra de largada

Durante la maniobra de largada el motor también gira en régimen de ralentí, pero en avante, por lo que el consumo aumenta hasta 2,5 kw⁷, a pesar de desembragar la bomba hidráulica que alimenta el halador. Se consumen 3,5 l/h.

Considerando que la maniobra de largada dure la mitad que la de virada, se puede deducir que cada 3 horas de maniobra del aparejo, se demandan 4,5 kwh y se consumen 8,5 l de combustible, es decir una media de 1,5kw y 3,83 l/h respectivamente.

El resto del tiempo el barco habitualmente navega a 6 nudos y medio, para lo que se demandan 27,5 kw al motor y se consumen 10 l/h. En la siguiente tabla se muestran los consumos diarios y anuales, así como la potencia generada, teniendo en cuenta los valores calculados.

CONSUMOS	NAVEGACIÓN		MANIOBRA	DIARIO	HORARIO	ANUAL
HORAS AL DÍA	1,66	3,33		5,00	1,00	1000,00
CONSUMO POTENCIA kwh	27,50	1,50		50,65	10,13	10129,00
CONSUMO GASOIL litros	10,00	2,83		26,02	5,20	5204,78

Tabla 4 Datos de consumos estimados durante la navegación y durante la maniobra, cuando el motor gira a régimen de ralentí.

Se puede observar que el consumo diario de gasoil así calculado es de 26 litros, en lugar de los 25 que se deberían obtener, mientras que el consumo anual resulta en 5.205 litros, en lugar de 5.000. Esto es debido a que se ha considerado un ratio de 2:1 entre el tiempo de maniobra y el de navegación, cuando en realidad es algo mayor del doble. Por tanto, el consumo diario de potencia calculado también es mayor que la media real, pero partiendo de este valor nos aseguramos de no estimar dicho consumo a la baja, a la hora de calcular la capacidad de las baterías.

3.3.2. CONSUMO TEÓRICO CON UN SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA.

Dotando al “Manuelak” de un sistema completamente eléctrico, incluyendo el halador y la bomba de agua, cada subsistema se vuelve independiente, pudiéndose activar cuando es necesario y sin consumir energía cuando está desactivado.

3.3.2.1. Maniobra de virada

Dado que no hace falta que la hélice gire ni necesitamos la bomba de agua, el único consumo es el del halador, que requiere 500w.

3.3.2.2. Maniobra de largada

Durante la largada únicamente la propulsión está en marcha y dado que el motor eléctrico funciona igual de bien a muy bajas vueltas, se puede dar avante muy poca, usando mucho menos

⁷ Valor estimado en base al aumento del consumo de combustible medido en el barco, cuando se pasa de girar en vacío a dar avante con el motor a ralentí.

energía que el motor diésel. El motor del Manuelak consume 2,5 l a régimen de ralentí (800 rpm), girando en vacío. La mayor parte se gasta en vencer los rozamientos del propio motor y de los engranajes de la reductora, aunque no esté embragada, lo que supone 2 litros de combustible y aproximadamente 3kw. El medio litro restante se emplea en accionar la bomba de agua y la bomba hidráulica, que consumen 1 kw aprox. Cuando se da marcha avante, se inyecta un poco más de combustible para obtener los kw extra que hacen falta para mover la hélice. La hélice no puede girar a menos de 180 rpm, ya que el régimen mínimo del motor son 800 rpm y la transmisión tiene una reducción de 4,5:1. Hacen falta aproximadamente 2 kw para mover la hélice a dicha velocidad.

Estos 2 kw son los únicos empleados para mover el barco y realmente hacen falta menos, ya que habitualmente se larga a 1,5 nudos usando la marcha lenta, es decir, menos de la mitad de la velocidad normal de ralentí. Por tanto, se puede estimar que sólo hace falta 1kw para mover el barco.

Realizando el mismo cálculo que hemos hecho antes para obtener el consumo medio de gasóleo, pero con la potencia, se obtiene una demanda media de 0,67kw durante las maniobras de largada y virada.

En la navegación tampoco se aprovecha el 100% de los 27,5 kw generados por el motor, a 1.500 rpm y 6,5 nudos. Este valor se deriva de las curvas de potencia y estas se refieren a la potencia de salida del motor, medida en el volante, antes de la reductora y la línea de ejes. Para cuando la potencia llega a la hélice ya se ha perdido un 10%, debido a los rozamientos de la transmisión y a la mayor potencia consumida por el caballo, que ahora produce más caudal en respuesta al aumento de revoluciones. Al final la demanda real se acerca más a los 25kw.

La tabla 6 muestra los consumos en kwh que se obtendrían instalando una propulsión eléctrica, tomando los dos valores anteriores como referencia.

CONSUMOS	NAVEGACIÓN	MANIOBRA	DIARIO	HORARIO	ANUAL
HORAS	1,66	3,33	5,00	1,00	1.000,00
CONSUMO POTENCIA kwh	25,00	0,67	43,73	8,75	8.746,22

Tabla 5 Consumos teóricos con un sistema de propulsión eléctrico.

3.4. SISTEMA DE PROPULSION PROPUESTO

3.4.1. MOTOR

Después de analizar estos datos se ha optado por instalar un propulsor pod de 50 KW comercializado por Fischer Panda de 1.200 rpm, que ofrece un par constante de 397 Nm en todo su rango. Está compuesto por un motor de corriente continua con imanes permanentes sin escobillas (BLDC) y tiene una eficiencia de 96%. Su peso es de 138 kg. Sus características se muestran al final de esta tercera parte, junto con las de las baterías.

3.4.2. BATERÍAS

3.4.2.1. Capacidad proyectada

Si dotamos al sistema con el doble de energía que la media diaria calculada anteriormente, podemos estar seguros de que el barco tendrá autonomía suficiente para salir a faenar sin problemas. Esto supone aproximadamente 90kwh. No obstante, interesa que las baterías tengan la mayor capacidad posible para aumentar el radio de acción del barco y reducir los ciclos de carga y descarga. Cuanto mayor sea la capacidad de las baterías con relación al consumo diario, más días se necesitarán para completar un ciclo y más fácil será mantenerlas siempre por encima del 10% de carga, aumentando su vida útil. El límite viene dado por el peso y el precio.

El sistema de propulsión del “Manuelak junto a los tanques de gasoil suman 1.500 kg aproximadamente (tabla 6). Cambiando todo el sistema por baterías del mismo peso se obtendrían 262kwh de capacidad, teniendo en cuenta que la densidad energética de las baterías elegidas es de 175 w/kg.

Se proyecta instalar 36 baterías de 200 Ah y 25 V de la serie HE del fabricante MG Energy Systems. Se instalarán dos paquetes de 18 baterías conectadas en serie y cada paquete conectado en paralelo, para alcanzar un voltaje de 450V y una capacidad de 180 kwh. Estas baterías están compuestas por celdas NMC 18650, tienen una vida útil de 3.000 ciclos y cada una pesa 28,6 kg. Las 36 baterías suman 1.030 kg.

En la tabla 6 de la siguiente página se muestran los pesos y momentos de todos los componentes del “Manuelak”, que se utilizarán para hacer los cálculos necesarios.

PESOS Y MOMENTOS

BUQUE EN ROSCA

ELEMENTO	PESO (kg)	VCG (m)	Mto. V (Kgm)
Casco	1264	0,58	733,12
Caseta	55	1,73	95,15
Piso y bañera	175	0,9	157,5
Armamento de casco	24	0,45	10,8
MAQUINARIA	964	0,36	347,04
Motor principal y reductora	790	0,36	
Bombas, etc	32	0,54	
Baterías, etc	63	0,45	
Tanques	47	0,23	
Tuberías, etc	32	0,18	
Hélice, bocina, eje	63	0,09	5,67
Instalaciones diversas	47	0,45	21,15
Halador	63	1,53	96,39
Electrónica	8	1,73	13,84
Palos y antenas	11	2,43	26,73
Pintura fondos	45	0,18	8,1
Margen y div.	75	0,45	33,75
Lastre	0	0,13	0
TOTAL	2794		1549,24

KG ROSCA 0,55 m

PLENA CARGA

Rosca	2.804	0,55	1542,2
Combustible	510	0,18	91,8
Aparejos	938	1,2	1125,6
Fondeo, amarres, etc	47	0,41	19,27
Tripulación	225	1,32	297
TOTAL	4.524		3075,87

KG Pl. carga 0,68 m

Tabla 6 Pesos y momentos obtenidos del libro de estabilidad.

3.4.2.2. Disposición

Las baterías tienen unas dimensiones de 361mm de largo, 355 de alto y 193 de ancho. Colocando 18 baterías juntas se forman dos paquetes de 3,500mm de largo, 355 de alto y 361 de ancho. El compartimento donde están el motor, reductora, ejes, bombas y depósitos tiene 4,20m de largo por 2,50 de ancho y suficiente altura en las bandas, por lo que no hay problema de espacio.

Se retirará el motor principal, reductora, línea de ejes, bombas, tuberías, baterías, tanques principales de combustible, el depósito de aceite hidráulico y el tanque diario. En total se quita más peso del que se pone, disminuyendo el desplazamiento en 410 kg.

PESO SUSTRADO (kg)		PESO AÑADIDO (kg)	
MAQUINARIA	964	BATERIAS	1030
EJE	35	PROPULSOR POD	138
TKs PRINCIPALES	502	CARGADOR	35
TK ACEITE HIDRÁULICO	60	CONTROL, CABLES, ETC	8
TK DIARIO	60		1.211
TOTAL	1.621		
			1.621
			-410

Tabla 7 Balance de pesos

El centro de gravedad de los paquetes de baterías tiene que quedar por debajo del que tenía la maquinaria en su conjunto, para contrarrestar la pérdida de estabilidad que suponen los 410 kg que se han quitado de la parte baja del barco. Su posición se ha calculado para que se respeten los criterios de estabilidad establecidos en situación de plena carga, pues precisamente esta es la peor para este tipo de barcos. El “Manuelak” cargado de nasas acumula casi una tonelada sobre cubierta, subiendo el centro de gravedad considerablemente, ya que estas, además, se estiban apiladas unas encima de otras.

En esta situación el KG original del “Manuelak” es de 0,68m (tabla 6) y para respetar ese valor se ha calculado que el centro de gravedad de los paquetes de baterías tiene que quedar 20 cm sobre la línea base. Teniendo en cuenta su altura de 355mm, el centro de gravedad estará aproximadamente a 17,75 cm de su propia base, por lo que las baterías se montarán sobre unos tacos de 2,5 cm. Colocando las baterías de esta forma el KG en plena carga se mantiene y en rosca disminuye 8 cm respecto del original, como muestra la tabla 8.

Los dos paquetes de baterías instalarán en las bandas, uno a cada lado de la quilla, que es hueca y forma la cala, de manera que los pesos queden equilibrados transversalmente y se pueda acceder a la sentina. Nos quedarán 70 cm de juego para mover los paquetes en sentido longitudinal hasta dejar el barco en aguas iguales.

BUQUE EN ROSCA

	PESO (kg)	VCG (m)	Mto. V (Kgm)
Casco	1.264	0,58	733,12
Caseta	55	1,73	95,15
Piso y bañera	175	0,9	157,5
Armamento de casco	24	0,45	10,8
BATERÍAS	1.030	0,2	206
PROPULSOR POD + HÉLICE	160	0	0
Instalaciones diversas	47	0,45	21,15
Halador	63	1,53	96,39
Electrónica	8	1,73	13,84
Palos y antenas	11	2,43	26,73
Pintura fondos	45	0,18	8,1
Margen y div.	75	0,45	33,75
Lastre	0	0,13	0
TOTAL	2957		1.402,53

KG ROSCA 0,47

PLENA CARGA

Rosca	2.957	0,48	1.402,53
Combustible	0	0,18	0
Aparejos	938	1,2	1125,6
Fondeo, amarres, etc	47	0,41	19,27
Tripulación	225	1,32	297
TOTAL	4.167		2.844,4

KG PL. CARGA 0,68

Tabla 8 KG en rosca y con plena carga después de instalar las baterías y el propulsor pod.

3.5. RENTABILIDAD

Actualmente el costo de adquisición de un sistema de propulsión eléctrico es muy elevado en comparación a uno tradicional, pero este sobrecosto se amortiza a medio plazo, debido al ahorro de combustible y en mantenimiento. En este apartado se va a calcular el ahorro a medio plazo que supone implementar un sistema de propulsión eléctrico frente a uno tradicional.

Para hacer un cálculo lo más preciso posible del ahorro, hay que corregir el consumo diario de energía, que es un poco mayor del calculado, puesto que los sistemas eléctricos también tienen pérdidas.

En realidad, el motor BLCD se alimenta con corriente pulsada, por lo que hay que instalar una fuente de alimentación conmutada (SMPS, por sus siglas en inglés), para modular la corriente ofrecida por las baterías y generar los pulsos con los que alimentar el motor. Su eficiencia ronda el 92%.

La degradación de las baterías también reducirá su rendimiento, pero según el fabricante en los primeros 2.000 ciclos no bajará del 95% y llegará hasta los 3.000 por encima del 75%. Cuando lleguen al 70% termina su vida útil. Por tanto, se va a estimar un rendimiento medio de 98% durante los primeros 2.000 ciclos.

Por último, el motor BLCD montado en el pod, que tiene un rendimiento del 96%.

La eficiencia de todo el sistema es de **86,6%** ($0,95 \times 0,95 \times 0,96$).

Tomando en cuenta este valor, hay que consumir 50,5 kwh al día para poder obtener los 43,3 kwh previamente calculados. Multiplicando esa cantidad por 200 se obtiene el consumo anual, que son 10.100 kwh.,

Por otra parte, esto equivale a 56,1 ciclos completos de carga y descarga, dado que las baterías tienen 180 kwh de capacidad, por lo que hacen falta 35 años para completar 2.000 ciclos.

Los motores de combustión de 100-500kw tienen una vida media de 25.000 horas, lo que equivaldría a 25 años en este caso. En ese tiempo es normal haber realizado dos o tres reparaciones de importancia, como asientos de válvulas, cambio de turbo o reacondicionamiento de la bomba de inyección, pero estos gastos no se van a tener en cuenta, sólo los referidos exclusivamente al mantenimiento. El sistema eléctrico no tiene gastos apreciables de este tipo, por lo que no se consideran.

El litro de gasoil B para pesca, que está subvencionado, ha rondado los 0,45€/l este año, pero es muy probable que en menos de 5 años se deje de subvencionar, debido a las nuevas leyes que vienen de Europa. Por esto se han hecho dos cálculos de gasto, el primero considerando 0,45€ por litro y el segundo 1,21€, el valor medio en lo que llevamos de año.

En cuanto a la electricidad, el precio medio del kwh es de 0,1€, contando peajes de abastecimiento y acceso a la red, pero también se ha calculado el gasto en caso de estar subvencionado en la misma medida, esto es, a 0,04€.

El gasto de mantenimiento que se muestra en las tablas es el total y es el que se ha venido realizando los últimos años, sin contar averías. Un resumen más detallado de estos gastos se encuentra en la tabla 12, al final de esta parte.

En la comparación de gastos de adquisición se añaden el coste del halador eléctrico, la bomba de agua y el cargador de baterías en el sistema eléctrico y el coste de la instalación de una hélice transversal en el tradicional. El precio del motor y reductora se han basado en el del Volvo Penta D7A/TA con reductora ZF280, que cuesta 45.387 €. Los precios de la hélice de proa, el halador eléctrico y la bomba de agua mostrados también se corresponden a modelos del mercado. En el caso de la hélice transversal se han añadido 4.000 € de gastos de ejecución.

Por último, se ha añadido el costo de un catalizador y su instalación. El catalizador va a ser obligatorio en breve, para reducir los NO_x. No hay ningún motor que supere las emisiones Tier III sin catalizador. La norma Tier III entró en vigor en enero de 2016, pero debido a razones económicas no pudo ser implantada y se reservó para las zonas ECA exclusivamente, posponiendo su implantación general hasta enero de 2021. La ley ya está en vigor, pero todavía sigue siendo muy difícil implantarla, ya que la instalación de un catalizador en un motor marino supone la mitad del coste del propio motor. Por otro lado, cada vez hay más zonas ECA, Francia está pidiendo una zona ECA para el Mediterráneo y se pide también para el Cantábrico y la costa de Portugal. Los puertos europeos también pasan a ser zonas ECA, de modo que hay que contar con ese gasto a corto plazo.

CAPEX

INSTALACIÓN PROP. ELÉCTRICA		INSTALACIÓN PROP. CONVENCIONAL	
36 BATERÍAS MGHE240200	91.802	MOTOR 7,5L 150 KW y REDUC.	45.000
MOTOR POD 50KW FP	23.977	CATALIZADOR	22.000
UNIDAD DE CONTROL	4.608	SIST. HÉLICE TRANSVERSAL	8.000
SMPS	877	MARCHA LENTA	3.000
CARGADOR BATERÍAS	2.832		
HALADOR	2.500		
BBA DE AGUA	700		
TOTAL	127.296	TOTAL	78.000
	-78.000		
	49.296		

Tabla 9 CAPEX propulsión eléctrica vs CAPEX propulsión tradicional.

OPEX 1

PROP. TRAD.		Anual	€/l	€
Consumo litros gasoil		5.000	0,45	2.250
Mantenimiento				2.244
				4.494

PROP. ELEC		Anual	€/kwh	€
Consumo kwh		10.100	0,1	1.010
				-1.010
				3.484

OPEX 2

PROP. TRAD.		Anual	€/l	€
Consumo litros gasoil		5.000	1,21	6050
Mantenimiento				2.244
				8.294

PROP. ELEC		Anual	€/kwh	€
Consumo kwh		10.100	0,1	1.010
				-1.010
				7.284

OPEX 3

PROP. TRAD.		Anual	€/l	€
Consumo litros gasoil		5.000	1,21	6050
Mantenimiento				2.244
				8.294

PROP. ELEC		Anual	€/kwh	€
Consumo kwh		10.100	0,04	404
				-404
				7.890

Tabla 10 Costos operacionales de los dos sistemas, en el primer caso contando con gasoil subvencionado, en el segundo sin subvencionar y en el tercero subvencionando la electricidad en lugar del gasoil.

RETORNO DE LA INVERSIÓN

	AHORRO ANUAL	AÑOS EQUIPARACION	AÑOS AMORTIZACION
OPEX 1	3.484,00	14,15	36,54
OPEX 2	7.284,00	6,77	17,48
OPEX 3	7.890,00	6,25	16,13
EQUIPARACIÓN	49.296,00		
AMORTIZACIÓN	127.296,00		

Tabla 11 Años hasta amortizar los gastos de adquisición

A la vista de los resultados, aun contando con gasóleo subvencionado, a los 14 años un sistema de propulsión diésel habrá costado lo mismo que uno eléctrico y a partir de ahí será mucho más caro, su consumo habrá aumentado, le tocará realizar reparaciones importantes y le quedará menos de la mitad de vida. Al sistema eléctrico todavía le quedarán 20 años de vida útil sin bajar apenas su rendimiento. El ahorro en tiempo y dinero, comparado con el sistema diésel, seguirá produciéndose y si sigue faenando otros 20 años, se habrá amortizado completamente.

Si el gasóleo no se subvenciona, cosa que parece cercana, instalar un motor diésel saldrá mucho más caro que instalar uno eléctrico, incluso a corto plazo; en menos de 7 años ambos habrán incurrido en los mismos gastos, pero a partir de ahí estos se dispararán para la propulsión diésel con relación al sistema eléctrico. El primero originará unos gastos anuales de casi 8.300€, mientras que el segundo apenas pasará de 1.000. Si la electricidad fuera subvencionada en la misma medida que el gasóleo lo es ahora, el gasto sería de 400 €.

GASTOS MANTENIMIENTO “Manuelak”

	CAMBIO/ EJECUCIÓN					GASTOS	
	250h	500h	anual	bianual	trianual	Precio unit. (€)	Gasto anual (€)
ACEITE	22L		100			6,2	620
ACEITE REDUCTORA		12,5L	25			14,79	369,75
ACEITE HIDRÁULICO			20		60L	8,3	166
FILTRO ACEITE MOTOR	1		4			24,8	99,2
F. ACEITE HIDRÁULICO			1			38,6	38,6
F. COMB. TK DIARIO		1	2			22,4	44,8
F.COMB. PRIMARIO	1		4			16,53	66,12
F.COMB. SECUNDARIO	1		4			36,4	145,6
FILTRO AIRE			1			48,4	48,4
REFRIGERANTE			10	20L		5,2	52
TOBERAS INYECTORES			3	6		100	300
REGLAJE DE VÁLVULAS			0,5	1		250	125
RODETE BBA A/S			1			48,4	48,4
LIMPIEZA ENFRIADORES			0,33		1	280	92,4
CORREAS			0,33		1	86	28,38
Gasto de mantenimiento anual							2.244,65 €

Tabla 12 Gastos de mantenimiento



Fischer Panda 50kW 420V 1200rpm drive

Technical specifications:

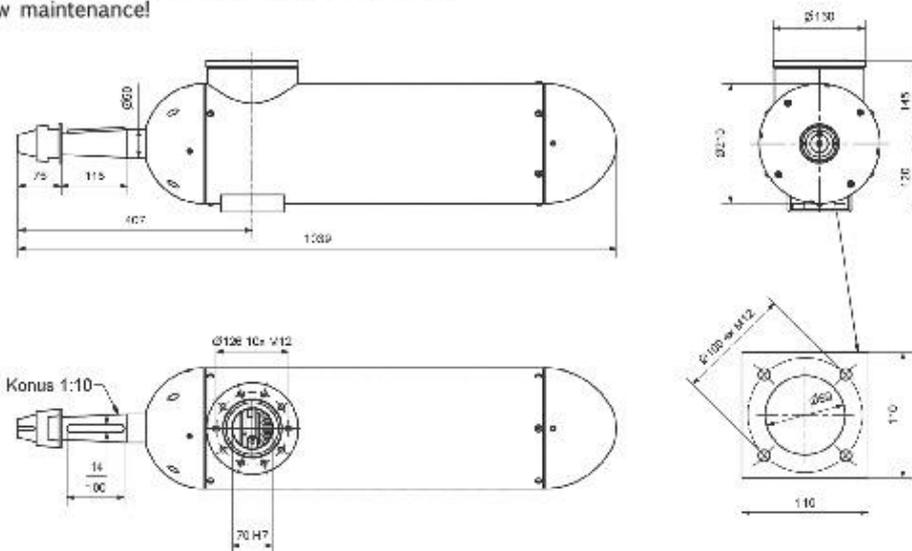
- Voltage: 420V
- Input power: 53 kW
- Shaft power: 50 kW
- RPM: 1200
- Nm: 397
- Weight: 138kg
- Art-No: 0022797

Our underwater motors are made of heavy duties and high quality V4A stainless steel, in addition, our 3-stage seal provides the highest level of safety. Our motors are without gear, brushless, sensorless and have no oil filling.

This makes our engines: durable, efficient and low maintenance!



Konus 1:10 suitable for standard propellers



Fischer Panda GmbH
 Otto - Hahn - Str.40
 33104 Paderborn
 Germany

contact person:
 Martin Mews
 Gerhard Hesse
 Marcel Schwarzenberg-U.

+49 5254 9202-350
 +49 5254 9202-238
 +49 5254 9202-352

mmews@fischerpanda.de
 ghese@fischerpanda.de
 mschwarzenberg@fischerpanda.de

Fig. 12 FP Electric Motor Pod AZ 50kw 120 rpm. Fischer Panda (2021).Products (imagen). Recuperado de https://elektrische-antriebssysteme.fischerpanda.de/wp-content/uploads/2020/11/Fischer_Panda_Electric_Motor_Pod_AZ_50kW_1200rpm.pdf

Technical specifications	MGHE240100 24 V / 100 Ah	MGHE240150 24 V / 150 Ah	MGHE240200 24 V / 200 Ah	MGHE240300 24 V / 300 Ah
Technology	Lithium-Ion NMC			
Cell configuration	7S32P	7S48P	7S64P	7S96P
Nominal voltage	25.2 V			
Nominal capacity	100 Ah	150 Ah	200 Ah	300 Ah
Nominal energy	2.5 kWh	3.7 kWh	5.0 kWh	7.5 kWh
Specific energy ¹	159 Wh/kg	167 Wh/kg	175 Wh/kg	182 Wh/kg
Weight	15.7 kg	22.4 kg	28.6 kg	41.5 kg
Cycle life ²				
DOD 75 % - Default mode	3000			
DOD 95 % - Performance mode	2000			
Discharge				
Discharge cut-off voltage	21.0 V			
Recommended discharge current	30 A (0.3 C)	45 A (0.3 C)	60 A (0.3 C)	60 A (0.2 C)
Continuous discharge current	100 A (1.0 C)	150 A (1.0 C)	200 A (1.0 C)	210 A (0.7 C)
Maximum discharge current ³	200 A (2.0 C)	300 A (2.0 C)	400 A (2.0 C)	450 A (1.5 C)
Internal fuses ⁴	150 A	250 A	300 A	
Charge				
Maximum charge voltage	29.4 V			
Recommended charge current	30 A (0.3 C)	45 A (0.3 C)	60 A (0.3 C)	60 A (0.2 C)
Continuous charge current	100 A (1.0 C)	150 A (1.0 C)	200 A (1.0 C)	210 A (0.7 C)
Maximum charge current ³	150 A (1.5 C)	225 A (1.5 C)	300 A (1.5 C)	300 A (1.0 C)
Configuration				
Series configuration	Yes, up to 16			
Parallel configuration	Yes, unlimited			
Redundant mode	Yes Using multiple Master BMSs			
Environmental				
Operating temperature charge	0 to +45°C			
Operating temperature discharge	-20 to +55°C			
Storage temperature	-20 to +45°C			
Humidity (non-condensing)	≤ 95 %			
Mechanical				
Power connections	M8 stud, max. 15 Nm			
IP-Protection class	IP20			IP40
Cooling	Air, forced (2x fan inside)			Air, convection (no fans)
Dimensions (l x h x w)	362x193x214 mm	362x193x284 mm	362x193x355 mm	366x193x497 mm
Safety				
Battery Management System	Integrated slave BMS			
Balancing	Passive			
Compatible BMS master	MG Master LV, MG Master HV ⁵			
Communication	CAN-Bus (RJ45 or M12 connection)			
Standards				
EMC: Emission	EN-IEC 61000-6-3:2007/A1:2011/C11:2012			
EMC: Immunity	EN-IEC 61000-6-1:2007			
Low voltage directive	EN-IEC 60335-1:2012/A11:2014			

¹ Including BMS and enclosure.

² End-of-Life is 70% of initial capacity at 25 °C.

³ Duration is depending on battery temperature.

⁴ Fuses can be replaced with dummy fuses for high power and high voltage applications. In this case the batteries need to be fused elsewhere in the circuit.

⁵ For systems >144 V, order the M12, HV version.

Fig. 13 Datos técnicos de las baterías serie HE. MG Energy Systems 2021.*HE Series*. Recuperado de <https://downloads.mgenergysystems.eu/api/v1/resources/5f5addaa-9c31-4e53-a697-2b1cc49612f5?inline=1>

CONCLUSIONES

Después de analizar lo expuesto en la primera parte y su anexo, queda meridianamente claro que nos encontramos ante una emergencia climática. Desgraciadamente no es algo muy evidente en el día a día, y nos ocurre como a los pasajeros del Titanic, que no se creían que semejante buque pudiera estar hundiéndose, pues en cubierta aparentemente todo seguía igual. Sin embargo, el ingeniero jefe ya sabía que el naufragio era inevitable y que apenas quedaban dos horas para que el barco se fuera a pique, ante la incredulidad del capitán.

Un barco con una vía de agua se puede mantener a flote siempre que achiquemos la misma cantidad de agua que entra y se mantenga el equilibrio, pero si por un instante nos despistamos y permitimos que entre más agua de la que achicamos, esta cantidad de más, por muy pequeña que sea, hará que el barco se sumerja un poco más, lo que provocará que el agua entre con algo más de presión y por tanto con un poco más caudal. A partir de este momento se rompe el equilibrio y aunque ya no paremos de achicar, el barco se irá sumergiéndose, lentamente al principio, pero más rápido cada vez, a medida que el agujero en el casco va quedando a más profundidad. Cada centímetro sumergido supone una mayor entrada de agua que a su vez provoca un mayor hundimiento del casco, repitiéndose el ciclo hasta que el barco se hunde. En realidad, el barco ya estaba sentenciado en el instante en el que nos despistamos y dejamos entrar un poquito más de agua de la que podíamos achicar.

Con el efecto invernadero ocurre lo mismo y es probable que nos hallemos en esa situación, pero no nos puede pasar lo mismo que a los pasajeros del Titanic. Estas dos horas pueden ser décadas en el caso de la Tierra, pero si no tomamos medidas ahora, luego será demasiado tarde. No podemos seguir contaminando la atmósfera de forma tan brutal sin pensar que ello no acarrea gravísimas consecuencias. Hay que dejar de quemar combustibles fósiles para propulsar nuestros buques y utilizar otros medios más respetuosos con el medio ambiente. Podemos hacerlo y debemos hacerlo.

Una de esas medidas pasa por eliminar los motores de combustión, que se pueden sustituir por máquinas que los superan en todos los sentidos, como son los motores eléctricos. Podemos alimentarlos con baterías en aquellas embarcaciones que no necesitan una gran autonomía y con celdas de combustible e hidrógeno en aquellas que sí.

Hasta ahora parecía imposible iniciar esta transición, debido principalmente a la oposición de las grandes petroleras y navieras, que no están dispuestas a asumir el coste económico de la reconversión. Sin embargo, en 2020 hemos sido capaces de adoptar medidas muy costosas para frenar el coronavirus, con enormes pérdidas incluso para petroleras y navieras, quienes no han tenido otro remedio que acatarlas y no ha pasado nada. Por tanto se puede hacer, al fin y al cabo se trata de adoptar medidas menos costosas ante un problema mucho mayor.

En la tercera parte del presente trabajo se ha demostrado que un sistema de propulsión eléctrica además de sostenible puede ser más económico a medio plazo que uno diésel, incluso con el gasóleo subvencionado. Resulta difícil entender por qué no se toma este camino, pero es obvio que se necesitan regulaciones más contundentes en cuanto a emisiones y un plan general que tenga en cuenta todos los aspectos para acelerar esta transición.

No se trata únicamente de obligar a los armadores a que electrifiquen sus buques, dejando que todo el esfuerzo recaiga en ellos. Tiene que haber ayudas estatales para el sector o, mejor dicho, hay que desviar las existentes hacia la implantación progresiva de sistemas de propulsión eléctricos. Probablemente bastaría con dejar de subvencionar el gasoil y usar ese dinero para la electrificación.

Otro aspecto muy importante es el de la educación; las escuelas náuticas tienen que preparar a los futuros profesionales del sector en el diseño, mantenimiento y reparación de los sistemas eléctricos de propulsión, además de tener la obligación moral de concienciar a los alumnos sobre el peligro que supone continuar con la quema masiva de combustibles fósiles.

BIBLIOGRAFÍA

- Bruce, J.P., Lee, H. y Haites, E.F. (1996). *Climate Change 1995* (informe nro. 2). (Cap. 3). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Cenzano, J.M., Castillo, I.C. y Madrid Vicente, A. (2020). *El hidrógeno y las pilas de combustible como fuente energética: manual técnico*. España. AMV Ediciones.
- Conte de los Ríos, A. y Pelegrín García, J.D. *Utilización de Baterías de litio en Submarinos*. Recuperado de <https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2020/07/rgmjul20cap04.pdf>
- Durkin, M. (Prod.), y Durkin, M. (Dir.). (2007). *The Great Global Warming Swindle* [Documental]. Reino Unido: WAG TV
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Minx, J.C., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., Von Stechow, C. y Zwickel, T. (2014). *Climate Change 2014* (informe nro. 5). (Cap. 3). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Enriquez Harper, G. (2002). *Control de motores eléctricos* (1.ª ed.). Mexico. Limusa.
- Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J. y Mastrandrea, M.D. (2014). *Climate Change 2014* (informe nro. 5). (Cap. 2). Reino Unido: Cambridge University Press.
- García, N. (2021, junio 09). Naval Group apuesta por las baterías de litio para mejorar las capacidades de los submarinos: La tecnología LIBRT puede ser integrada en submarinos en servicio como nuevos. *Infodefensa*. Recuperado 10 junio 2021, de <https://www.infodefensa.com/latam/2021/06/09/noticia-naval-group-apuesta-baterias-litio-mejorar-capacidades-submarinos.html>
- Gill, A. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics: International Geophysics Series* (1a ed.) Londres, Oxford, Boston, Nueva York y San Diego: Academic Press.
- Gómez Suárez, I. (2020). *Mantenimiento electromecánico de motores eléctricos*. España. Paraninfo.
- Grupo De Trabajo III. (1990). *Climate Change* (informe nro. 1). (Cap. 3).
- Grupo De Trabajo III. (2001). *Climate Change 2001* (informe nro. 3). (Cap. 3).
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van Der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. y Johnson, C.A. (2001). *Climate Change 2001* (informe nro. 3). (Cap. 1). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Houghton, J.T., Jenkins G.J. y Ephraums, J.J. (1990). *Climate Change* (informe nro. 1). (Cap. 1) Reino Unido: Cambridge University Press.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. y Maskell, K. (1996). *Climate Change 1995* (informe nro. 2). (Cap. 1). Reino Unido: Cambridge University Press.
- International Maritime Organization. (2021). Fourth IMO Greenhouse Gas Study. Recuperado de <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>
- La pila de hidrógeno: ¿Es el hidrógeno el combustible del futuro?. Recuperado 10 junio 2021, de <https://www.energyavm.es/la-pila-de-hidrogeno-es-el-hidrogeno-el-combustible-del-futuro/>
- Lawson, H. (Prod.), y Lawson, H. (Dir.). (1990). *The Greenhouse Conspiracy* [Documental]. Reino Unido: TVF
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera, BOE núm. 275 (2007).

- López Arenales, J.C. *Motores Eléctricos*. Recuperado de <https://www.coursehero.com/file/57158715/Motores-electricospdf/>
- Mártel, I. (2019, febrero 21). Funcionamiento de una batería de ion-litio [Entrada Blog]. Recuperado de <https://blogs.cdecomunicacion.es/ignacio/2019/02/21/funcionamiento-de-una-bateria-de-ion-litio-pros-y-contras/>
- McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. y White, K.S. (2001). *Climate Change 2001* (informe nro. 3). (Cap. 2). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R. y Meyer, L. (2007). *Climate Change 2007* (informe nro. 4). (Cap. 1). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Nieto Vilardell, E. (2015). *Fuentes de Alimentacion Conmutadas En La Pratica: Que Son, Como Funcionan, Como Se Reparar* (1.^a ed.). Createspace.
- Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., Van Der Linden, P. y Hanson, C. (2007). *Climate Change 2007* (informe nro. 4). (Cap. 3). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Roldán Viloria, J. (2005). *Motores Eléctricos: Accionamiento de Máquinas. 30 Tipos de Motores* (4.^a ed.). España. Paraninfo.
- Sample, I. (2007, febrero 02). Scientists offered cash to dipute climate study. *The Guardian*, noticias medio ambiente.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M.M.B., Miller, H.L.Jr. y Chen, Z. (2007). *Climate Change 2007* (informe nro. 4). (Cap. 2). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P.M. (2013). *Climate Change 2013* (informe nro. 5). (Cap. 1). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Tegart, WJ.McG., Sheldon G.W. y Griffiths, D.C. (1990). *Climate Change* (informe nro. 1). (Cap. 2). Australia: AGPS Press.
- Vidal, J. (2009, abril 09). Health risks of shipping pollution have been `underestimated´. *The Guardian*, noticias medio ambiente.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H. y Dokken, D.J. (1996). *Climate Change 1995* (informe nro. 2). (Cap. 2). Reino Unido: Cambridge University Press.

ANEXO I

1. CALENTAMIENTO GLOBAL Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

1.1. BALANCE ENERGÉTICO DE LA TIERRA Y EFECTO INVERNADERO

Por puro sentido común, a nada que nos paremos a pensarlo, en seguida concluiremos que para que la temperatura media de la Tierra se mantenga constante, esta ha de radiar al espacio el mismo calor que recibe del Sol, puesto que, si la radiación entrante fuese mayor que la radiación saliente se produciría un calentamiento, mientras que lo contrario produciría un enfriamiento. Por lo tanto, en equilibrio, la radiación solar absorbida por la Tierra ha de estar compensada por la radiación infrarroja que esta emite al espacio. Cualquier alteración de este balance energético, ya sea por causas naturales o antrópicas, supone una alteración del clima.

La radiación solar es una forma de energía que al llegar a los planetas calienta la superficie de los mismos, pero estos a su vez, por el mero hecho de adquirir cierta temperatura emiten calor al espacio en forma de radiación, ya que cualquier objeto que se encuentre por encima del cero absoluto emite radiación electromagnética. La longitud de onda dependerá de la temperatura del objeto, siendo menor cuanto mayor sea su temperatura. El Sol, al tener una temperatura muy elevada, emite una radiación de onda muy corta, dentro del rango de la luz visible y la ultravioleta. Los planetas, sin embargo, emiten dicha radiación electromagnética en forma de “luz” infrarroja, ya que adquieren una temperatura mucho menor que la del Sol.

Por lo tanto, cualquier planeta se irá calentando hasta que la energía emitida en forma de radiación infrarroja se equipare exactamente con la energía recibida por la radiación solar, momento en el que se llega al equilibrio térmico. La temperatura a la que se alcanza dicho equilibrio es muy fácil de calcular usando algo de física básica:

La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro que se halle por encima del cero absoluto emite radiación térmica con una potencia emisiva por unidad de superficie proporcional a su temperatura elevada a la cuarta potencia:

$$E = S \times T^4$$

Donde E es la potencia emisiva superficial o flujo energético, es decir, energía por unidad de tiempo por unidad de superficie (julios por segundo por metro cuadrado o vatios por metro cuadrado, W/m^2), T es la temperatura absoluta en grados kelvin y σ la constante de Stefan-Boltzmann:

$$S = 5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$$

Por tanto, considerando la temperatura de la superficie solar del orden de los $6.000^\circ K$, se puede obtener la potencia o el flujo de energía emitida por metro cuadrado:

$$E = 5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4} \cdot 6.000^4 = 73,5 \cdot 10^6 Wm^{-2}$$

Para obtener la potencia emisiva total sólo hay que multiplicar esta cantidad por la superficie solar. Teniendo en cuenta que el radio solar es de $6,47 \times 10^8$ m,

$$P = (\text{energía}/m^2) \cdot (\text{superficie solar}) = 73,5 \cdot 10^6 \cdot (4\pi r^2) = 3.865 \cdot 10^{26} W$$

Esta energía se emite de forma homogénea en todas direcciones, formando una esfera cada vez mayor a medida que se aleja del Sol. Para cuando llega a la Tierra el radio de esa esfera es aproximadamente de 150 millones de kilómetros, la distancia media Tierra-Sol. Dividiendo la potencia emisiva total por la superficie de esta esfera se obtiene el flujo promedio de la energía solar (flujo energético medio) que llega a la Tierra, que se conoce como la constante solar.

$$K_s = \frac{3.865 \cdot 10^{26} W}{4\pi \cdot (150 \cdot 10^9 m)^2} = 1.367 Wm^{-2}$$

Actualmente los satélites han medido directamente el flujo de energía que llega a la Tierra en forma de luz solar y aunque el valor arrojado varía ligeramente con el tiempo, normalmente se halla muy cercano a los 1.361 vatios por metro cuadrado⁸.

La potencia emisiva captada por la Tierra, es decir, la cantidad de luz interceptada es el producto de la constante solar por la sección eficaz de la Tierra, que matemáticamente corresponde a un disco con el radio de la misma.

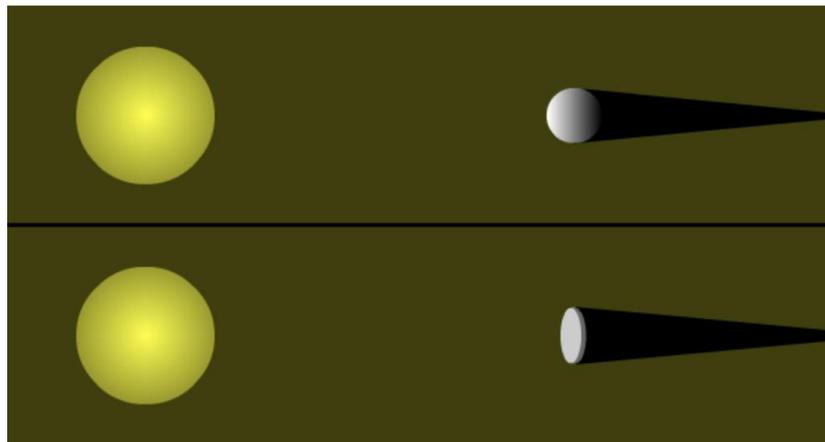


Fig. 14 Una esfera intercepta la misma cantidad de luz (radiación) que un disco del mismo diámetro. Recuperado de https://scied.ucar.edu/sites/default/files/images/long-content-page/solar_insolation_planet_sphere_disk

Por lo tanto, la potencia emisiva interceptada por la Tierra es:

$$P_{\text{interceptada}} = 1.361 \cdot \pi r_T^2 = 1,7355 \cdot 10^{17} W \text{ (173,55 billones de kW)}$$

$$r_T = 6.371.000 m$$

⁸ Mediciones realizadas por el satélite SORCE de la NASA, lanzado en junio del 2003

Teniendo en cuenta que la Tierra gira y que por tanto la radiación solar se reparte en toda la superficie, podemos saber el flujo energético interceptado por unidad de superficie.

$$E_{\text{interceptado}} = \frac{1.361 \cdot \pi r_T^2}{4\pi r_T^2} = \frac{1.361}{4} = 340,25 \text{ Wm}^{-2}$$

Como la Tierra no es completamente negra, parte de esta energía incidente es reflejada y no es absorbida por nuestro planeta. El termino *albedo* describe el porcentaje de luz reflejada por una superficie respecto del total incidente. Un planeta totalmente cubierto de nieve o hielo tendría un albedo cercano al 100%, mientras que uno totalmente negro tendría un albedo cercano al 0%. La Tierra tiene un albedo del 30% y por tanto el flujo energético absorbido por la Tierra es el siguiente:

$$E_{\text{absorbido}} = 340,25 \text{ Wm}^{-2} \cdot (1 - 0,30) = 238,2 \text{ Wm}^{-2}$$

Sabemos que los flujos energéticos absorbidos y emitidos por la Tierra han de ser iguales en el equilibrio térmico y que la temperatura en la que se alcanza dicho equilibrio está relacionada con el flujo energético emitido según la ley de Stefan-Boltzmann, por lo que podemos calcularla:

$$E_{\text{absorbido}} = E_{\text{emitido}} = 238,2 \text{ Wm}^{-2}$$

$$E_{\text{emitida}} = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{E_{\text{emitida}}}{\sigma}}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{238,2 \text{ Wm}^{-2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}}} = 254,6 \text{ K} = -18,4 \text{ °C}$$

1.1.1. EFECTO INVERNADERO

Está claro que la temperatura calculada no se corresponde con la temperatura media de la Tierra, que ronda los 14,5°C. Esto es así porque en el cálculo no se ha tenido en cuenta el efecto invernadero de la atmósfera, que es capaz de absorber parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie de nuestro planeta y reemitirla de vuelta al suelo, produciendo un calentamiento de aproximadamente 33°C.

Si excluimos el vapor de agua, cuya concentración en la atmósfera es muy variable, el aire seco es una mezcla de gases que prácticamente está compuesto por nitrógeno (~78,1%), oxígeno (~20,9%) y argón (~0,93%).

Sin embargo, los únicos gases capaces de absorber la radiación infrarroja en esta mezcla son unos gases muy minoritarios que se encuentran en el 0,07% restante, siendo el dióxido de carbono el más abundante (0,04%). No obstante, hay que recordar que la atmósfera además contiene vapor de agua, que también absorbe la radiación infrarroja emitida por la Tierra y cuya concentración aun siendo muy variable es muy superior a la del dióxido de carbono por lo que es, de hecho, el gas de efecto invernadero más importante. El dióxido de carbono es el segundo, seguido del metano, el ozono troposférico, el óxido nitroso y los gases fluorados.

Los GEI tienen la propiedad de que sus moléculas poseen momento dipolar, por el hecho de que unos átomos dentro de la molécula atraen los electrones con más fuerza que otros. Esto significa que las fuerzas de atracción que ejercen sobre los electrones de las órbitas compartidas también lo son, de manera que una parte de la molécula es ligeramente positiva y la otra ligeramente negativa. Si la molécula vibra, el minúsculo campo eléctrico existente comienza a oscilar y a emitir radiación. Cuando las moléculas de los GEI son golpeadas por los fotones infrarrojos y por tanto a un ritmo igual a la frecuencia infrarroja, comienzan a vibrar con esa misma frecuencia, de manera que la radiación emitida también es infrarroja. El resultado es que los GEI son capaces de absorber la radiación infrarroja proveniente del suelo y reemitirla en todas direcciones⁹. Pero, además, la vibración que sufren sus moléculas se transmite al resto de las que forman el aire mediante colisiones moleculares, generando calor y aumentando su temperatura.

Por contra, las moléculas de los principales gases que constituyen alrededor del 99,93% de la atmósfera (N₂, O₂ y Ar), son totalmente simétricas¹⁰, por lo que los átomos que las componen tienen exactamente la misma carga eléctrica y carecen de momento dipolar. Esto les impide

ppmv: partes por millón por volumen	
Gas	Volumen
nitrógeno (N ₂)	780.840 ppmv (78,084 %)
oxígeno (O ₂)	209.460 ppmv (20,946 %)
argón (Ar)	9.340 ppmv (0,934 %)
dióxido de carbono (CO ₂)	400 ppmv (0,04 %)
neón (Ne)	18,18 ppmv (0,001818 %)
helio (He)	5,24 ppmv (0,000524 %)
metano (CH ₄)	1,79 ppmv (0,000179 %)
kriptón (Kr)	1,14 ppmv (0,000114 %)
hidrógeno (H ₂)	0,55 ppmv (0,000055 %)
óxido nitroso (N ₂ O)	0,3 ppmv (0,00003 %)
xenón (Xe)	0,09 ppmv (9x10 ⁻⁶ %)
ozono (O ₃)	0,0-0,07 ppmv (0 % a 7x10 ⁻⁶ %)
dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0,02 ppmv (2x10 ⁻⁶ %)
yodo (I)	0,01 ppmv (1x10 ⁻⁶ %)
monóxido de carbono (CO)	0,1 ppmv
amoníaco (NH ₃)	trazas
Excluido por ser aire en seco	
agua (vapor) (H ₂ O)	-0,40 % a nivel atmosférico, en superficie: 1 %-4 %

Fig. 15 Componentes de la atmósfera. Wikipedia (2018) Atmósfera terrestre. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera_terrestre#:~:text=L%20principales%20gases%20que%20la,movimientos%20din%C3%9camos%20est%C3%A1n%20estrechamente%20relacionados.

⁹ Una descripción muy detallada de este proceso se encuentra en el capítulo IV del libro de David Archer *Global Warming: Understanding the Forecast*

¹⁰ El Argón no es una molécula sino un átomo que no comparte sus electrones con ningún otro y precisamente por eso carece de momento dipolar.

interactuar con la radiación infrarroja, que las atraviesa sin ejercer ningún efecto apreciable sobre ellos, por lo que no intervienen en el efecto invernadero.

1.1.1.1. Gases de efecto invernadero (GEI)

1.1.1.1.1. Vapor de agua (H₂O)

Es el principal gas de efecto invernadero y el más abundante, con una concentración media¹¹ en la atmósfera que ronda el 1%, aunque puede variar desde un 0,01% hasta un 5%. Si bien absorbe casi todo el espectro de la radiación infrarroja, las longitudes de onda comprendidas entre los 8 y los 18 μm se le escapan, dejando una ventana que aun siendo muy estrecha deja pasar una gran parte del calor emitido por la superficie, ya que esta, pese a emitir radiación en casi todo el espectro infrarrojo, presenta un pico de máxima emisión precisamente en ese rango.

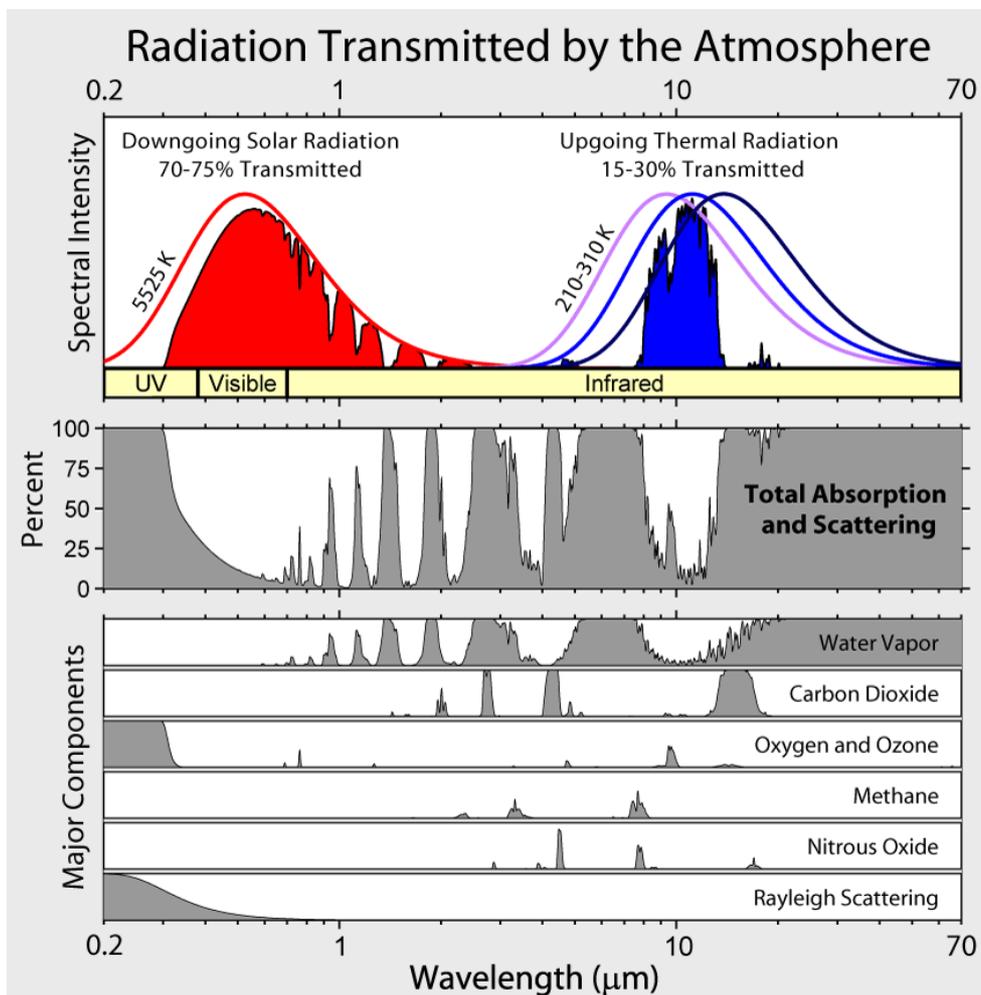


Fig. 16 Absorción de las bandas de frecuencia por la atmósfera.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png

¹¹ Dato obtenido de los parámetros terrestres publicados por la NASA.
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>

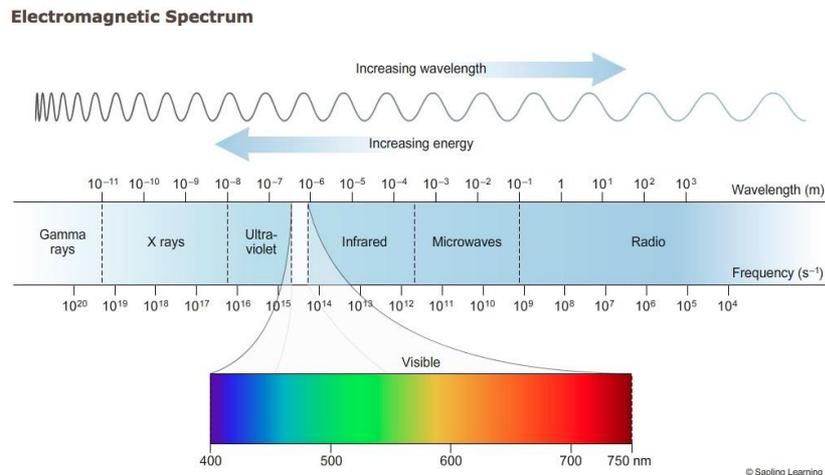


Fig. 17 Espectro electromagnético. Recuperado de <https://sites.google.com/site/chempendix/em-spectrum>

Aunque diversos estudios sitúan la contribución del vapor de agua al efecto invernadero entre un 36 y un 72%, dado que su concentración en la atmósfera depende de la temperatura, los científicos lo consideran un amplificador del calentamiento global y no un causante del mismo. Ocurre que cuanto más alta es la temperatura, mayor es la evaporación de los océanos, lagos, ríos y plantas y mayor es también la capacidad del aire de absorber este vapor, por lo que su concentración aumenta, que a su vez produce un mayor efecto invernadero. Es decir, el aumento de la concentración de vapor de agua en la atmósfera es consecuencia del incremento de la temperatura y no al revés. Además, a diferencia del resto de los GEI emitidos a la atmósfera, el vapor de agua tiene un ciclo muy corto, no llegando a permanecer más de 10 días en la misma antes de condensarse y volver a caer a la superficie. Ese hecho impide que se vaya acumulando en la atmósfera y hace que su concentración no dependa de las emisiones pasadas, ya sean antrópicas o naturales, sino de la temperatura del momento.

1.1.1.1.2. Dióxido de Carbono (CO₂)

Es el principal gas de efecto invernadero antrópico y el más abundante después del vapor de agua. Es cierto que hay una gran variedad de fuentes naturales que emiten CO₂, como las actividades volcánicas o la respiración aeróbica de plantas y animales, pero su concentración en la atmósfera ha estado regulada por el ciclo de circulación natural del carbono entre la propia atmósfera, los océanos, el suelo, las plantas y los animales, manteniéndose constante durante cientos de miles de años. Sin embargo, la actividad humana ha alterado este ciclo tanto incrementando las emisiones a la atmósfera como mermando la capacidad de los dos sumideros naturales que son los bosques y los océanos¹², de forma que su concentración en la atmósfera ha aumentado un 44%, desde las 280 ppm (0,0280%) de la era preindustrial al valor actual¹³ de 403

¹² Los primeros debido a la deforestación y los segundos debido al aumento de su temperatura, que disminuye su capacidad de absorción y a la disminución del plancton y de los corales, que absorben el carbono disuelto en el agua.

¹³ Extraído del último informe anual de la organización meteorológica mundial, correspondiente a 2016. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-concentrations-surge-new-record>

ppm (0,0403%)¹⁴. Este incremento se debe a la quema de los combustibles fósiles, que contribuyen en más de un 90% a las emisiones antrópicas de CO₂. Tienen un factor de emisión medio de 3 kg de CO₂ por cada kilogramo de combustible quemado. En 2.016 se consumieron algo más de 10 Gtep¹⁵, lo que supone una emisión a la atmósfera de más de 30 gigatoneladas de CO₂. Estas emisiones masivas, que superan con creces a las emisiones naturales, unidas al hecho de que la vida media del CO₂ en la atmósfera es de unos 100 años, salvo un 40% que persiste durante más de mil¹⁶, han originado que la naturaleza ya no pueda mantener los niveles de concentración del dióxido de carbono en la atmósfera y se esté produciendo una acumulación del mismo.

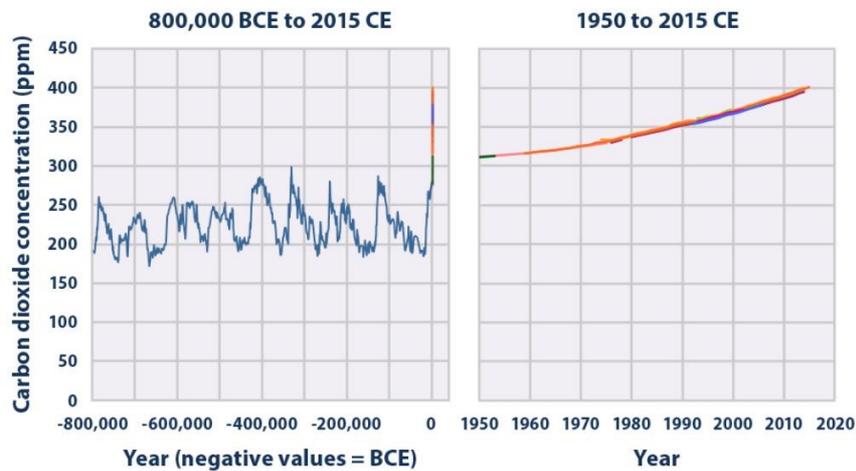


Fig. 18 Concentración de CO₂ en ppm, desde cientos de miles de años atrás hasta el 2015. Los datos históricos se han obtenido del análisis de los núcleos de hielo del Ártico y los más recientes de las estaciones que monitorizan el aire a lo largo del planeta. Las líneas de diferente color representan distintas fuentes de datos. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>

El CO₂ tiene la particularidad de absorber el calor en varios segmentos del espectro infrarrojo que se le escapan al vapor de agua (fig.16), entre ellos el de las longitudes de onda que van de los 13 a los 18µm. Por tanto, un aumento de la concentración de CO₂ produce una absorción extra por parte de la atmósfera que hace que el aire se caliente un poco más y pueda contener más vapor de agua, que a su vez produce un aumento del efecto invernadero bastante mayor que el pequeño calentamiento originado por el aumento de CO₂. Podríamos decir que, si el vapor de agua es el “Popeye” del efecto invernadero, el CO₂ son las espinacas.

¹⁴ Este capítulo se realizó en 2017-2018, según la Organización Meteorológica Mundial la concentración media en 2020 fue de 415ppm. Mediciones de la NOAA en enero de 2021 arrojaron resultados de 419ppm, suponiendo un aumento mayor del 49,7% desde la era preindustrial, un 5% más en menos de 5 años. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

¹⁵ Toneladas equivalentes de petróleo. Datos obtenidos del informe energético de la Agencia Internacional de Energía. En el informe de 2020, referidos al año 2018 se reportaron unas emisiones de CO₂ de casi 40 gigatoneladas.

¹⁶ Datos recogidos del Quinto Informe del IPCC.

1.1.1.1.3. Metano (CH₄)

Antes de la industrialización, el metano presente en la atmósfera provenía de la descomposición bacteriana de los residuos orgánicos, siendo los pantanos las fuentes emisoras más importantes. Sin embargo, actualmente más del 60% de las emisiones de este gas son antrópicas, siendo las cuatro fuentes principales la extracción de combustibles fósiles, debido a las emisiones que se producen durante la misma; la ganadería, debido a la digestión de las más de 2.500 millones de cabezas de ganado existentes en la actualidad; la agricultura, por la actividad bacteriana en los arrozales y por último las emisiones producidas durante el tratamiento de las basuras y aguas residuales. Esto ha originado que la concentración actual del metano en la atmósfera sea de 1.8¹⁷ ppm, un 260% más que en la era preindustrial. Aunque hay aproximadamente 220 veces más dióxido de carbono que metano, su potencial de calentamiento global en un periodo de 20 años (GWP₂₀ por sus siglas en inglés) es 68 veces mayor, lo cual significa que el calentamiento global producido por la emisión de una cantidad de metano a los 20 años será 68 veces mayor que el producido por la misma cantidad de CO₂, que se usa como referencia. Sin embargo, dado que la persistencia en la atmósfera del metano es de 12 años, bastante menor que la del CO₂, en periodos más largos su impacto es menor, por lo que su potencial de calentamiento global baja a 23 si consideramos un periodo de 100 años, que normalmente es el periodo utilizado. Aun así, su GWP es lo suficientemente alto para que unido a la cantidad presente en la atmósfera, el metano sea considerado el segundo GEI antrópico más importante.

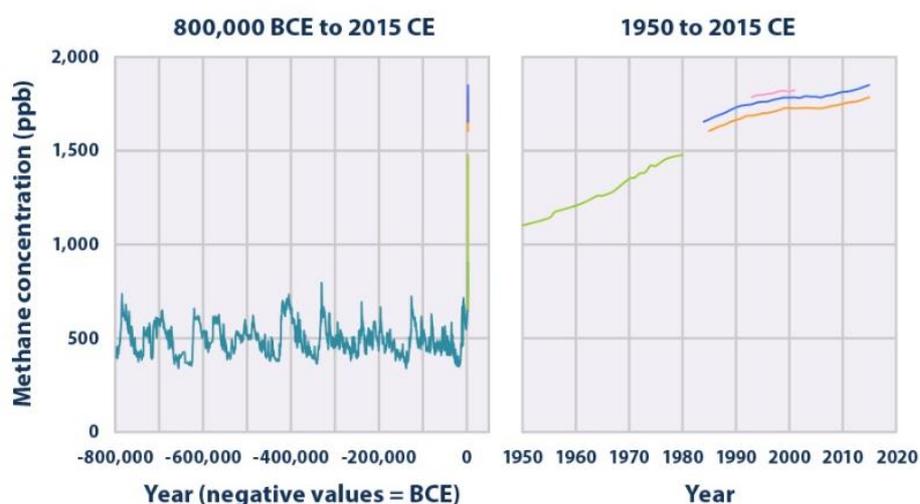


Fig. 19 Concentración de metano en partes por cada mil millones. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>

¹⁷ Las últimas mediciones de la NOAA en enero de 2021 situaron este valor en 1,9ppm, un 270% mayor que en la era preindustrial. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

1.1.1.1.4. Ozono troposférico (O_3)

El ozono es un gas que se forma y se descompone en la propia atmósfera, con una vida media muy breve, pudiendo ser desde unas pocas horas hasta una veintena de días. Es muy escaso, siendo su concentración media de 0,6 ppm. El 90% se encuentra en la estratosfera, es el llamado ozono “bueno” y se concentra en la capa del mismo nombre, entre los 15 y los 40 km de altura, con un valor de 2 a 8 ppm según la altura. Se crea a causa de la radiación ultravioleta, cuyas longitudes de onda más cortas y por tanto más energéticas son capaces de romper el enlace doble de las moléculas de oxígeno (O_2), disociando sus dos átomos, posibilitando que cada uno se pueda unir con otra molécula de oxígeno sin disociar, para crear dos moléculas de ozono (O_3). Sin embargo, sus enlaces son bastante más débiles que los del oxígeno, por lo que la radiación UV de onda más larga también es capaz de desprender un átomo de oxígeno de sus moléculas. Durante la noche, estos átomos sueltos reaccionan con las moléculas de ozono que aún perduran para volver a formar oxígeno ($O + O_3 = 2O_2$). Estas reacciones fotoquímicas deben mantenerse en equilibrio, es decir, se ha de crear tanto ozono como el que se destruye, para mantener constante la capa de ozono, pero dichas reacciones son fácilmente perturbables por compuestos como los clorofluorocarbonos (CFC), prohibidos desde el Protocolo de Montreal y responsables, entre otras emisiones exclusivamente antrópicas, del famoso agujero de la capa de ozono. Y es que el proceso de formación y destrucción de ozono consume casi toda la radiación UV, impidiendo que el 97-99% de los rayos UV-B y la totalidad de los rayos UV-C alcancen la superficie terrestre, salvaguardando la vida en la Tierra, pero dejando pasar el 50% de los rayos UV-A, los de onda más larga, necesarios para la vida, ya que permiten la fotosíntesis del reino vegetal, base de la pirámide trófica. Por último, cabe señalar que el efecto invernadero producido por la capa de ozono al absorber la radiación infrarroja proveniente de la superficie terrestre, queda totalmente contrarrestado por su capacidad para bloquear la radiación ultravioleta, que impide que esa energía caliente la superficie, anulando el efecto invernadero e incluso haciéndolo negativo.

Pero en la troposfera, cerca del nivel del suelo, la situación es muy distinta. El ozono troposférico, también llamado el ozono “malo”, absorbe mucha más radiación infrarroja proveniente de la superficie que radiación ultravioleta proveniente del Sol, cuya mayor parte ya está bloqueada, por lo que se convierte en un gas de efecto invernadero muy potente. Su GWP para un periodo de un año es 1000 veces superior al del CO_2 ($GWP_1 = 1000$), siendo además un contaminante atmosférico peligroso para la salud de los seres vivos, por su carácter extremadamente oxidante. El 10% del ozono presente en la atmósfera se encuentra en la troposfera y una cierta cantidad es de origen natural, parte compuesta por moléculas que han descendido desde la capa de ozono y parte formada a partir de óxidos de nitrógeno liberados por el suelo y las plantas, pero es una cantidad muy pequeña en comparación con el ozono formado a partir de los gases emitidos por los motores de combustión. La concentración natural del ozono troposférico era de 0,01 ppm, pero desde 1900 la concentración media es mayor del doble, siendo habituales concentraciones de 0,07 ppm en las grandes ciudades, con picos superiores a 0,1 ppm en horas punta. Lo mismo ocurre en los grandes puertos y zonas de mucho tráfico marítimo. Pese a su escasa presencia en la troposfera, como ya se ha dicho es un GEI muy potente, pero debido a su corta vida no se acumula, por lo que si las emisiones cesaran su concentración bajaría a niveles preindustriales

rápidamente. Sin embargo, el calentamiento producido se revertiría progresivamente y a los 20 años su potencial de calentamiento global aún sería 65 veces mayor al del CO₂. Se considera el tercer GEI antrópico más importante.

1.1.1.1.5. Óxido Nitroso (N₂O)

El óxido nitroso o “gas de la risa” es un gas cuya presencia en la atmósfera está asociada al ciclo natural del nitrógeno entre la propia atmósfera, las plantas, los animales y los microorganismos que viven en el suelo y el agua. Las emisiones naturales provienen principalmente de la descomposición bacteriana que ocurre en el suelo y los océanos. Sin embargo, hoy día más del 40% de las emisiones son antrópicas y provienen mayormente de la combustión de combustibles fósiles y la agricultura. Los motores de combustión son una gran fuente de óxidos de nitrógeno (NO_x), entre ellos el óxido nitroso. Su permanencia en la atmósfera es de unos 114 años y a igualdad de cantidad su impacto en el calentamiento global es 298 veces mayor que el del CO₂, si consideramos un periodo de 100 años (GWP₁₀₀ = 298). Dejando a un lado los gases halogenados, el óxido nitroso es el GEI con la menor concentración en la atmósfera, pero el mayor potencial de calentamiento global.

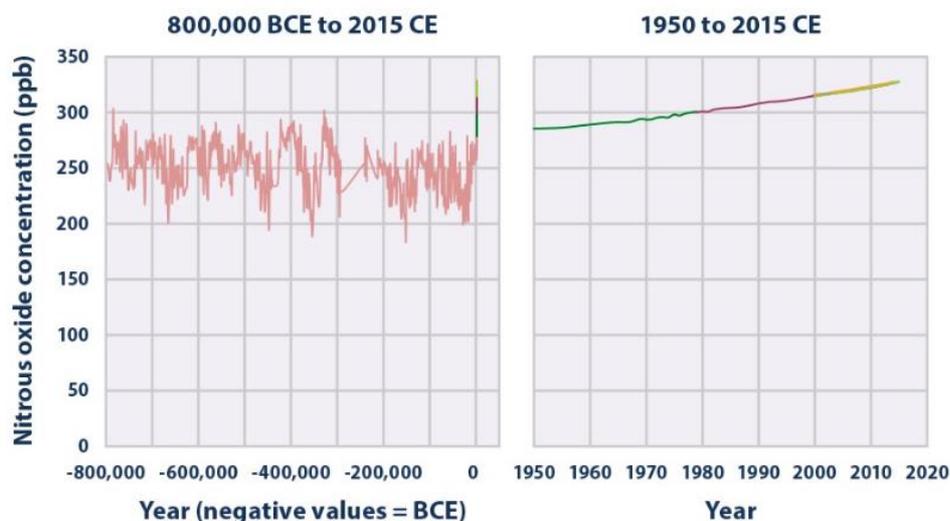


Fig. 20 Concentración de óxido nitroso en partes por cada mil millones. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>

1.1.1.1.6. Gases halogenados

A diferencia del resto de los GEI, los gases halogenados no disponen de fuentes naturales, son compuestos creados exclusivamente por el hombre y que nunca han estado presentes en la atmósfera hasta que comenzó su producción y utilización después de la Segunda Guerra Mundial. Se usan principalmente como refrigerantes y propelentes para sprays, aunque también como disolventes y para la fabricación de espumas aislantes. Hasta la última década del siglo pasado consistían en hidrocarburos a los que se añadía un gas halógeno, normalmente cloro o bromo, además de flúor. Los más usados fueron los clorofluorocarbonos (CFCs), especialmente los

freones R-11, R-113 y el R-12, que fue masivamente utilizado. Se prohibieron después del Protocolo de Montreal de 1989, puesto que se comprobó que destruían la capa de ozono. Pero además eran gases de efecto invernadero con potenciales de calentamiento global miles de veces mayores que el del CO₂ y dada su gran permanencia en la atmósfera hoy en día siguen contribuyendo en un 8% al efecto invernadero antrópico (fig. 22). El CFC-12 (también llamado Freón-12 o R-12) que fue el más utilizado, tiene un GWP₁₀₀ mayor de 10.000 y su permanencia en la atmósfera es de unos 100 años, por lo que sigue presente en la misma.

A partir de los años 90 estos gases fueron sustituidos por los llamados gases fluorados, que vienen a ser compuestos halogenados pero que sólo contienen flúor, sin cloro ni bromo. Los más comunes son los hidrofluorocarbonos (HFCs), hidrocarburos a los que se les ha añadido flúor; los perfluorocarbonos (PFCs), hidrocarburos a los que se les sustituye el hidrógeno por flúor y el hexafluoruro de azufre (SF₆). Los gases fluorados no atacan la capa de ozono, pero siguen siendo gases de efecto invernadero incluso más potentes que los gases prohibidos por el protocolo de Montreal, con una permanencia en la atmósfera mucho mayor. El SF₆ tiene una permanencia de más de 3.000 años y un GPW₁₀₀ de 23.500, mientras que la permanencia de los PFCs es aún mayor (el PFC-14 permanece 50.000 años), aunque el GWP₁₀₀ de estos últimos es algo menor, pero miles de veces superior al del CO₂. Actualmente la contribución de los gases fluorados al calentamiento global es ya del 1%, pese a que su concentración en la atmosfera en comparación al resto de los GEI es mínima, no llegando a 0,0015 ppm.

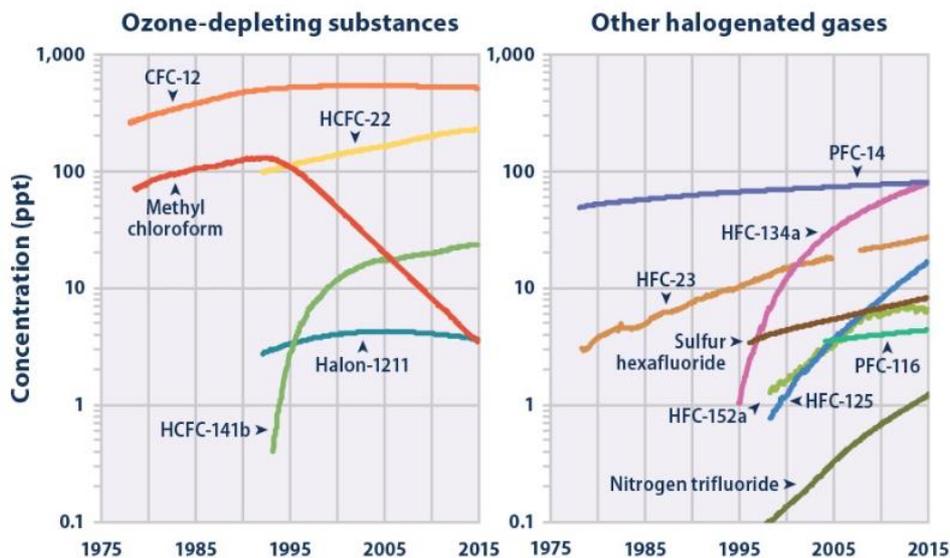


Fig. 21 Concentración de varios gases halogenados en partes por billón. Fuente: *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>

1.1.1.1.7. Gases de efecto invernadero indirectos

Hay que tener en cuenta que además de los gases vistos hasta ahora existen otros que indirectamente también producen un efecto invernadero, como el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM). El primero puede reaccionar

para formar CO₂, que sí es un GEI y los segundos son precursores del ozono troposférico, que también lo es.

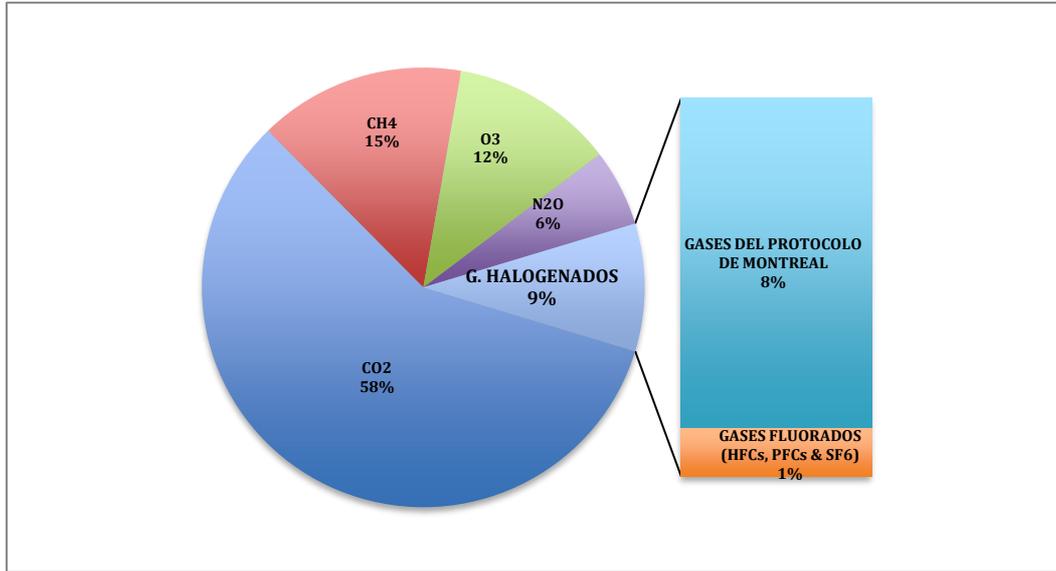


Fig. 22 Contribución de cada GEI antrópico al efecto invernadero en 2015. Gráfico de elaboración propia realizado con los datos proporcionados por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA por sus siglas en inglés)

1.1.2. MECANISMO DEL EFECTO INVERNADERO.

El efecto invernadero puede representarse mediante un modelo sencillo como el utilizado por Adrian E. Gill en su libro *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Podemos imaginar una lámina de vidrio encima de la superficie de la Tierra y paralela a la misma que deja pasar toda la radiación incidente, mayoritariamente de longitud de onda correspondiente al espectro visible, más corta que la infrarroja, pero que absorbe una fracción *f* de la radiación reemitida por la Tierra, de longitud de onda mayor, por ser infrarroja. De esta forma se tiene el esquema simplificado que aparece en la figura 11.

La radiación solar *R_I*, atraviesa la lámina de vidrio y llega al suelo. Este, al calentarse a una temperatura *T*, la reemite al espacio como radiación infrarroja, de onda más larga, siguiendo la ley de Stefan-Boltzman.

$$R_T = \sigma \cdot T^4$$

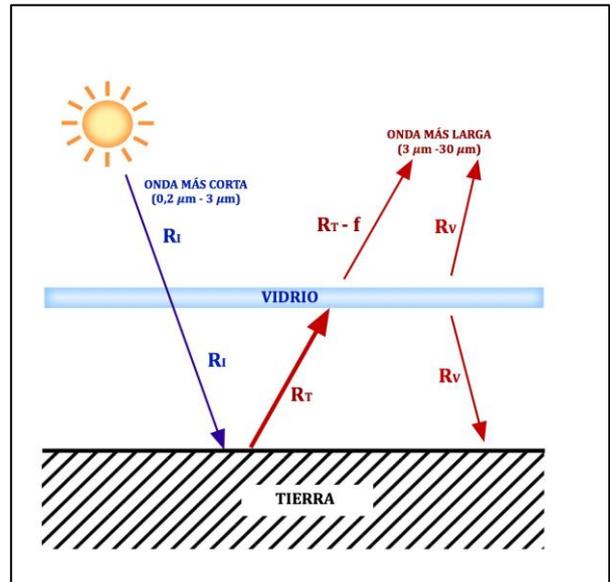


Fig. 23 Modelo esquemático del efecto invernadero. La lámina de vidrio es transparente frente a la radiación incidente por ser de onda más corta (radiación visible), pero absorbe la radiación reemitida por la superficie terrestre de onda más larga (radiación infrarroja). Esquema realizado por el autor.

Sin embargo, la lámina absorbe una fracción f de esa radiación y se calienta, de modo que emite radiación infrarroja R_V en ambas direcciones. Se alcanza el equilibrio cuando los flujos hacia arriba y hacia abajo se compensan a ambos lados de la lámina.

$$R_I = (1-f)R_T + R_V$$

$$R_T = R_I + R_V$$

Despejando entre ambas ecuaciones,

$$R_T = \frac{R_I}{1-f/2}$$

Ahora, mediante la ley de Stefan-Boltzmann se puede calcular la temperatura del suelo.

$$T = \sqrt[4]{\frac{R_I}{(1-f/2) \cdot \sigma}}$$

Si el valor de f es cero, lo que equivale a que la atmósfera no absorbe la radiación infrarroja y por tanto no interviene en el balance energético, entonces vuelve a salir aproximadamente el mismo resultado visto al principio de este capítulo; $-19,5^\circ\text{C}$, siempre que R_I sea el flujo energético de la radiación solar a la que se le ha sustraído el albedo. Si consideramos que toda la radiación infrarroja es absorbida por la lámina de vidrio ($f=1$), entonces $R_I = R_V$ y la temperatura de equilibrio sería del orden de los 28°C . Realmente la temperatura es del orden de los $14,5^\circ\text{C}$ lo que equivale a una radiación de potencia emisiva superficial de unos 390W/m^2 , según la ley de Stefan-Boltzmann.

En realidad, el mecanismo es mucho más complejo. Para empezar el proceso que se ha descrito ocurre en toda la atmósfera y esta no es una delgada lámina, estando además en contacto directo con el suelo, por lo que la radiación absorbida es reemitida en mayor medida hacia el suelo que hacia el espacio. Además, el proceso sufre importantes variaciones dependiendo de si se produce sobre tierra o sobre el océano, o si es de día o de noche. Por otra parte, la energía radiada no se puede dividir en dos únicas bandas, corta y larga, ya que el Sol emite su radiación en todas las longitudes de onda, pese a que la mayor parte corresponda al espectro visible. Por último, no toda la energía se transporta en forma de radiación, sino que también se transporta mediante otros fenómenos físicos como la convección o el calor latente asociado a procesos de evaporación.

1.1.3. BALANCE ENERGÉTICO DE LA TIERRA

La figura 24 es el esquema del balance anual de energía de la Tierra desarrollado por Trenberth, Fasullo y Kiehl de la NCAR en 2008¹⁸. Se basa en datos del periodo de marzo de 2000 a mayo de 2004 y es una actualización de su trabajo publicado en 1997. En él pueden verse los diferentes flujos que van más allá de la simple radiación térmica y que dan lugar al balance energético de la Tierra.

¹⁸ Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, and J. T. Kiehl, 2009: Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 311-323, doi:10.1175/2008BAMS2634.1.

El sistema que forman la superficie terrestre y la atmósfera recibe una radiación solar media de 341 W/m^2 , de los cuales aproximadamente el 30% es reflejado directamente al espacio debido al albedo (la atmósfera y las nubes reflejan 79 W/m^2 y el suelo 23 W/m^2).

El 70% restante es absorbido por el sistema, un 47% por la superficie terrestre (161 W/m^2) y un 23% por la atmósfera (78 W/m^2), puesto que hay que tener en cuenta que esta no es totalmente transparente a la luz solar.

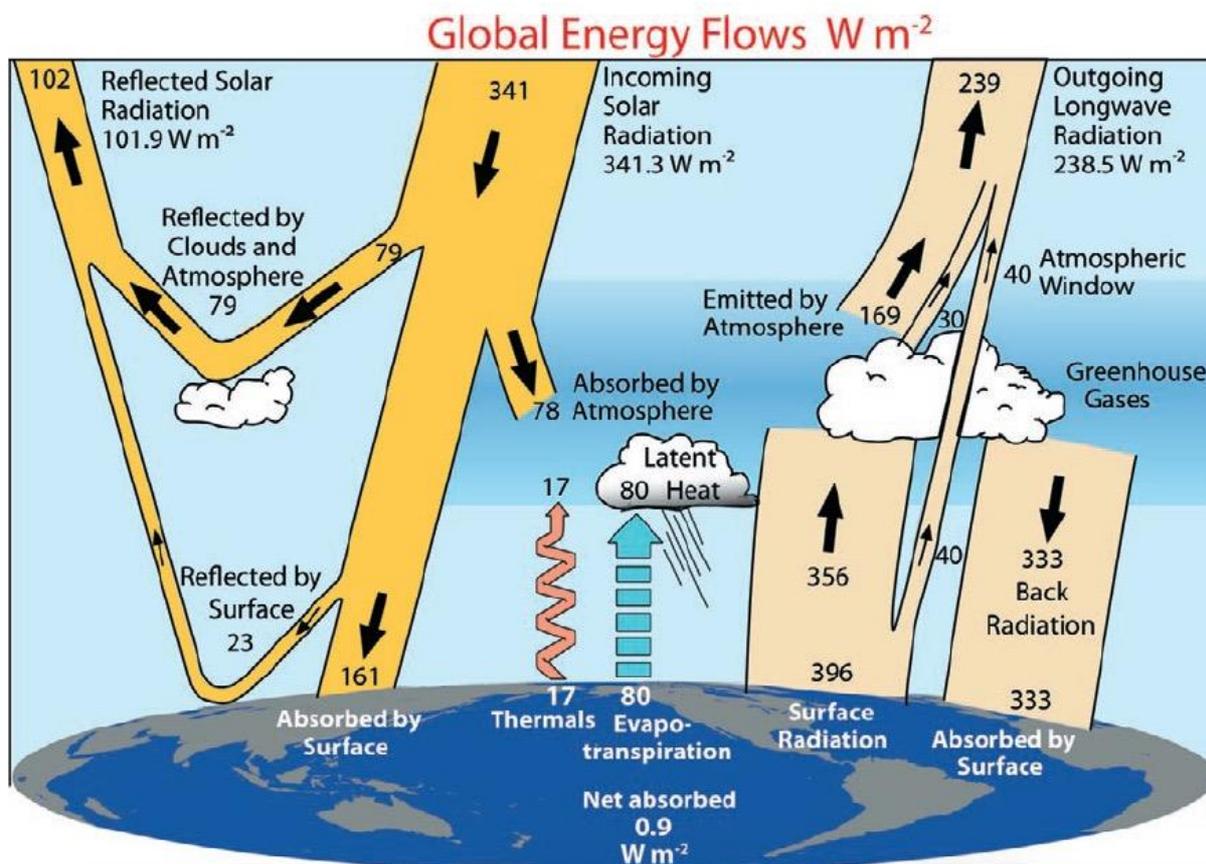


Fig. 24 Balance energético de la tierra de Trenberth et al. 2009. The University Corporation for Atmospheric Research Center for Science Education, *Radiation budget* Recuperado de <https://scied.ucar.edu/radiation-budget-diagram-earth-atmosphere>

Aunque la mayoría de las ondas más largas del espectro visible la atraviesan directamente, una pequeña fracción de las ondas correspondientes al amarillo, al naranja y al rojo se ve afectada por el aire. Por eso vemos el Sol amarillo, tornándose más anaranjado hasta llegar a un tono rojizo según se acerca el ocaso, momento en el que su luz debe atravesar una porción mayor de la atmósfera, al igual que ocurre al amanecer, durante el orto. Si bien sólo una pequeña porción de las ondas más largas del espectro visible se ven afectadas por el aire, una gran parte de las ondas más cortas, correspondientes a la luz azul y violeta, son absorbidas por las moléculas del aire, que las dispersan en todas direcciones. Por eso vemos todo el cielo iluminado de color azul¹⁹. En la Luna, que no tiene atmósfera, el Sol se ve blanco y el espacio negro.

¹⁹ No vemos el violeta porque el ojo humano es más sensible al color azul que al violeta.

Como el 30% de la radiación solar es reflejada debido al albedo y el 23% es absorbido por la atmósfera, sólo el 47% llega al suelo (161 W/m^2). Pero esta cantidad es reemitida a la atmósfera; 97 W/m^2 por convección y evaporación y el 90% de los 64 W/m^2 restantes por radiación, ya que aproximadamente un 10% de la radiación infrarroja atraviesa la atmósfera (ventana atmosférica). Hasta aquí la atmósfera habría absorbido un total de $232,6 \text{ W/m}^2$, pero al igual que la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes también han de cumplir con el balance energético, por lo que han de emitir radiación infrarroja con el mismo ratio en el que reciben la energía del Sol y de la superficie terrestre. Esta radiación se emite tanto hacia el espacio como hacia la Tierra, en una proporción ligeramente mayor hacia la Tierra. Por tanto, la superficie terrestre se calienta más, lo que incrementa la radiación emitida por la misma, que a su vez aumenta la cantidad de radiación absorbida por la atmósfera. Este ciclo, que es precisamente lo que llamamos efecto invernadero, continúa hasta que se alcanza el equilibrio, cuando la energía radiada al espacio sumada a la reflejada por el albedo iguala a la radiación solar entrante²⁰.

En resumen, la superficie de la Tierra recibe del Sol 161 w/m^2 y del efecto invernadero de la atmósfera 333 w/m^2 , en total 494 w/m^2 . Como la superficie de la Tierra emite un total de 493 w/m^2 ($17+80+396$), supone una absorción neta de calor de $0,9 \text{ w/m}^2$, que en el presente está provocando el calentamiento de la Tierra.

Para desarrollar este esquema de flujos, los científicos de la UCAR²¹, Trenberth, Fasullo y Kiehl recopilaron datos de globos sonda, estaciones terrestres y los satélites de los programas ERBE²², SORCE²³ y CERES²⁴ de la NASA. Cabe mencionar que dicha agencia aeroespacial ha actualizado los valores de dichos flujos energéticos mediante los últimos datos enviados por el satélite CERES FM6, puesto en órbita en noviembre de 2017 y equipado con instrumentación mucho más precisa, arrojando unos resultados muy parecidos como se puede ver en la fig. 25.

²⁰ Un vídeo de apenas un minuto de duración en la web del U.S. Government Accountability Office, muestra de forma muy clara el esquema del balance anual de flujos. <https://www.gao.gov/multimedia/interactive/GAO-11-71b>

²¹ University Corporation for Atmospheric Research

²² Earth Radiation Budget Experiment

²³ Solar Radiation and Climate Experiment

²⁴ Clouds and the Earth's Radiant Energy System

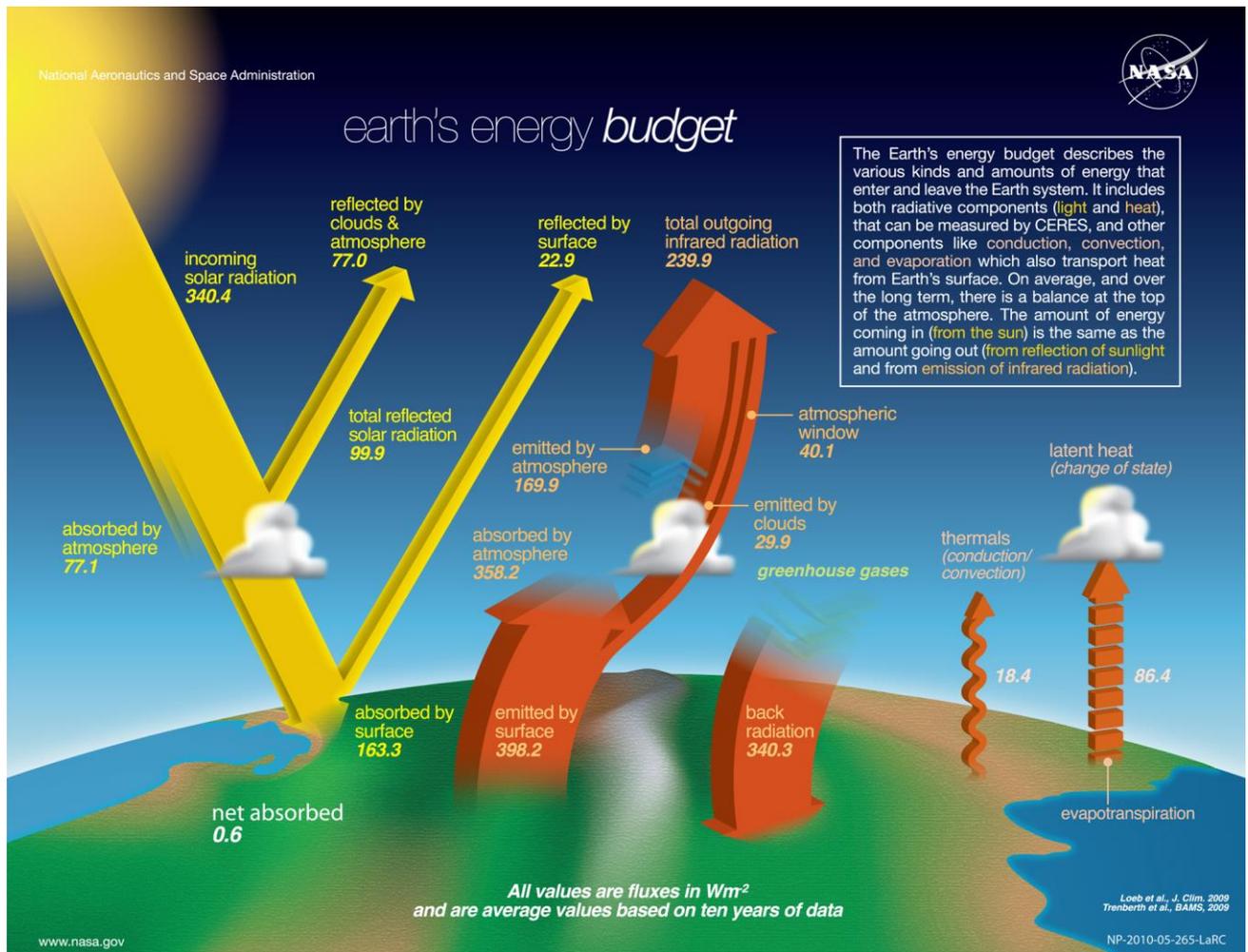


Fig. 25 Diagrama del balance energético actualizado por la NASA. *Earth Energy Budget*. Recuperado de https://science-edu.larc.nasa.gov/energy_budget

1.2. CALENTAMIENTO GLOBAL Y EMISIONES ANTRÓPICAS

El desequilibrio captado por los satélites entre la radiación solar absorbida y emitida por la Tierra, que evidencia un calentamiento de la misma, confirma el registro de temperaturas realizado por los meteorólogos y climatólogos de todo el mundo a lo largo de los últimos años. Estos señores no han cesado de medir diariamente la temperatura del aire, estableciendo medias anuales que han mostrado cuál ha sido la tendencia de la temperatura global en los últimos 140 años.

Aunque ya desde 1850 se realiza una toma metódica de los datos termométricos, en lo que respecta a la temperatura global de la Tierra los registros instrumentales comienzan en 1880, poco después de fundarse la Organización Meteorológica Internacional (*IMO* por sus siglas en inglés, precursora de la actual Organización Meteorológica Mundial *WMO*), ya que hasta entonces las lecturas no ofrecían una cobertura suficiente del planeta. Sin embargo, a partir de esa fecha las mediciones fueron cada vez más abundantes, completando las lecturas de superficie con las realizadas por los globos sonda a distintas alturas a partir de 1930 y por los satélites a

partir de 1970. Todas las mediciones realizadas por diferentes organismos muestran que la Tierra se está calentando.

En 1988 la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (*UNEP* por sus siglas en inglés) establecen el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*). Hasta la fecha este grupo ha elaborado cinco informes sobre el cambio climático; en 1990, 1995, 2001, 2007 y 2013 y se espera que presenten el sexto en 2021-2022.

Ya en el primer informe alertaban de que las emisiones de dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno y clorofluorocarbonos debidas a la actividad humana estaban incrementando la concentración de los GEI en la atmósfera. Los datos que analizaron mostraban entonces que la temperatura global había subido entre 0,3 y 0,6°C desde que se tienen registros, es decir, desde 1880 y evidenciaban además que la década de los 80 había sido la más calurosa de los últimos cien años. Según los modelos climáticos que elaboraron esto *podía* deberse a las emisiones antrópicas, sin embargo, la variabilidad natural del clima también podía ser la causa, aunque alternativamente esta misma variabilidad podría haber compensado un calentamiento aun mayor provocado por la actividad humana. Con los medios de la época, sus modelos climáticos predecían una subida de 0,3°C por década.

El segundo informe revelaba que la concentración de los GEI seguía aumentando y que este hecho era atribuible a la actividad humana, principalmente al uso de combustibles fósiles y a la agricultura. Mantenía que la temperatura global había subido entre 0,3 y 0,6°C el último siglo, pero advertía que los últimos 5 años habían sido más calurosos todavía que la década de los 80, pese a la erupción del volcán Pinatubo, que produjo un efecto de enfriamiento. Según este informe el nivel de los mares había subido de 10 a 25cm y podía estar relacionado con el calentamiento global. Pese a la limitada disponibilidad de evidencias, los indicadores climáticos sugerían que ningún otro siglo en los últimos 1.400 años había sido más caluroso que el siglo XX y mostraban además una discernible influencia humana en el calentamiento global. Este informe predecía un aumento de 2°C para 2100 respecto a 1990 y una subida del nivel de los mares de medio metro.

El tercer informe sigue alertando sobre el incremento de los GEI antrópicos; el CO₂ ha aumentado un 31% desde 1750 y el metano un 151%. Se confirma que la temperatura global ha aumentado 0,6°C en el siglo XX. Ahora es la década de los 90 la más calurosa desde que se tienen registros y *probablemente* del último milenio, siendo 3 de los últimos 5 años (1995, 1997 y 1998) los más calurosos, estableciéndose un nuevo récord en 1998. Hay nuevas y más fuertes evidencias de que el cambio climático de los últimos 50 años está causado por el hombre. Hay un mayor escrutinio de un registro de temperaturas más amplio y nuevos modelos que estiman de manera más precisa la variabilidad del clima. La reconstrucción del clima del último milenio indica que el calentamiento global no es normal y que es *improbable* que se deba a causas naturales. El informe elabora varios escenarios dependiendo de las políticas que se adopten respecto de las emisiones de los GEI y pronostica una subida de temperaturas de 1,4 a 5,8°C y una subida del nivel de los mares de 0,09 a 0,88m para 2100 respecto de 1990 según el escenario adoptado.

El cuarto informe vuelve a incidir en el aumento de los GEI antrópicos, cuya concentración se ha incrementado en un 80% desde la era preindustrial. Muestras tomadas de los núcleos de hielos

prehistóricos determinan que desde hace miles de años no ha existido semejante concentración de dióxido de carbono. Este incremento se debe principalmente al uso de combustibles fósiles, mientras que el de los óxidos de nitrógeno y metano se debe a la agricultura. El informe muestra que once de los 12 años más calurosos que se hayan registrado han ocurrido en los últimos 12 años, estableciéndose un nuevo récord en el 2005. Se comprueba que la velocidad a la que está subiendo la temperatura se ha incrementado en los últimos 25 años. Se actualiza la tendencia de la temperatura global en los últimos 100 años (1906-2005), que es de un aumento de 0,76°C, mayor que el aumento de 0,6°C observados entre 1901 y 2000, en el tercer informe. La causalidad entre las emisiones antrópicas y el calentamiento global pasa a considerarse *muy probable* y la influencia de la actividad humana se extiende a otros aspectos del clima como el calentamiento de los océanos, las temperaturas extremas o los patrones de viento. El calentamiento global ya es un hecho, en este informe se puede leer textualmente: “*El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar*”. Se muestra una ratio en la subida de los mares de 1,8mm por año entre 1961 y 2003, aumentando a 3,1mm entre 1993 y 2003. Por otra parte, los modelos climáticos, que ya son mucho más sofisticados, muestran que la troposfera ha de calentarse más que la superficie terrestre mientras que la estratosfera ha tenido que enfriarse notablemente, lo cual es confirmado por las lecturas satelitales y de los globos sonda realizadas desde los 70. Esto supone una confianza extra en los modelos climáticos que ahora predicen un aumento mayor de 0,2°C por década y una subida del nivel de los mares para el final del siglo XXI de entre 0,18 y 0,59m según el escenario

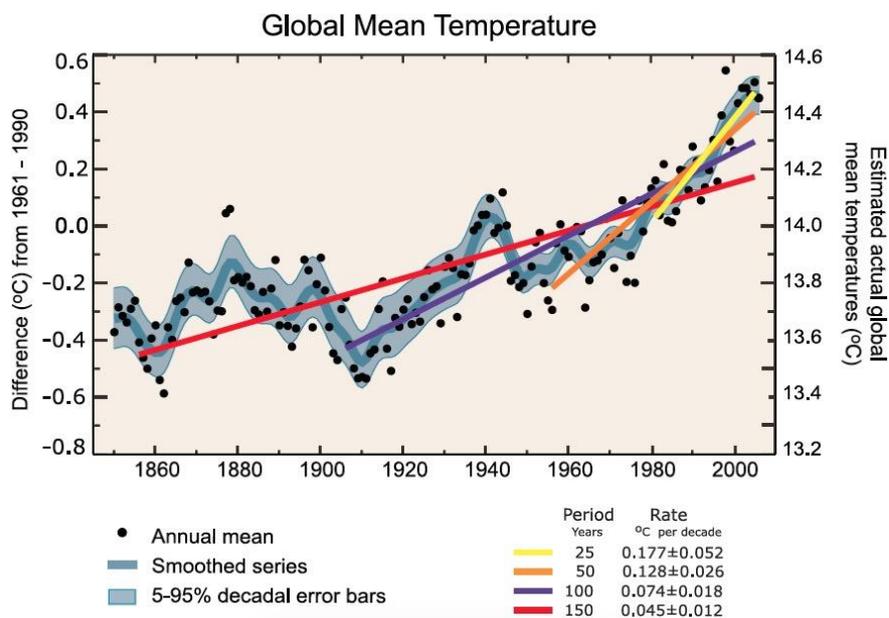


Fig. 26 Aumento de la ratio del calentamiento global en los últimos años. “*CLIMATE CHANGE 2007: The Physical Science Basis*” Recuperado de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/fig/faq-3-1-figure-1.jpeg

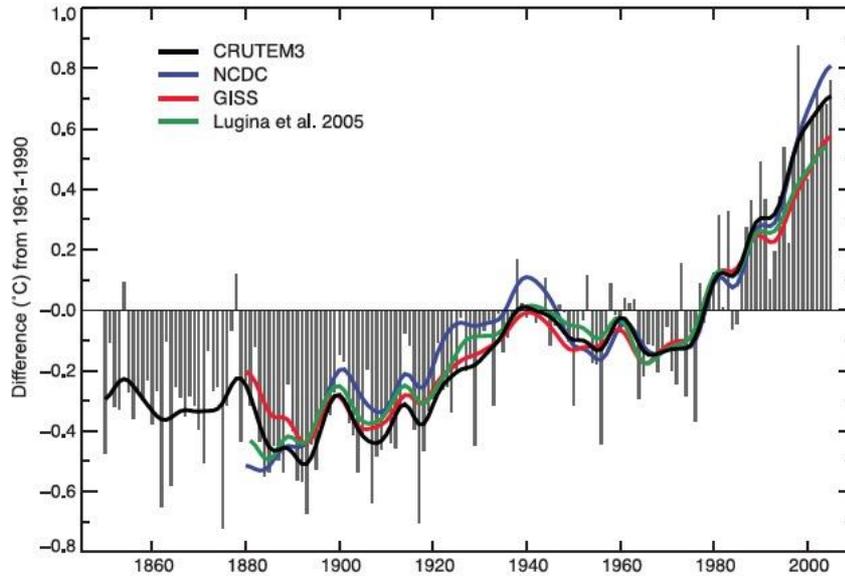


Fig. 27 Diagrama realizado con distintas bases de datos grid : CRUTEM3 de la agencia meteorológica del Reino Unido, NCDC de la NOAA, GISS de la NASA y la creada por los científicos rusos Lugina et al. Se muestran las variaciones en las temperaturas medias anuales respecto a la temperatura global media entre 1961 y 1990.

“CLIMATE CHANGE 2007: The Physical Science Basis” Recuperado de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/fig/figure3-1.jpeg

El quinto informe, último hasta la fecha, confirma muchas de las conclusiones presentadas en los informes anteriores y aumenta la confianza en el resto, después de volver a evaluarlas utilizando una mayor base de datos y modelos climáticos más sofisticados. Se muestran múltiples líneas de investigación diferentes que sitúan el calentamiento global en 0,85°C para el periodo entre 1880 y 2012, siendo de 0,78°C la subida de temperatura global entre la media del periodo 1850-1900 y la de 2003-2012. Este informe advierte además que el calentamiento se seguirá produciendo, aunque dejemos de emitir GEI antrópicos, puesto que entre un 15% y un 40% del CO₂ emitido puede tardar hasta 1.000 años en desaparecer, por lo que insta a los gobiernos a promulgar medidas de adaptación además de las medidas encaminadas a reducir o eliminar completamente las emisiones antrópicas de los GEI. En relación a esto último, para finales de siglo predice un calentamiento mínimo de 0,3°C por encima de la temperatura media del periodo 1986-2005 y un máximo superior a 5°C, dependiendo del escenario previsto.

El quinto informe básicamente lanza tres mensajes:

- **El calentamiento global es un hecho inequívoco.**
- **La influencia humana es clara.**
- **De continuar con las emisiones antrópicas de los GEI el ratio de calentamiento aumentará aún más.**

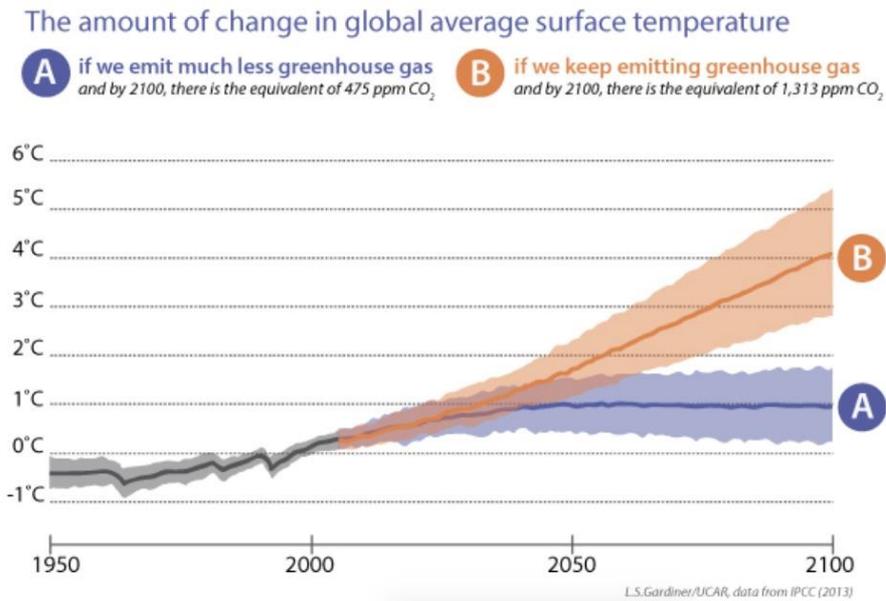


Fig. 28 Predicción del calentamiento global para fin de siglo respecto de la temperatura media registrada entre 1986 y 2005. La línea marrón clara corresponde a la predicción media de 39 modelos utilizados suponiendo una concentración de CO₂ de 1.313 ppm para 2100 y la línea morada a la de 32 modelos que suponen una concentración de 475ppm (los distintos resultados de los modelos se representan por las zonas sombreadas). La línea negra corresponde a los registros observados y la zona sombreada en gris representa los resultados de 42 modelos utilizados. Recuperado de <https://scied.ucar.edu/sites/default/files/images/long-content-page/4.future.jpg>

En base a estos tres mensajes, la conclusión principal del informe es que la única forma de mitigar el calentamiento global es una reducción sustancial y sostenida de los GEI. Las siguientes son algunas de las conclusiones y figuras que se han sacado directamente de la edición original de la aportación del grupo I al quinto informe:

“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.”

“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. Cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850. Es probable que el período 1983-2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1.400 años en el hemisferio norte, donde es posible realizar esa evaluación.”

“Las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico, y actualmente son mayores que nunca. Como consecuencia, se han alcanzado unas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso sin parangón en por lo menos los últimos 800.000 años. Los efectos de las emisiones, así como de otros factores antropógenos, se han detectado en todo el sistema climático y es extremadamente probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX.”

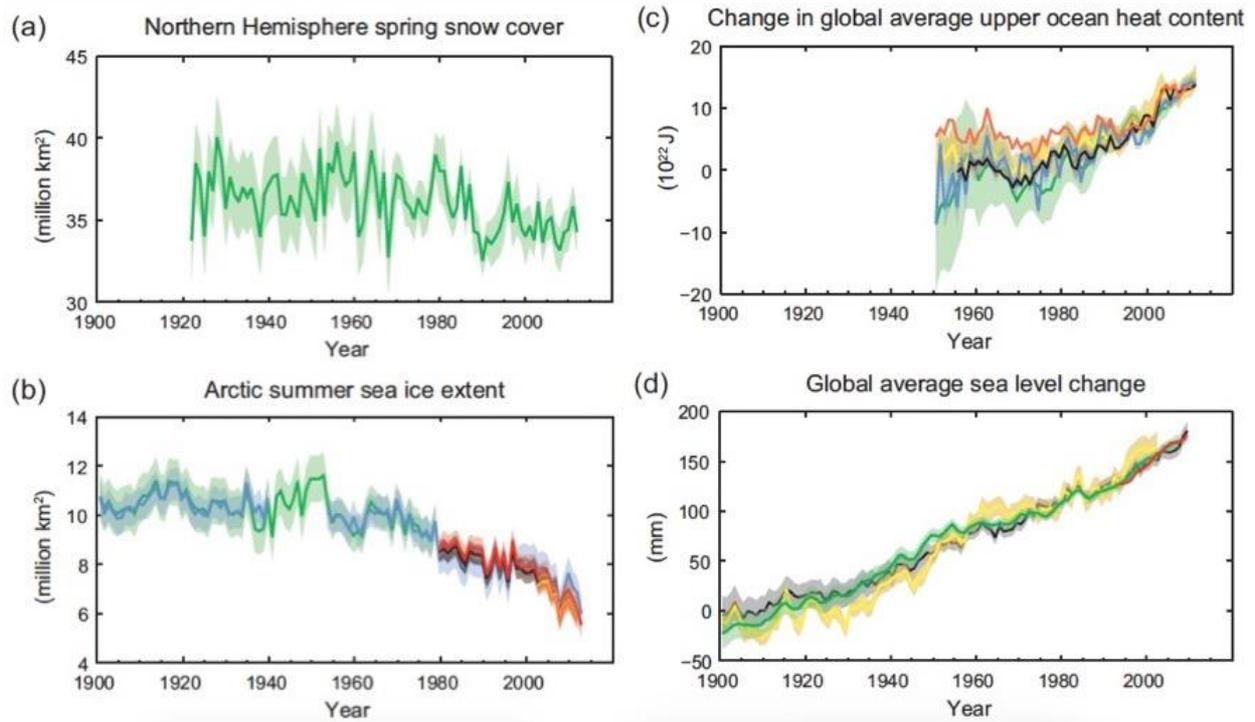


Fig. 29 Extensión superficial del hemisferio norte cubierta de nieve en marzo y abril, extensión del ártico en verano, variación del contenido calorífico medio de la capa superior (0-700m) relativa a 1970 y aumento del nivel medio del mar relativo al periodo 1900-1905. Las líneas de diferente color indican distintas fuentes de datos y las zonas sombreadas el margen de incertidumbre. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/SPM/FigSPM-03.jpg>

“Muchos aspectos del cambio climático y los impactos asociados continuarán durante siglos, incluso si se detienen las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero. Los riesgos de cambios abruptos o irreversibles aumentan a medida que aumenta la magnitud del calentamiento.”

“Hay muchas trayectorias de mitigación que es probable que limiten el calentamiento por debajo de los 2 °C en relación con los niveles preindustriales. Esas trayectorias requerirían reducciones notables de las emisiones durante los próximos decenios y emisiones próximas a cero de CO₂ y otros gases de efecto invernadero de larga vida para finales de siglo. La realización de dichas reducciones plantea retos tecnológicos, económicos, sociales e institucionales de consideración, que aumentan con los retrasos en la mitigación adicional si no están disponibles las tecnologías esenciales.

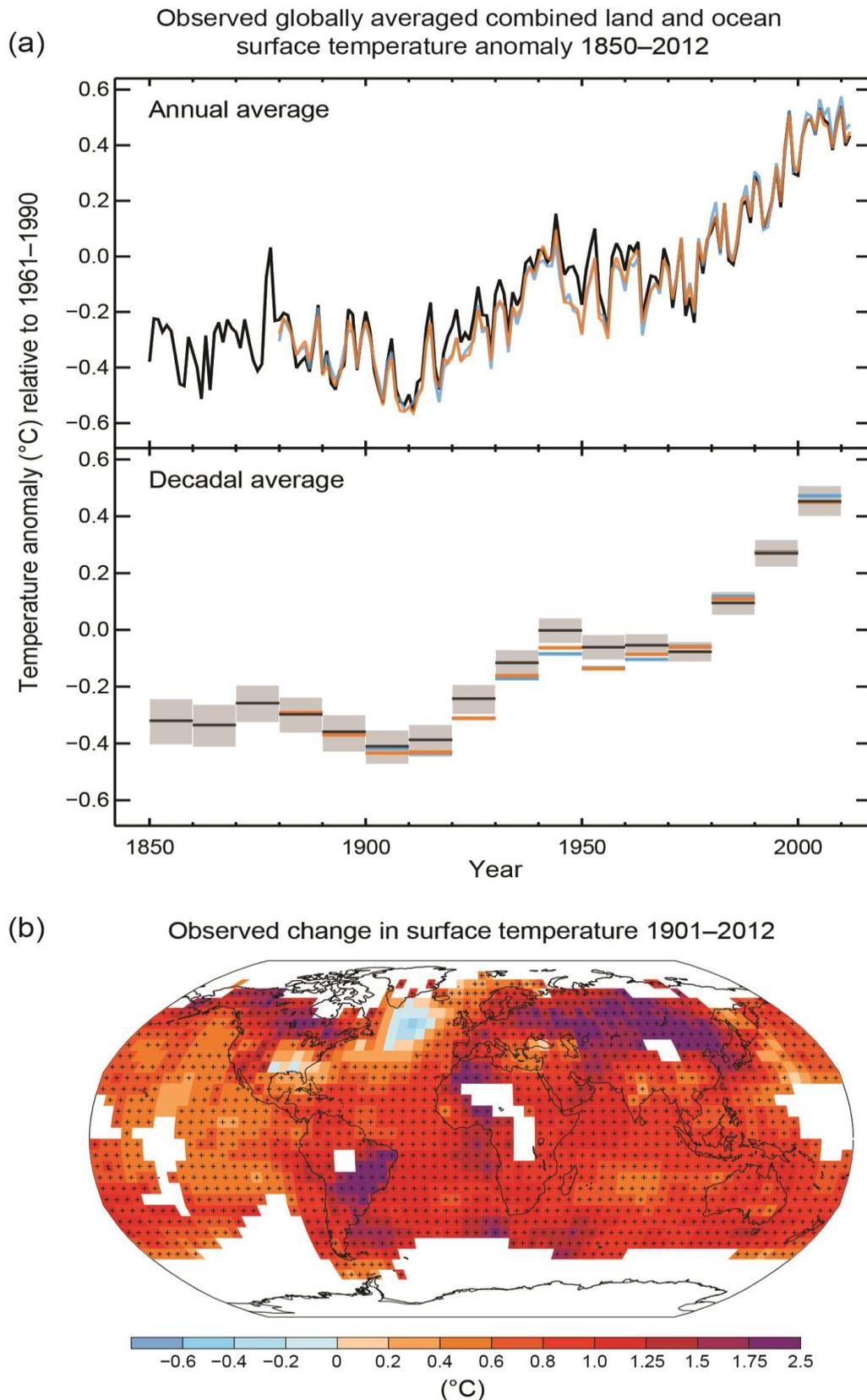


Fig. 30 Diferencias en las temperaturas combinadas de las superficies oceánicas y continentales en el periodo 1850-2012 respecto de la temperatura media registrada durante los 30 años entre 1961 y 1990.

<http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/SPM/FigSPM-01.jpg>

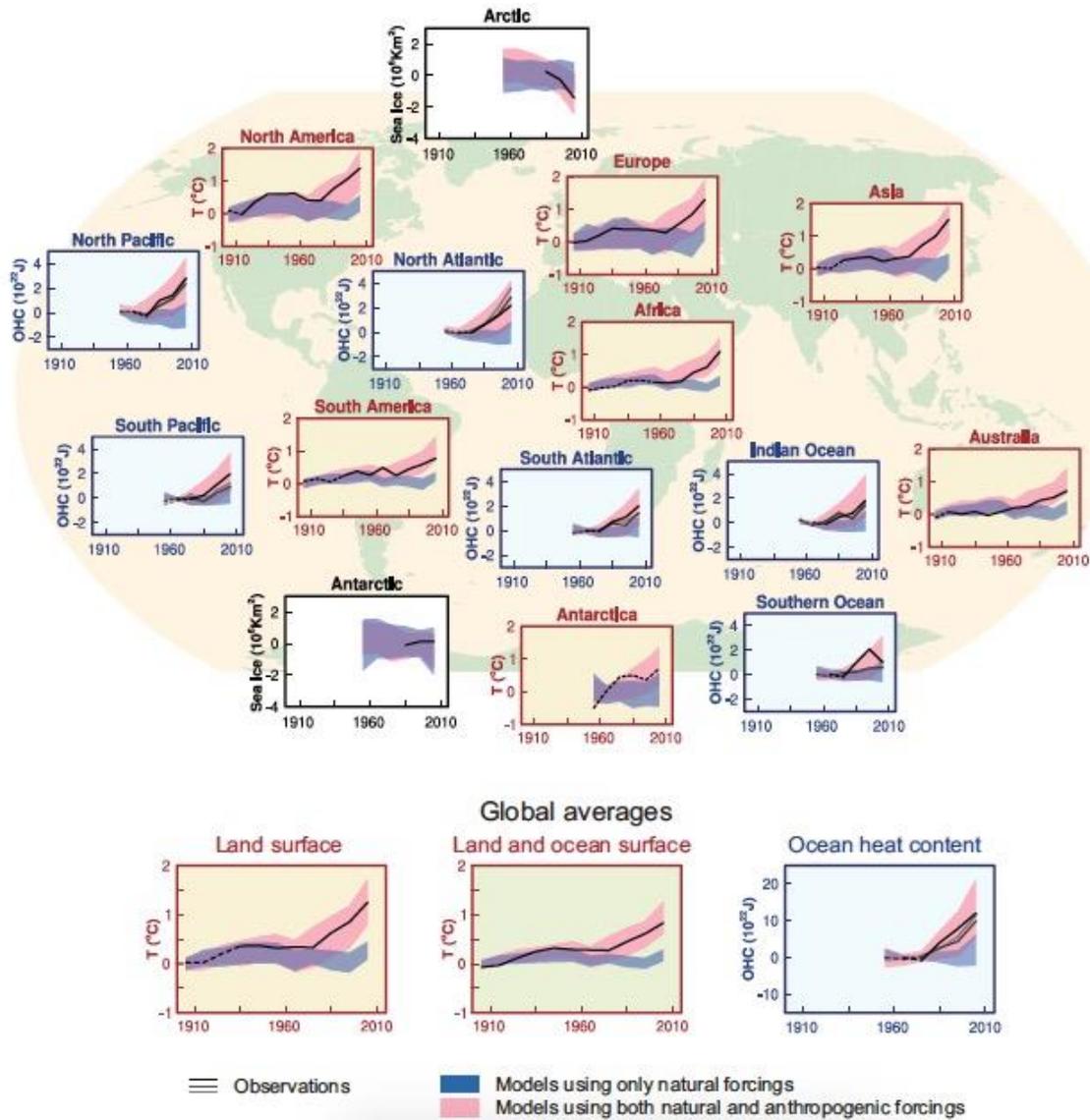


Fig. 31 Comparación entre las anomalías observadas (líneas negras) y los máximos y mínimos obtenidos de las simulaciones realizadas con los modelos desarrollados por el IPCC (zonas sombreadas), donde se demuestra la capacidad de predicción de los modelos climáticos. Las anomalías en las temperaturas de la superficie están referenciadas al periodo entre 1880 y 1919, las correspondientes al contenido calorífico de los océanos están referenciadas al periodo entre 1960 y 1980 y las correspondientes a la superficie del casquete polar lo están al periodo entre 1979 y 1999. Las zonas sombreadas en rosa corresponden a modelos que tienen en cuenta las emisiones antropógenas, mientras que las sombreadas en azul no las tienen en cuenta.
<http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/SPM/FigSPM-06.jpg>

Ciertamente los informes del IPCC no son nada halagüeños y asustan, pero no se los puede tachar de alarmistas. El IPCC es un órgano científico intergubernamental del que actualmente son miembros los 195 países que conforman la ONU y cuyos científicos analizan los datos recogidos por la mayoría de las agencias o entidades que monitorizan nuestro planeta. Y cada vez hay más programas creados por estas que aportan más datos y más fiables; el programa COPERNICUS de la Agencia Medioambiental Europea con varios satélites y estaciones meteorológicas a lo

largo del planeta, los programas GAW²⁵, GECOS²⁶ y GDPFS²⁷ de la Organización Meteorológica Mundial, el EARTH OBSERVATORY de la NASA, el NCDC²⁸ de la NOAA, y varios más que han puesto en marcha el MOHC británico, la JMA japonesa, el ROSHYDROMET ruso, la Administración Meteorológica de China o la más cercana AEMET, por poner sólo algunos ejemplos. Ninguna de estas entidades ha rebatido hasta la fecha los informes presentados por el IPCC.

Por otra parte, las predicciones de sus primeros informes respecto al calentamiento global y sus consecuencias se han ido cumpliendo, demostrando la fiabilidad de los modelos climáticos utilizados, pero es que actualmente, el enorme aumento de la potencia computacional ha permitido crear nuevos modelos que pueden manejar el “big data”, lo que los hace más fiables todavía. Las más recientes han sido aceptadas por la comunidad científica internacional. Incluso Lord Rees de Ludlow, presidente de la Royal Society, la institución científica británica más prestigiosa, afirmó: "el IPCC es la autoridad mundial líder sobre cambio climático...".

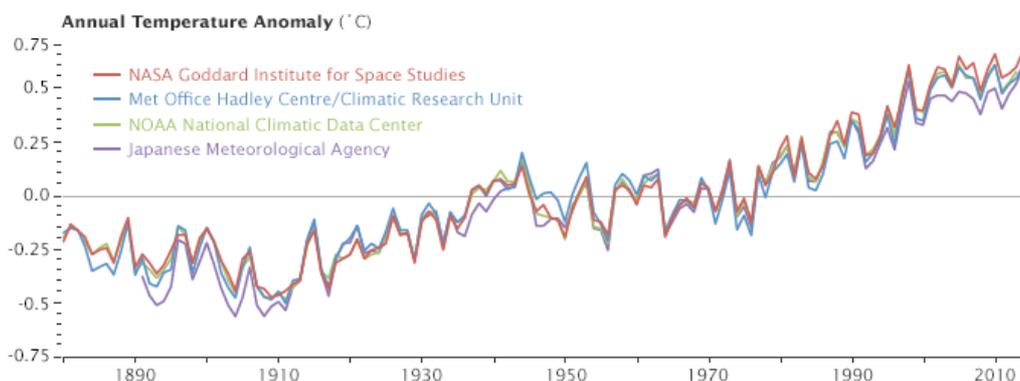


Fig. 32 Esta gráfica se ha extraído de la revista online de la NASA *Earth Observer*. Las diferencias de temperatura en este caso se dan respecto a la temperatura media del periodo 1951-1980, dado que los análisis de las temperaturas del programa GISS de la NASA comenzaron en 1980 y los 30 años más recientes correspondían a ese periodo (un intervalo de 30 años se considera suficiente para evitar el falseamiento de las lecturas debido a años extraordinariamente anómalos). Las diferencias anuales se muestran en base a los datos recogidos de forma independiente por la NASA, el NOAA, la MOHC británica y la JMA japonesa. Con alguna ligera variación, los 4 registros muestran picos y valles sincronizados entre sí. Todas muestran un calentamiento más rápido en las últimas décadas y todas muestran la última década como la más calurosa. Recuperado de https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/48000/48574/adjusted_annual_temperature_anomalies_eo.png

Por si esto fuera poco, aun sin concluir el sexto informe del IPCC, todas las entidades mencionadas han confirmado que los 3 años más calurosos desde 1880 han sido 2015, 2016 y 2017, estableciéndose un nuevo récord en el 2016, el más caliente hasta la fecha²⁹, aunque se

²⁵ Global Atmosphere Watch Programme

²⁶ Global Climate Observing System

²⁷ Global Data-Processing and Forecasting System

²⁸ National Climatic Data Center

²⁹ Hay que recordar que este capítulo se redactó en 2017-2018, mediciones más recientes de la NOAA han comprobado que el 2019 fue más caluroso que el 2017 y el 2020 aún más caluroso que el 2019, sólo 0,02°C más frío

produjo el fenómeno de El Niño, que puede subir las temperaturas anuales. Sin embargo, en el 2017 no ocurrió dicho fenómeno y ha sido el segundo año más caluroso desde 1880 y probablemente de los últimos 1.400 años. De hecho, según la WMO la temperatura media global del 2017 fue 1,1°C superior a la del periodo preindustrial (1880-1900) y 17 de los 18 años más calurosos desde entonces han sido registrados durante este siglo.

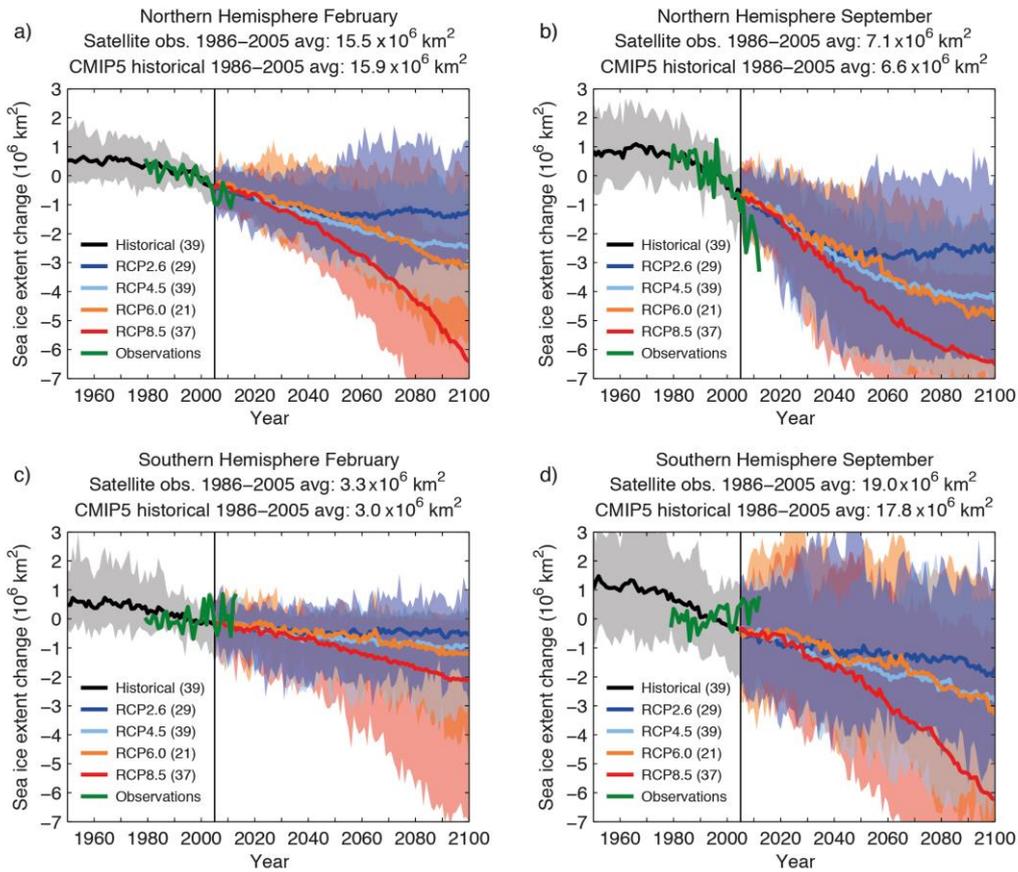


Fig. 33 Cambios en la extensión de los casquetes polares respecto al periodo 1986-2005. La segunda mitad del siglo XX corresponde a los modelos CMIP5 del *World Climate Research Programme*, mientras que el siglo XXI está cubierto por los modelos del IPCC para los cuatro escenarios previstos. Las líneas muestran la media de los resultados arrojados por los modelos utilizados para cada escenario, cuyo número aparece en las leyendas de las esquinas izquierdas inferiores. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/Chapter%2012/Fig12-28.jpg>

El calentamiento global es un hecho y sin necesidad de analizar todos estos datos lo podemos ver en el derretimiento de los glaciares, el deshielo del ártico o en la disminución de la superficie nevada del hemisferio norte, donde los efectos del calentamiento global son mayores.

que el 2016, el año más caluroso del que se tiene noticia. Incomprensiblemente se siguen sin cumplir las medidas “aceptadas” por casi todos los países en el Acuerdo de París y gran parte de la sociedad sigue negando el calentamiento global.

Llegados a este punto, todavía se podría pensar que el aumento de la temperatura global en unos pocos grados no tendría mayores consecuencias para el planeta o el ser humano, pero esta es una idea totalmente equivocada. Un aumento que supere los dos grados respecto a la era preindustrial implica un verdadero cambio climático, con alteraciones en los patrones de viento y corrientes oceánicas, la desaparición del 25% del ártico en pleno invierno (más de la mitad en verano), una subida de medio metro del nivel del mar, un aumento de los fenómenos climáticos extremos; como olas de calor de mayor intensidad y frecuencia, largos periodos de sequía en ciertas zonas y precipitaciones extremas en otras, y un probable aumento de la frecuencia y fuerza de los ciclones tropicales. La reducción del ártico y de las superficies cubiertas por nieve supone además una disminución del albedo, puesto que estas superficies dejarán de reflejar la radiación solar y el planeta se calentará aún más. Si esto fuera poco, por cada grado que aumente su temperatura, la atmósfera es capaz de absorber un 7% más de vapor de agua, lo que supone mayor efecto invernadero, que a su vez provocará un aumento de temperatura aun mayor, entrando en una espiral de calentamiento global que puede ser realmente catastrófico. Y todo esto por una subida de la temperatura global de sólo 2°C, que por otro lado va a ser prácticamente imposible de evitar de cara al final del presente siglo.

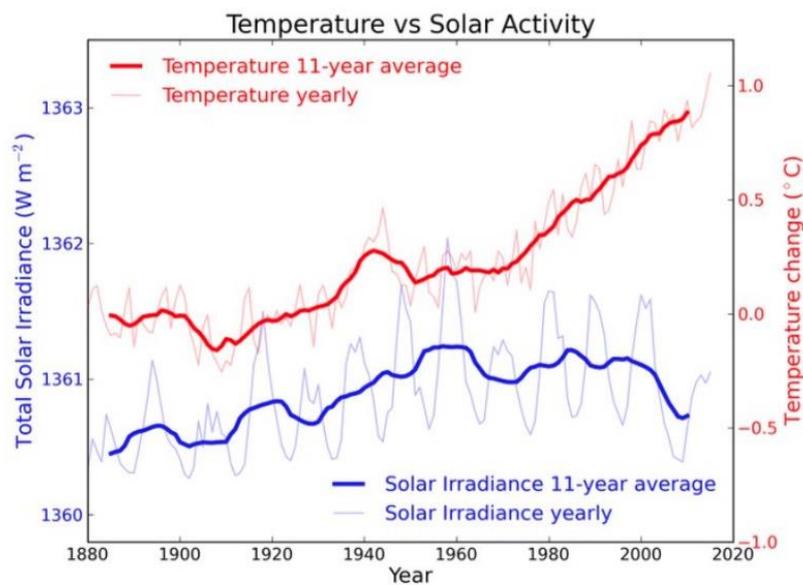


Fig. 34 La línea roja fina muestra los cambios de temperatura anuales mientras que la gruesa muestra la media en periodos de 11 años medidos por el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA. La línea azul fina muestra la variación anual de la radiación solar y la gruesa la media en periodos de 11 años. Los datos desde 1880 a 1978 fueron recogidos por Krivova et al 2007 y desde 1979 a 2015 por el Centro de Datos de Radiación Mundial perteneciente a la Organización Meteorológica Mundial. <https://skepticalscience.com/pics/TvsTSI.png>

Todos estos fenómenos conforman el cambio climático, que no es sino la consecuencia del calentamiento global, que a su vez está causado por el aumento del efecto invernadero. Esto nos tiene que resultar obvio, dado que si la Tierra se calienta es porque recibe más radiación y, si la

radiación solar incidente no ha variado, es evidente que dicha radiación proviene del efecto invernadero.

El último informe del IPCC no deja lugar a dudas en cuanto a que el aumento del efecto invernadero está causado por las emisiones antrópicas, principalmente de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y metano. Y no es una conclusión que se haya tomado precipitadamente, sino que se ha necesitado más de medio siglo midiendo las concentraciones de los GEI en la atmósfera para llegar hasta ella.

Estas mediciones comenzaron en 1958 y no tenían nada que ver con el calentamiento global. Ese año el geoquímico Charles Keeling comenzó a tomar medidas de la concentración de CO₂ en el observatorio del volcán de Mauna Loa, en Hawái. Quería comprobar el ciclo estacional del CO₂. En teoría, durante el verano boreal su concentración en la atmósfera debía de ser menor, cuando las plantas absorben el CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis, mientras que en invierno debía de aumentar, debido a la mayor inactividad de las mismas. Aunque las mediciones confirmaron la teoría, se encontró con un resultado inesperado; la concentración total de dióxido de carbono iba en aumento año tras año.

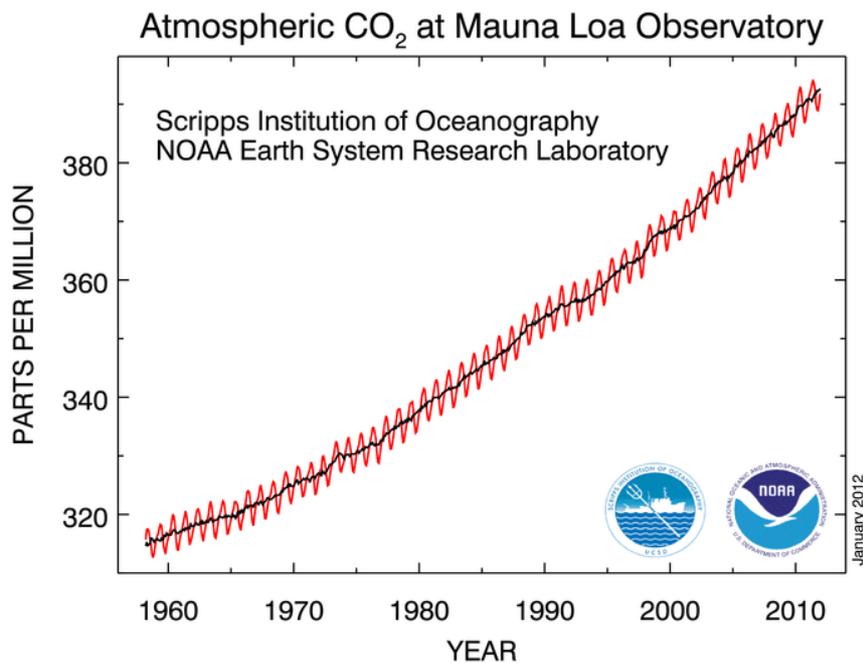


Fig. 35 La denominada “curva Keeling” muestra el rápido aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera desde que Keeling comenzó sus mediciones. Las ondulaciones de la línea roja indican el ciclo estacional, mientras que la línea negra pasa por las concentraciones medias de CO₂. Solamente desde 1958 hasta 2016 ha aumentado en 85 ppm.

<https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/styles/medium/public/2016-07/keelingcurve-large.png>

Las mediciones de Keeling fueron la primera constatación de que las actividades humanas estaban incrementando la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, de forma que atrajeron la atención de los expertos medioambientales sobre las emisiones antrópicas de gases de efecto invernadero. Desde entonces las investigaciones han evidenciado la relación entre el incremento de CO₂ en la atmósfera y el calentamiento global. Es más, analizando el aire atrapado en los núcleos de hielo extraídos del ártico, se ha descubierto que hasta la industrialización hubo un periodo de más de 1000 años durante el cual la concentración de CO₂ en la atmósfera se mantuvo constante sobre las 280 ppm, así como la temperatura global en unos 14°C. A partir del comienzo de la industrialización tanto la concentración de CO₂ como la temperatura empezaron a subir. Lo mismo se puede decir del resto de gases de efecto invernadero.

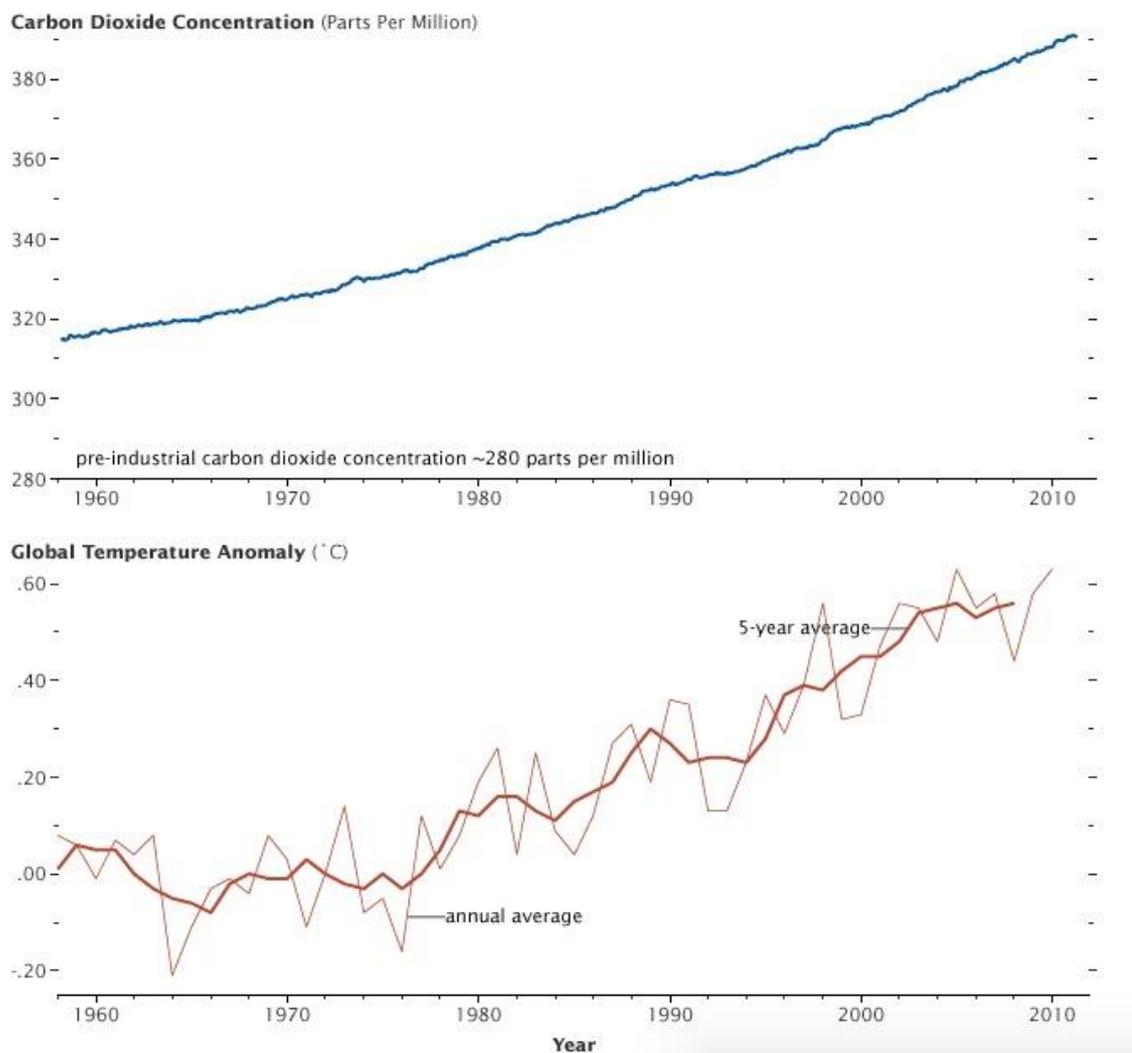


Fig. 36 Relación evidente entre el aumento de CO₂ en la atmósfera (en la gráfica se ha eliminado el ciclo anual) y el calentamiento global. <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/page5.php>

Hay que resaltar que estos gases son sólo una parte de las emisiones antrópicas, la actividad humana también es responsable de la emisión de otras sustancias nocivas, que si bien no contribuyen al efecto invernadero están contaminando la atmósfera con riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

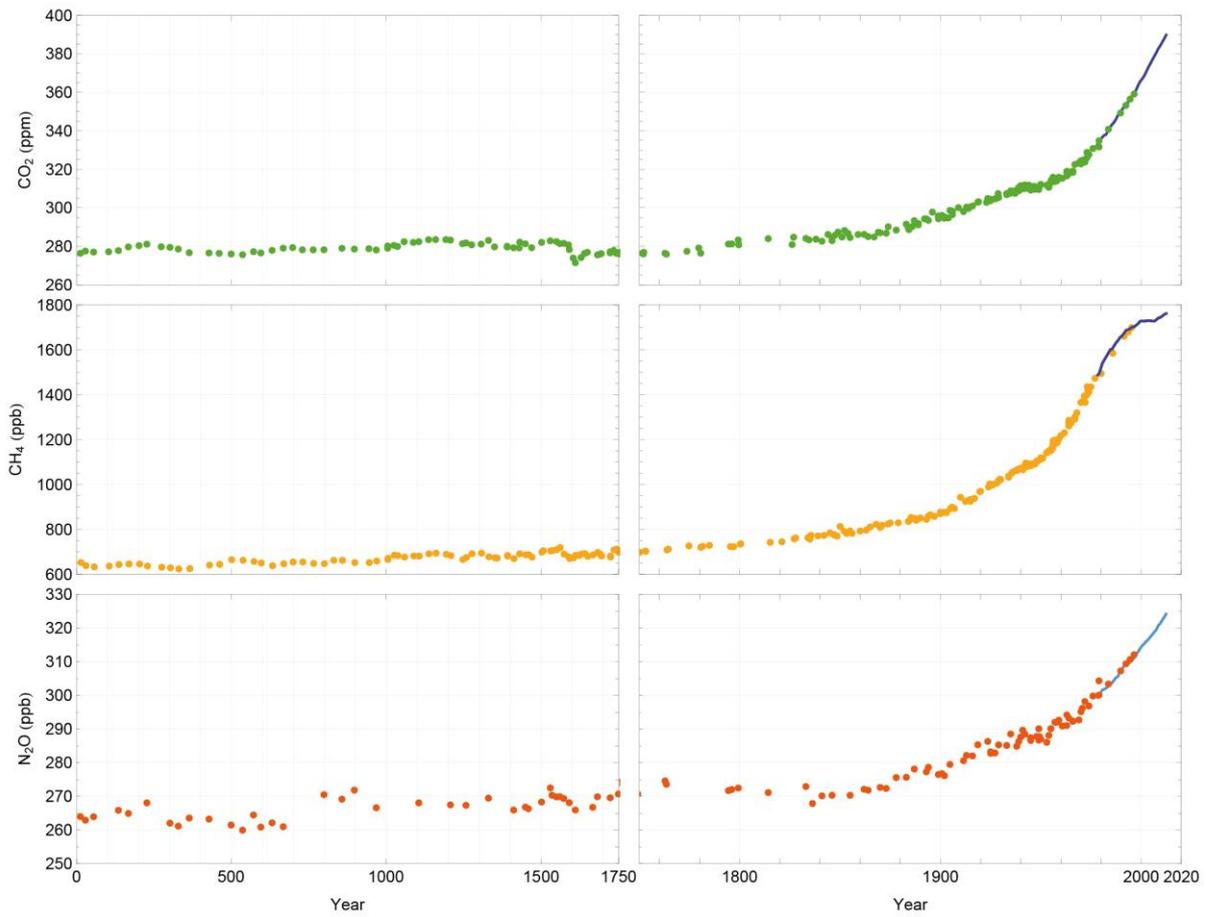


Fig. 37 Concentraciones en la atmósfera de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico desde el año 0 hasta el comienzo de la industrialización (izquierda) y desde el comienzo de la misma hasta el presente (derecha). Los puntos de color representan las concentraciones determinadas mediante el estudio de núcleos de hielo, mientras que las líneas azules representan las determinadas por mediciones directas en el observatorio de Cape Grim.

<http://www.ipcc.ch/report/graphics/images/Assessment%20Reports/AR5%20-%20WG1/Chapter%2006/fig6-11.jpg>

1.3. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de Calidad de Aire y Protección de la Atmósfera define la contaminación atmosférica como “La presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad o la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza.”

Estas sustancias nocivas, denominadas contaminantes atmosféricos, pueden existir en forma de gas o de partículas en suspensión. La concentración de los primeros se da en partes por millón (ppm), mientras que la de los segundos en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Las partículas en suspensión son muy diversas en cuanto a composición química y tamaño. Esto incluye tanto corpúsculos sólidos como minúsculas gotitas líquidas con un tamaño que va desde unos pocos nanómetros hasta unos cientos de micrómetros de diámetro. No obstante, las partículas más finas tienden a crecer, tanto por coagulación como por la condensación de vapor en torno a ellas, mientras que las más grandes tienden a precipitar por acción de la gravedad, de forma que la mayor parte de las partículas en suspensión tienen un tamaño entre 0,1 y 10 μm . En la actualidad y atendiendo criterios de calidad del aire, las partículas en suspensión o aerosoles se dividen en dos grupos; PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$. Las primeras son partículas de materia (Particulate Matter) cuyo diámetro es inferior a 10 μm , conocidas también como partículas inhalables, mientras que las segundas tienen un diámetro inferior a 2,5 μm , denominadas partículas respirables.

Por último, los contaminantes atmosféricos pueden ser primarios si han sido emitidos directamente a la atmósfera por una fuente o secundarios si se han formado en la misma a partir de los contaminantes primarios. Los óxidos de nitrógeno o el dióxido de azufre provenientes de las centrales térmicas o de los grandes motores diésel marinos son contaminantes primarios, mientras que los ácidos nítrico y sulfúrico formados en la atmósfera a partir de la oxidación de los primeros son contaminantes secundarios.

El ozono troposférico también es un contaminante atmosférico secundario, puesto que se forma a partir del dióxido de nitrógeno en la parte baja de la atmósfera y es perjudicial tanto para la salud humana como para el medio ambiente, a diferencia del estratosférico, que se forma en la estratosfera mediante la fotólisis del oxígeno molecular y es necesario para formar la capa de ozono que nos protege de los rayos ultravioleta, la cual también se ha deteriorado por la masiva utilización de los CFCs.

1.3.1. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

En general y siempre bajo criterios de calidad del aire, estos son considerados los principales contaminantes atmosféricos:

1.3.1.1. Monóxido de Carbono (CO)

Es un contaminante secundario que se produce por la combustión incompleta de los hidrocarburos, principalmente en los motores de combustión, aunque también se produce en las calderas y estufas domésticas o en cualquier aparato que queme hidrocarburos, como los altos hornos de las fundiciones. Es un gas tóxico para la salud, atacando el sistema nervioso y cardiovascular. También es perjudicial para el medio ambiente al ser junto al dióxido de

nitrógeno, un precursor del ozono troposférico. Su vida media en la atmósfera es de unos tres meses.

1.1.1.1. Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Normalmente se refieren al dióxido de nitrógeno (NO₂) y al monóxido de nitrógeno (NO). Son contaminantes primarios cuyas fuentes naturales son la descomposición bacteriana de los nitratos orgánicos, los incendios y la actividad volcánica. No obstante, las emisiones antrópicas superan ampliamente a las naturales y se deben mayoritariamente a los procesos de combustión a altas temperaturas, como en los motores y turbinas de los vehículos y las centrales eléctricas. Aunque durante estos procesos se emite una mayor proporción de NO que de NO₂, el primero se oxida con mucha facilidad transformándose en NO₂, por lo que al final la concentración de este último en la atmósfera es mayor. Desgraciadamente el NO₂ es más nocivo, pues además de afectar seriamente al aparato respiratorio, es responsable de la formación del ozono troposférico y junto con el dióxido de azufre de la lluvia ácida. Los óxidos de nitrógeno junto con el ozono troposférico también son los causantes del “smog” fotoquímico de las grandes urbes. La vida media del NO₂ en la atmósfera es de 1 o 2 días.

1.1.1.2. Dióxido de Azufre (SO₂)

Contaminante primario cuya fuente principal es la quema de combustibles fósiles con contienen azufre, principalmente el fuel que utilizan los grandes motores diésel marinos, el carbón de las centrales térmicas y el coque de las fundiciones. Ataca el sistema respiratorio y es junto con el NO₂ el principal responsable de la lluvia ácida. Su vida media en la atmósfera es de 2 a 4 días, al cabo de los cuales la mitad de las emisiones vuelven a la superficie y la otra mitad se transforma en iones de sulfato (SO₄⁻²).

1.1.1.3. Ozono troposférico (O₃)

Contaminante secundario que se forma mediante reacciones fotoquímicas sufridas por el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, el metano y los compuestos orgánicos volátiles (COV). Es un gas altamente oxidante y tóxico para la salud, afectando al sistema respiratorio e incluso a la piel. También es nocivo para la vegetación y es el principal causante del “smog” fotoquímico por delante de los óxidos de nitrógeno. Además, es un gas de efecto invernadero. Tiene una vida media de varias semanas.

1.1.1.4. Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)

Son contaminantes primarios que principalmente están compuestos por hidrocarburos volátiles. Aunque hay más de un millar de compuestos que pueden ser considerados COV, pero los principales son metano, butano, etano, propano, acetona, tolueno, benceno y etileno. En el contexto de la polución atmosférica el metano no se considera contaminante, y por tanto se suele excluir, de manera que se habla de Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano (COVDM). El impacto en la salud y el medio ambiente puede ser muy alto (benceno) o

relativamente bajo (acetona, etanol) según su composición. Junto con el NO₂ son precursores del ozono troposférico.

1.1.1.5. Partículas en suspensión o aerosoles (PM_{2,5} y PM₁₀)

Son sustancias de una gran variedad química, cuyas fuentes pueden ser naturales (polen, polvo, sales...) o antrópicas (hollín, plomo...). Su toxicidad depende de su composición, afectan principalmente al sistema respiratorio y las más peligrosas son las más pequeñas (PM_{2,5}).

ANEXO II

1. MOTORES ELÉCTRICOS, TIPOS Y FUNCIONAMIENTO

Existen dos grandes familias de motores eléctricos; los que funcionan corriente continua (CC) y los que lo hacen con corriente alterna (CA).

1.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

1.1.1. MOTORES CC CON ESCOBILLAS

En 1866, las investigaciones del ingeniero alemán Werner von Siemens, fundador del gigante de la electrónica, permitieron producir motores eléctricos con energía barata, tras lo cual se empezaron a fabricar diversos motores de corriente continua (DC) para la industria y el transporte.

En un motor de corriente continua se crean dos campos magnéticos estacionarios; uno lo producen las bobinas del estator al ser excitadas o mediante imanes permanentes alojados en el mismo y el otro se crea en el rotor al hacer circular una corriente continua a través de sus devanados. Pese a que el rotor gire, el campo magnético creado por él es estacionario respecto al estator y ello se consigue mediante la acción de las escobillas, que distribuyen la corriente en el devanado del rotor siempre de la misma forma, independientemente de su giro. Por lo tanto, el

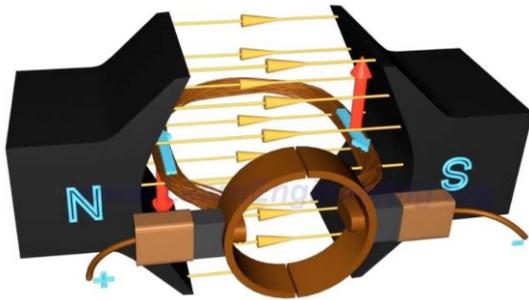


Fig. 38 Motor CC elemental. Lesics Engineers PV LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAIPHANEFto&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJJe0bIS0TRPBwVk&index&t=15s>

campo magnético no gira con el rotor y se produce una interacción constante entre los dos campos estacionarios que producen el par necesario para que el rotor gire.

En esta imagen se puede ver un motor CC elemental. En ella aparece el devanado del rotor, alimentado con la corriente representada con las flechas azules, dentro del campo magnético del estator, representado mediante las flechas amarillas. Para mayor claridad no se ha representado el campo magnético creado por el devanado del rotor, solamente el par de fuerzas resultante de su interacción con el campo magnético del estator. Este par de fuerzas, representadas en rojo y cuya dirección y sentido se establece por la regla de Fleming de la mano izquierda, hacen girar al

devanado. Se puede apreciar como independientemente del giro del devanado, la corriente siempre se aleja en su mitad izquierda y se acerca en su mitad derecha, debido a la acción de las escobillas y los dos colectores en forma de semicírculo. De esta forma y aplicando la regla de Fleming se entiende que la fuerza resultante en el lado izquierdo siempre es hacia abajo y en el lado derecho siempre hacia arriba, haciendo girar el devanado en sentido antihorario. Si este devanado se hace solidario a un eje, ya tenemos un motor útil. Sin embargo, su giro no sería uniforme, ya que cuando el devanado se encuentra en posición vertical el par de fuerzas es nulo. Por eso se monta más de un devanado, calados ha cierto ángulo, de forma que siempre haya alguno en posición horizontal.

En esta segunda se ha añadido el resto de los devanados para conseguir un giro uniforme, el núcleo de hierro del rotor para conseguir un campo magnético más intenso, con las ranuras donde se alojan sus devanados, el colector de delgas para alimentar los devanados y el eje de acoplamiento.

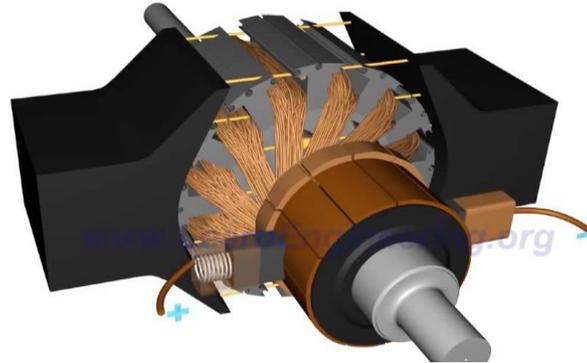


Fig. 39 Motor CC con el núcleo de hierro en el rotor . Lesic Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=3&t=15s>

En realidad, en los motores CC el campo magnético del estator se crea generalmente con un devanado enrollado en un núcleo de hierro como se ve en la imagen, un electroimán. Tanto el estator como el rotor constan de dos circuitos; un eléctrico, formado por los devanados y otro magnético,

formado por el núcleo de hierro. Este, como ya se ha dicho además de alojar los devanados, sirve para canalizar el flujo magnético, intensificándolo, ya que la permeabilidad del hierro es mucho más grande que la del aire y por lo tanto su reluctancia o resistencia al paso del flujo magnético, mucho menor. El flujo magnético representado por las flechas amarillas recorre un circuito cerrado. Cuando atraviesa la espira formada por el devanado derecho regresa por la mitad superior e inferior del núcleo de hierro para atravesar la espira izquierda de izquierda a derecha, luego el rotor con sus devanados (no representado) y por último vuelve a atravesar la espira

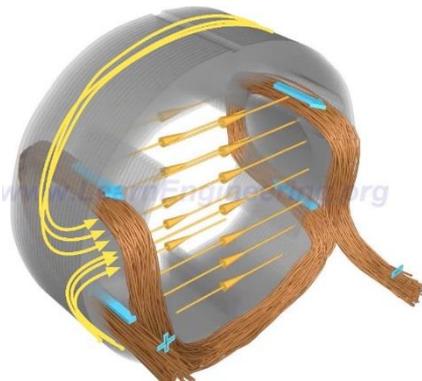


Fig. 40 Estátor motor CC. . Lesic Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=3&t=15s>

derecha cerrando el circuito. Para que este circuito magnético tenga la menor reluctancia posible el entrehierro entre el rotor y el estator ha de ser el mínimo posible, lo justo para que el rotor gire sin rozar el estator.

Los motores CC tienen la ventaja de que la regulación del par y la velocidad es sumamente sencilla, basta con aumentar la intensidad para obtener más par y aumentar el voltaje para obtener más velocidad. Sin embargo, son más pesados que el resto debido a que llevan bobinados tanto el estator como el rotor. Estos devanados, del estator y el rotor, se pueden conectar en serie o en paralelo (motores “shunt”). Los que se conectan en serie tienen un gran par de arranque y se utilizan por ejemplo en los motores de arranque de los vehículos de combustión, pero su velocidad decae drásticamente con la carga. Los shunt no tienen este problema, pero tampoco tienen un gran par de arranque. Por

otro lado, los conectados en serie pueden funcionar tanto en CC como CA (motor “universal”), ya que la polaridad se invierte al mismo tiempo tanto en el devanado del rotor como en el del estator, por lo que la fuerza resultante mantiene la misma dirección y sentido. Hasta ahora el motor universal se ha venido usando en la mayoría de pequeños electrodomésticos como batidoras o taladros.

Estos dos tipos de motores tienen la desventaja de que a grandes velocidades o cuando se requiere mucha potencia, el devanado del rotor induce una fuerte corriente contraelectromotriz en el devanado del estator, según la ley de Faraday-Lenz, que se opone a la corriente con que alimentamos el estator, aumentando la impedancia del mismo. Por otro lado, la capacidad de las escobillas para transmitir la corriente a altas velocidades o cuando se requiere mucha intensidad se reduce mucho, produciendo ruido y chispas que sumado a la impedancia del estator producen una disminución del rendimiento. Por estas razones no se construyen motores CC de gran potencia o que giren a muy altas revoluciones. No obstante, en los 60 surgieron los motores CC sin escobillas, cuando la tecnología de los semiconductores se desarrolló lo suficiente como para controlarlos electrónicamente.



Fig. 41 Motor CC sin carcasa. . Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it works* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefio&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index3&t=15s>

1.1.2. MOTORES CC SIN ESCOBILLAS (BLDC)

En los motores BLDC, por sus siglas en inglés, el rotor va por fuera del estator y crea su campo magnético por medio de imanes permanentes. Este campo magnético es estacionario respecto al rotor. El estator, alojado dentro del rotor, contiene unos devanados que alimentados alternativamente crean un campo magnético giratorio, al que sigue el campo creado por los imanes permanentes del rotor, que al ser solidario al mismo lo hace girar.

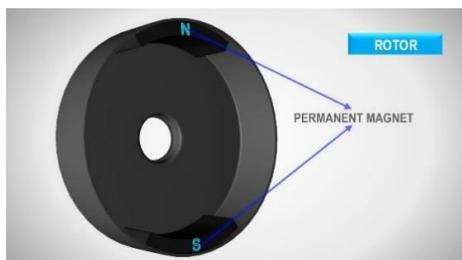


Fig. 42 Rotor exterior. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4>

Tanto los dos campos magnéticos como el rotor giran a la misma velocidad por lo que se pueden considerar motores síncronos, aunque esta acepción se reserva para los motores que se alimentan de corriente alterna.

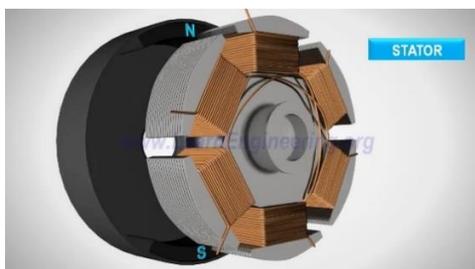


Fig. 43 Rotor exterior y estator interior. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4>

Los devanados del estator son trifásicos, cada uno de los tres conductores se dispone de tal manera que forme un par de bobinas en serie, enfrentadas entre sí. Por lo tanto, cada devanado consta de dos bobinas, sumando un total de 6. En la figura el devanado A se representa con sus dos bobinas en naranja, el B en verde y el C en amarillo.

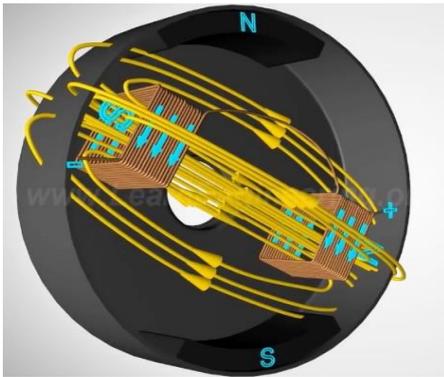


Fig. 46 Flujo magnético en el bobinado "A" Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVl&index=4>

Cuando se hace circular una corriente continua a través de cualquier devanado (el A en la figura 44), se vuelve a cumplir la ley de Ampere y el devanado se convierte en un electroimán, creando sus propios polos N y S.

El campo magnético creado por el devanado interactúa con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, formándose dos pares de polos magnéticos que se atraen si son opuestos y se repelen cuando son del mismo signo.

Esto hace que el rotor de la fig. 45 comience a girar en sentido antihorario.

En cuanto los polos magnéticos del rotor alcanzan los del devanado A en el estator, se corta la corriente a ese devanado y se alimenta el siguiente, el B de la figura. Entonces los polos del rotor tratan de alcanzar a los del B, pero éste se vuelve a desconectar y se pasa la corriente al C, repitiéndose el mismo ciclo continuamente, de forma que el rotor sigue al campo giratorio creado por el estator en todo momento.



Fig. 44 Bobinados. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVl&index=4>

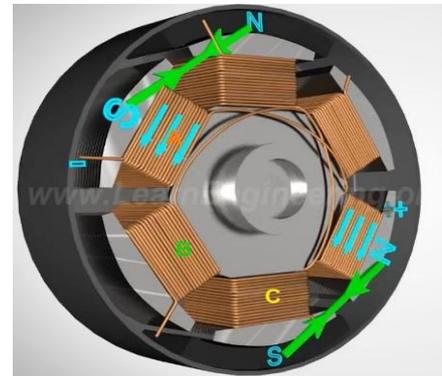


Fig. 45 Atracción entre los polos. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVl&index=4>

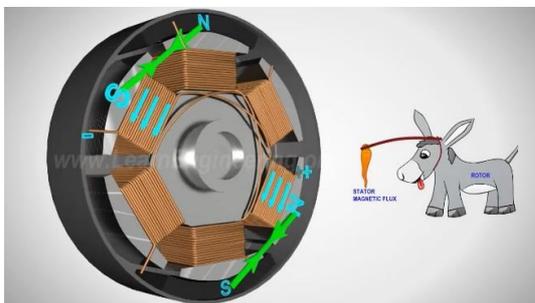


Fig. 47 Polos del rotor siguiendo a los polos del bobinado "A". Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVl&index=4>

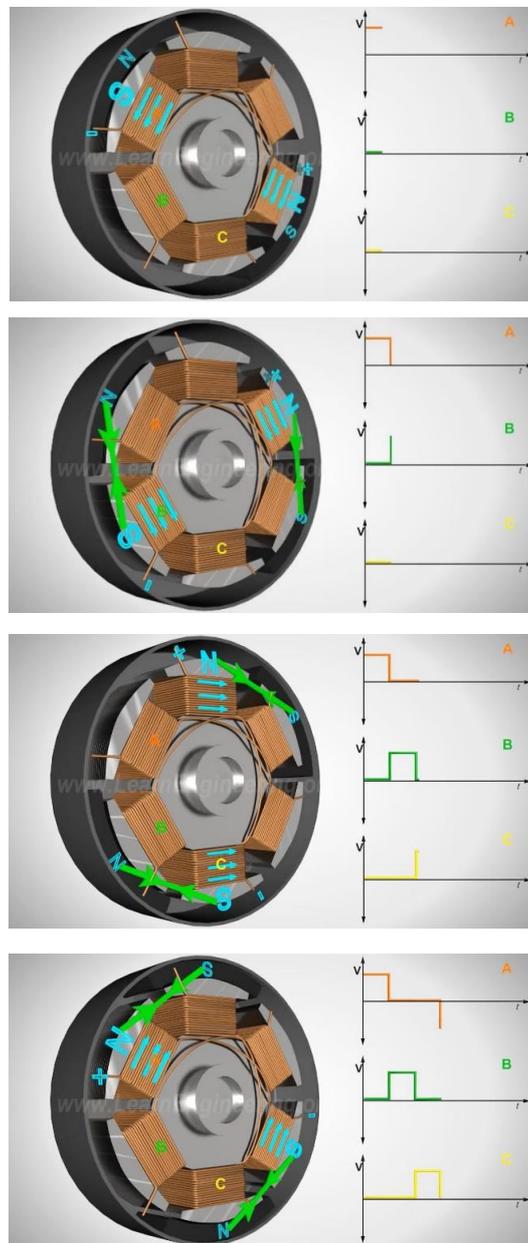


Fig. 48 Secuencia de alimentación de las bobinas del estátor Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *DC Motor, how it Works* (vídeo). Recuperado de *Brushless DC Motor, how it works?* (imagen). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&st=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4>

En la práctica, para aprovechar mejor el motor y conseguir mayor par, los devanados se conectan en estrella y se alimentan de dos en dos, es decir, cuatro bobinas cada vez.

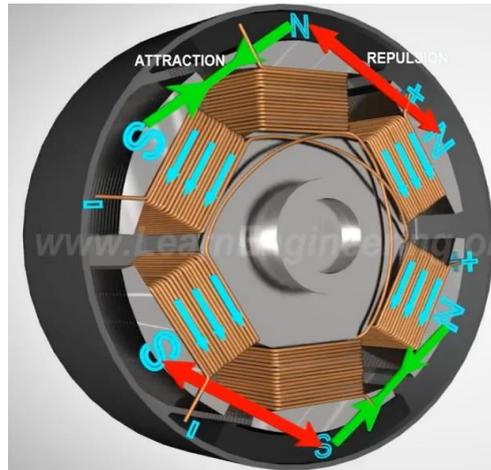


Fig. 49 Fuerzas de atracción y repulsión entre los polos de los imanes permanentes y los polos de los bobinados Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4>

Lógicamente, para saber cuándo hay que alimentar cada par de devanados es necesario conocer la posición del rotor en todo momento. Para ello estos motores disponen de unos sensores tipo Hall que informan de la posición del rotor. Esta información es analizada por el procesador electrónico que decide que par de devanados hay que alimentar.

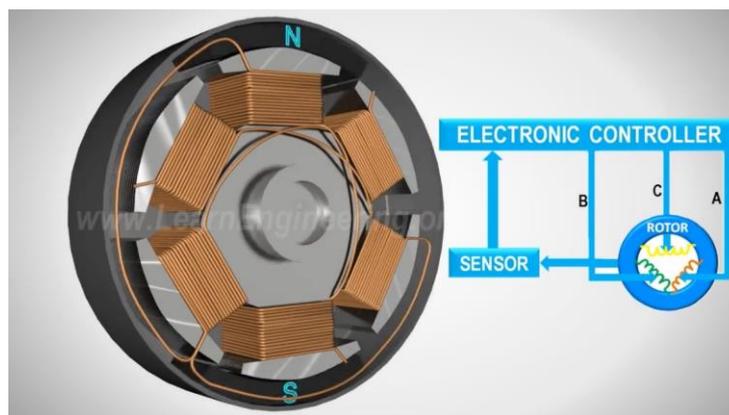


Fig. 50 Control electrónico. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Brushless DC Motor, how it works?* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=4>

Los motores BLDC tienen muy buen rendimiento y un par de arranque muy alto, por lo que son utilizados en muchos vehículos eléctricos y en todos los híbridos. Sin embargo, siguen teniendo la desventaja de que a altas revoluciones el campo generado por los imanes del rotor, que no se puede controlar, induzca una fuerza contraelectromotriz en los devanados del estator, aumentando su impedancia y produciendo calor y cierta pérdida de rendimiento.

1.2. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

En los motores de corriente alterna el estator también crea un campo magnético rotativo, pero de una forma mucho más sencilla que los motores BLDC, sin necesidad de control electrónico, simplemente aprovechando la frecuencia de la CA.

Existen dos tipos; el motor síncrono, en el que el rotor es solidario a su campo y por tanto gira con él, y el asíncrono o de inducción, en el que el rotor tiene cierto “deslizamiento” y gira algo más lento que su propio campo.

Hay que entender que los campos magnéticos creados por el estator y el rotor siempre están en reposo uno respecto de otro, no hay movimiento relativo entre ellos. De otra forma no se produciría un par continuo y el estator y el rotor se “desacoplarían”. Ya sean motores DC, BLDC o AC, los campos creados por el estator y el rotor están acoplados, pero se llaman síncronos a los motores cuyos rotores también giran a la velocidad síncrona, es decir, la velocidad de giro de los dos campos.

Tanto en los motores síncronos como asíncronos el estator es exactamente igual, siendo el rotor diferente. Mientras que en el motor síncrono el rotor lleva un devanado alimentado con CC, o directamente mediante unos imanes permanentes para generar su campo magnético, el rotor de los motores asíncronos o de inducción es de tipo “jaula de ardilla” (por su parecido con las jaulas en forma de barrilete donde los hámsteres corren sin moverse del sitio) y su campo lo genera por las corrientes inducidas en la jaula, que es de material conductor, cuando es atravesada por el campo magnético giratorio del estator.

1.2.1. MOTORES ASINCRONOS O DE INDUCCIÓN

Cuando Nikola Tesla patentó su motor de inducción en 1886, éste barrió a los motores CC que Siemens empezó a producir 20 años antes. Frente a los motores CC que eran grandes, pesados, ruidosos y producían chispas, Tesla diseñó un motor barato, liviano, silencioso y que apenas necesitaba mantenimiento, pues prescindía de las escobillas. Desde entonces es el motor eléctrico más utilizado hasta el día de hoy. La mayoría de las líneas ferroviarias de media-larga distancia y las líneas de alta velocidad lo montan, hasta la compañía de Elon Musk utiliza motores de inducción, como no podía ser de otra manera llamándose como su inventor.

La idea de Tesla fue brillante; por una parte, diseñó un estator que alimentado con CA que producía un campo magnético giratorio espontáneamente, sin necesidad de conmutadores y por otra, diseñó un rotor en el que el campo giratorio del estator inducía las corrientes necesarias para que éste creara su propio campo magnético. Todo ello sin necesidad de contacto físico.

Sin embargo, el motor de Tesla no era todo lo eficiente que podía ser, básicamente porque usó un sistema bifásico, de forma que la configuración actual de estos motores se basa más en el motor ideado por el ingeniero eléctrico de origen ruso Mikhail Dolivo-Dobrovolsky, quien introdujo tres devanados calados a 120° en el estator conectados en estrella y una jaula de rotor, mejorando el diseño bifásico de Tesla. En adelante este trabajo se ceñirá a los motores trifásicos.

(No Model.)

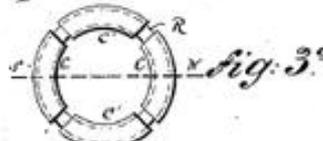
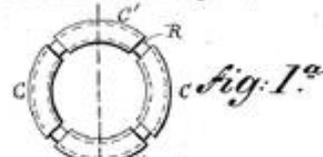
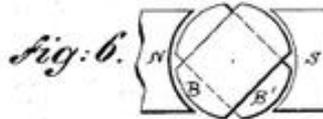
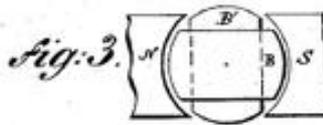
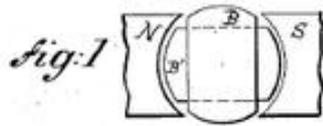
4 Sheets—Sheet 1.

N. TESLA.

ELECTRO MAGNETIC MOTOR.

No. 381,968.

Patented May 1, 1888.



WITNESSES:

Frank E. Hartley
Frank B. Murphy

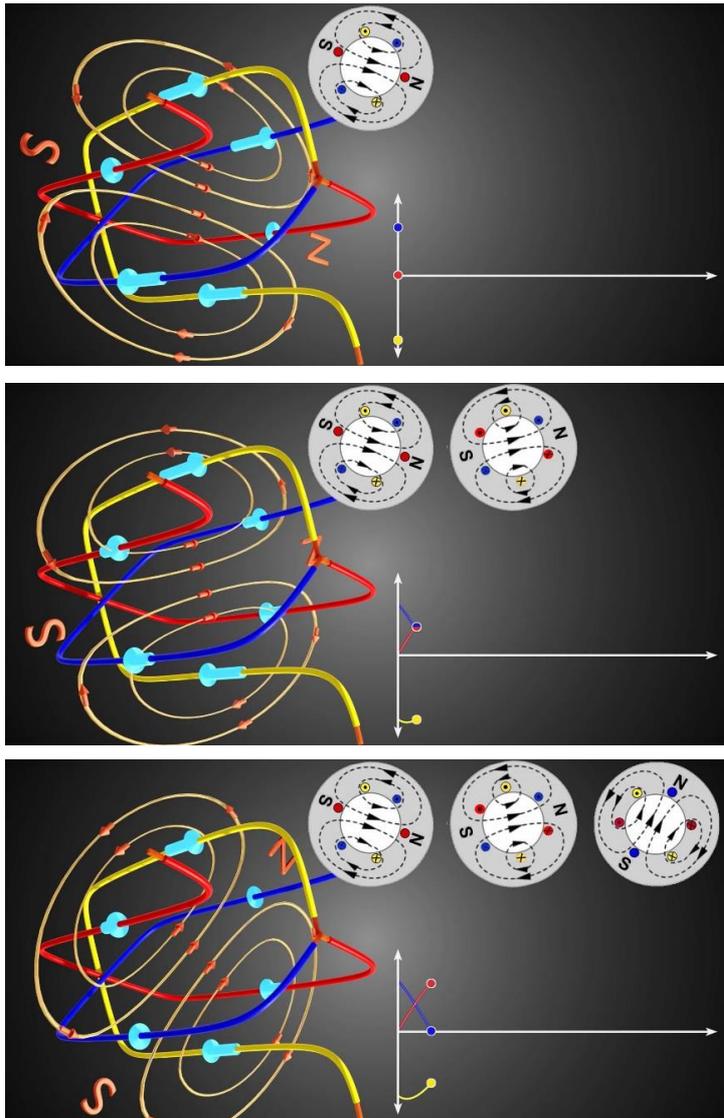
INVENTOR.

Nikola Tesla.
 BY
Duncan, Curtis & Page
 ATTORNEYS.

Fig. 51 Patente del motor de inducción de Nikola Tesla. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Patentes_de_Tesla

Si se disponen tres conductores conectados en estrella, formando tres espiras caladas a 120° y se alimentan mediante una corriente alterna trifásica, con un desfase de 120° entre fases, conseguiremos un campo magnético rotatorio.

Observando las siguientes imágenes se pueden apreciar las corrientes desfasadas que pasan por cada espira, representadas por una flecha azul cuya longitud y dirección se corresponde con la intensidad y dirección de la corriente.



En la primera figura el conductor azul tiene voltaje positivo, el rojo cero y el amarillo negativo. En esta situación las corrientes que circulan por la parte baja de las espiras azul y amarilla van hacia la izquierda, mientras que en la parte de arriba van hacia la derecha. En la espira roja no circula corriente. Según la ley de Ampere el campo magnético que se forma es el de la figura.

Un instante después la corriente circula por las tres espiras, hacia la derecha en la parte de arriba y a la izquierda en la de abajo. En esta situación el campo magnético a girado unos pocos grados en sentido antihorario.

En el siguiente instante la espira azul tiene voltaje cero y por tanto no circula corriente pero la que circula por las espiras amarilla y roja crean un campo que ha girado otros pocos grados más en sentido antihorario. Siendo normalmente la frecuencia de la corriente alterna de 50Hz y sabiendo que se tiene que cumplir un ciclo para que el campo magnético vuelva a la misma posición, es fácil deducir que el campo completa 50 giros cada segundo, es decir 3.000rpm.

Fig. 52 Campo rotatorio creado por una corriente alterna atravesando conductores conectados en estrella. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo).

<https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVvk&index=9&t=110s>



Fig. 54 Estátor de un motor de inducción. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBSe28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=9&t=110s>

encendieran una detrás de otra, dando una sensación de giro. Lo mismo ocurre con la intensidad de la corriente a lo largo de las varillas dispuestas en círculo. El campo rotórico creado por estas corrientes

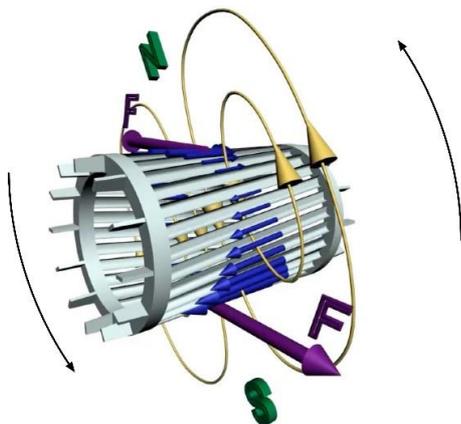


Fig. 53 Fuerzas tangenciales creadas por el campo estatórico en la jala del rotor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBSe28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=9&t=110s>

Si introducimos una jaula construida de material conductor dentro de un estator que produzca un campo magnético rotativo, las varillas de la misma serán atravesadas por el flujo magnético en rotación y se inducirá una corriente en ellas.

Esta corriente a su vez creará su propio campo magnético, el campo rotórico, que, según la ley de Lenz, se opondrá al campo que indujo la corriente en las varillas, es decir, al campo del estator. Ante esa oposición el campo estatórico “empujará” al campo rotórico, obligándolo a girar con él a la misma velocidad y este último arrastrará al rotor, pero a una velocidad algo menor.

Al ser la jaula un circuito cerrado, las corrientes inducidas son libres para circular por cualquier punto de la jaula y lo hacen con más intensidad por las varillas que en ese momento son barridas por el flujo magnético en rotación. Es como si unas bombillas dispuestas en círculo se

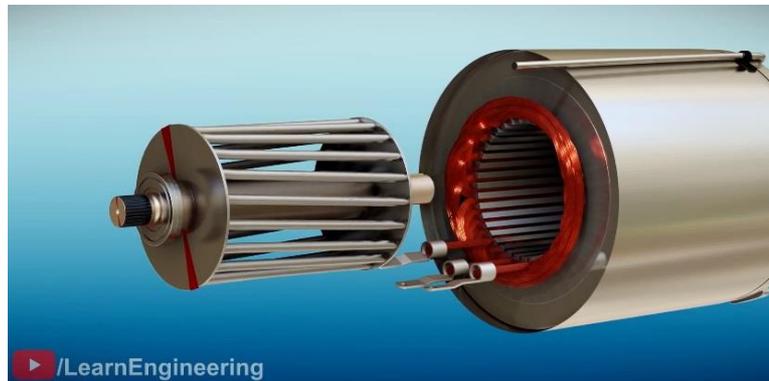


Fig. 55 Motor de inducción de Tesla, Inc. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=3s>

inducidas también gira respecto del rotor, aunque lo arrastra como si fuera una transmisión medio embragada, a una velocidad algo menor. Esta diferencia de velocidad se llama “deslizamiento”. Cuando la carga del rotor aumenta el rotor disminuye su velocidad aumentando el deslizamiento y la velocidad relativa con la que las líneas de flujo del campo estatórico cortan las varillas. Este aumento de velocidad relativa genera unas corrientes mayores en las varillas que a su vez crean un campo rotórico más fuerte, por lo que el rotor vuelve a recuperar su velocidad, haciendo la misma función que un regulador

en un motor diésel. Hay que señalar que el rotor nunca alcanza la velocidad de sincronismo, esto es, la velocidad a la que giran los dos campos magnéticos. Si el rotor girara a las mismas vueltas que el campo magnético rotatorio, no existiría una velocidad relativa entre el campo y el rotor, por lo que las líneas de flujo no cortarían las varillas de la jaula y en consecuencia no crearían el campo rotórico.

En la ilustración se representa una jaula dentro de un campo magnético en rotación antihoraria.

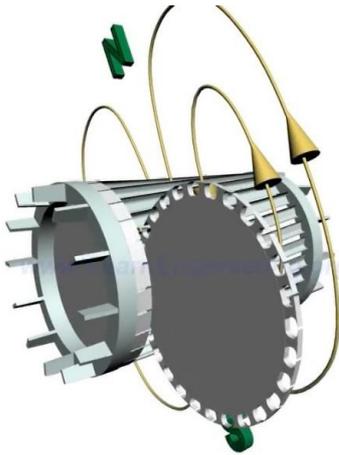


Fig. 56 Un disco de los que está formado el rotor. Lesics Engineers PV LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=L1JBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBvVk&index=9&t=110s>

Las varillas que se encuentran entre el polo N y S son atravesadas por una mayor densidad de flujo magnético que el resto, por lo que la corriente inducida en ellas es mayor. Un instante después, el campo habrá rotado un poco, de forma que serán las varillas contiguas (en sentido antihorario), las que tengan mayor corriente y así sucesivamente. Como resultado tenemos otro campo, el rotórico, que también gira respecto del propio rotor. No obstante, ello no impide que a cada momento se vaya creando un par de fuerzas, representadas en lila, que obligan al rotor a girar, aunque a una velocidad menor que la de sincronismo, a la que giran ambos campos.

En un motor real el rotor de jaula de ardilla no es hueco, sino que tiene un núcleo macizo hecho de material

ferromagnético para facilitar el paso del flujo magnético a través de él. Está compuesto de varios discos para evitar en la medida de lo posible las corrientes parasitas que se inducen en su interior cuando es atravesado por dicho flujo.

Los motores de inducción magnética tienen un buen par de arranque y se puede aumentar bobinando el devanado del estator de forma que genere más de un par de polos. De esta manera la velocidad síncrona se reduce y en consecuencia la velocidad del rotor, pero aumenta su par. Los primeros motores eran de velocidad constante, pues es necesario variar la frecuencia para ajustar la velocidad y los variadores de entonces eran muy grandes, complicados y costosos. Hoy en día, con el desarrollo de la electrónica los variadores de frecuencia son pequeños y relativamente baratos. Estos motores también pueden funcionar como generadores ya que, si hacemos girar el rotor más rápido que la velocidad de sincronismo, este empezará a inducir corriente en el devanado del estator. Se usan prácticamente en todos los campos, en la industria, los ferrocarriles, en los electrodomésticos...etc. Son los que habitualmente se montan en los buques de propulsión diesel-eléctrica.

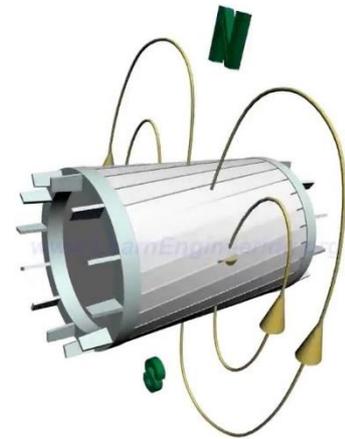


Fig. 57 Rotor macizo con todos los discos montados. Lesics Engineers PV LTD. 2021. *How does an induction motor work* (vídeo). <https://www.youtube.com/watch?v=I0JBUSE28&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBvVk&index=9&t=110s>

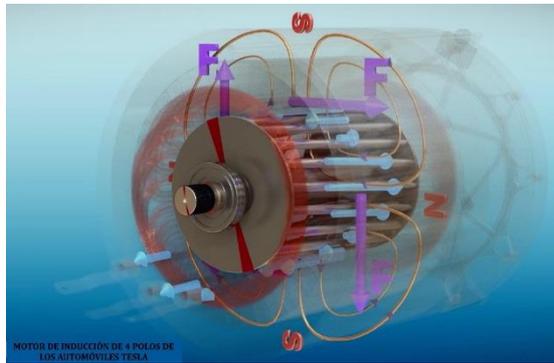


Fig. 58 Corrientes inducidas en el motor del Tesla Model 3. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=s>



Fig. 59 Motor síncrono. Ali, Zahid. *Types of Synchronous Motor*. Recuperado de <https://www.theengineeringknowledge.com/types-of-synchronous-motor/>

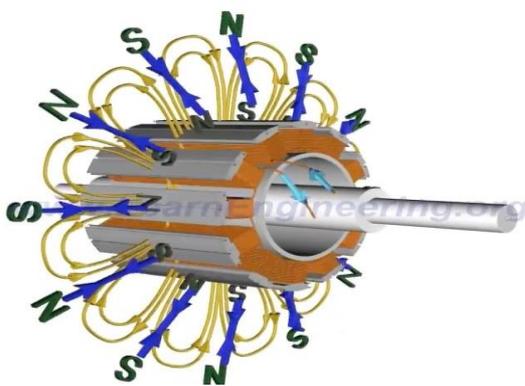


Fig. 60 Campo rotórico y sus polos alineados con los polos del estator Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Working of Synchronous Motor* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Vvk2jDXxZII&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJJe0bIS0TRPBwVvk&index8&t=2s>

En definitiva, son motores muy versátiles, sencillos y robustos, que prácticamente no necesitan mantenimiento y que ofrecen un gran rendimiento. Los motores que montan los vehículos de la compañía Tesla de Musk, por ejemplo, alcanzan con un rendimiento del 94%.

1.2.2. MOTORES SÍNCRONOS

El estator de los motores síncronos es igual que el de los motores asíncronos o de inducción, aunque generalmente los tres devanados se bobinan de manera que el campo magnético resultante tenga más de dos pares de polos.

El rotor es diferente, pero muy parecido al del motor CC con escobillas, un electroimán. Un núcleo formado por discos de hierro en cuyas ranuras se aloja un devanado por el que se hace pasar corriente continua, que crea un campo estacionario. En lugar de tener una gran cantidad de espiras independientes conectadas al colector de delgas, el devanado de los rotores síncronos está formado por un solo conductor, pero bobinado de forma que tenga los mismos pares de polos que el estator, y conectado a dos anillos rozantes. Por este devanado la corriente siempre circula en la misma dirección y por tanto, el campo magnético que se crea es estacionario con respecto al rotor.

En la figura 60 se representa un rotor síncrono dentro del campo magnético del estator, cuyos polos resultantes son los que están en la periferia. Del campo magnético creado por el rotor sólo se representan sus polos, que son los de la superficie del rotor. Se ve claramente como ambos campos están acoplados, de manera que al campo rotórico no le queda otro remedio que girar junto al estatórico. Como el campo rotórico es estacionario respecto del rotor, los tres giran a la misma velocidad.

Estos motores no pueden arrancar por sí solos. Cuando el rotor está en reposo y se conecta la

corriente, instantáneamente se crean el campo rotativo del estator y el estacionario del rotor. Los polos del campo rotativo pasan por encima de los polos del campo estacionario, pero siempre N y S alternamente, de forma que los polos del campo estacionario también se sienten atraídos y rechazados alternamente. En consecuencia, el rotor comienza a vibrar sin decidirse a girar hacia un lado o al otro.



Fig. 61 Montaje jaula de ardilla. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Working of Synchronous Motor* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VkJDXxZIhs&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=8&t=2s>

Para solucionar este problema se instala una jaula de ardilla, de forma que durante el arranque se desconecta el devanado del rotor y se deja que las corrientes inducidas en la jaula se encarguen de poner el rotor en movimiento, funcionando durante esta fase como un motor de inducción. Una vez adquirida cierta velocidad, se vuelve a conectar el devanado del rotor y el campo que crea se acopla sin problemas al campo estatórico. Una vez acoplados, al no haber movimiento relativo entre los campos y el rotor, las corrientes en la jaula desaparecen.

Estos motores se utilizan para aplicaciones específicas, donde se requieren velocidades muy uniformes, ya que estos motores tienen la virtud de mantener siempre la misma velocidad de giro independientemente de la carga, siempre que ésta se encuentre dentro del rango del motor. Sin embargo, son más caros, pesados y algo más delicados que los de inducción, requiriendo del mantenimiento de las escobillas. Por otra parte, la construcción de estos motores es exactamente igual a la de los generadores síncronos y son completamente reversibles, transformando la electricidad en movimiento o el movimiento en electricidad. Si se les aplica corriente producen el giro del rotor y si giramos el eje se crea una corriente en el estator. De hecho, todos los alternadores que llevan los automóviles son motores síncronos funcionando al revés, es decir, como generadores. El primer AVE español, la serie S100 de Renfe, llevaba este tipo de motores.

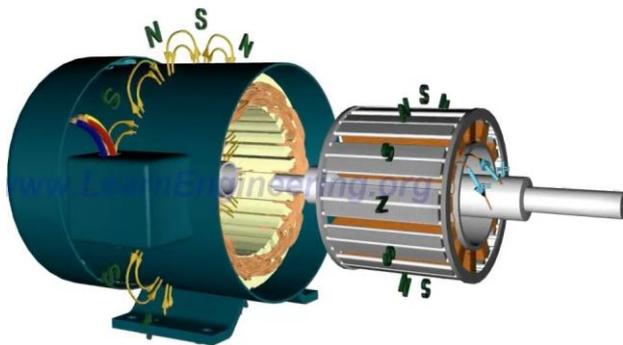


Fig. 62 Montaje del rotor en el estátor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Working of Synchronous Motor* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VkJDXxZIhs&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=8&t=2s>

Estos motores se utilizan para aplicaciones específicas, donde se requieren velocidades muy uniformes, ya que estos motores tienen la virtud de mantener siempre la misma velocidad de giro independientemente de la carga, siempre que ésta se encuentre dentro del rango del motor. Sin embargo, son más caros, pesados y algo más delicados que los de inducción, requiriendo del mantenimiento de las escobillas. Por otra parte, la construcción de estos motores es exactamente igual a la de los generadores síncronos y son completamente reversibles, transformando la electricidad en movimiento o el movimiento en electricidad. Si se les aplica corriente producen el giro del rotor y si giramos el eje se crea una corriente en el estator. De hecho, todos los alternadores que llevan los automóviles son motores síncronos funcionando al revés, es decir, como generadores. El primer AVE español, la serie S100 de Renfe, llevaba este tipo de motores.

1.2.3. MOTORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES (PMSM)

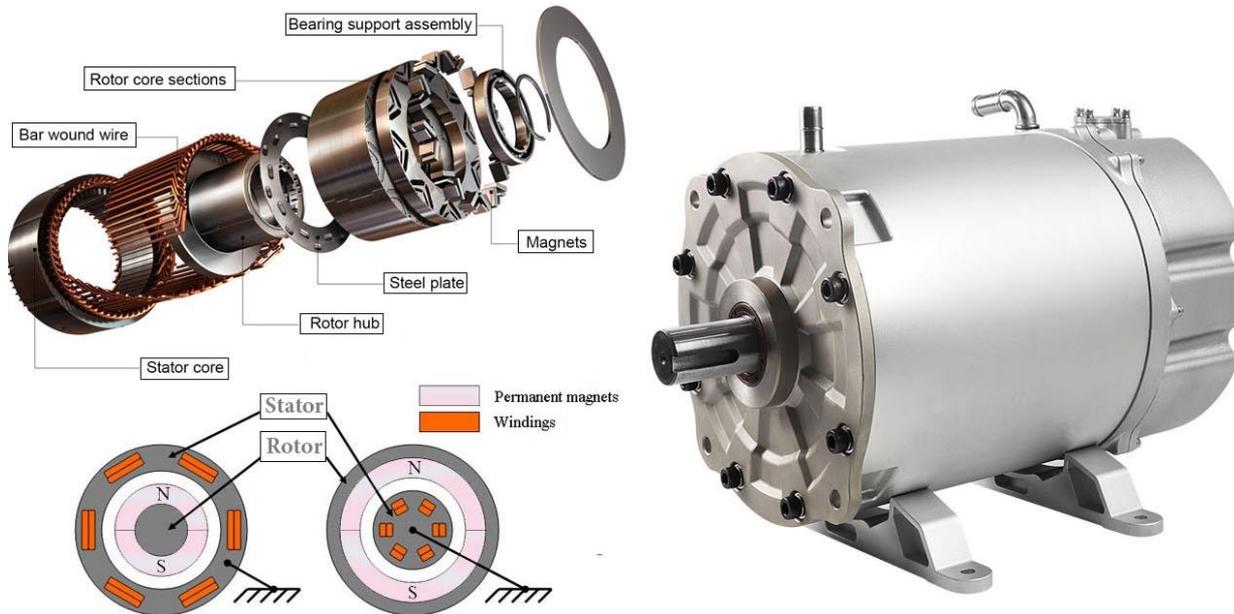


Fig. 63 Motor PMSM. *How a car works. Electric car.* Recuperado de <https://www.newkidscar.com/electric-car/permanent-magnet-synchronous-motor-construction/>

Los motores PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) son motores iguales a los anteriores, pero en lugar de usar un electroimán para generar el campo rotórico, se valen directamente de imanes permanentes. Lo cierto es que los primeros diseños de los motores síncronos contaban con imanes permanentes, pero éstos eran demasiado débiles y se conseguía muy poca potencia, por lo que su uso se descartó en favor de los electroimanes. Pero en la década de los 60 el estado del arte ya permitía fabricarse imanes lo suficientemente fuertes y los PMSM volvieron, sobre todo a partir de los 80, cuando apareció el Neodimio. En la actualidad los imanes son tan potentes que resulta hasta complicado acoplarlos al rotor, pero se consiguen motores muy eficientes, con rendimientos por encima del 90%, ya que no gastan energía en crear el campo rotórico. Estos motores cada año aumentan su cuota de mercado y son los que utilizan los fabricantes de vehículos eléctricos exceptuando a Tesla, así como los trenes de alta velocidad o las líneas de metro más modernas.

Existen dos tipos principales, los que llevan los imanes en la superficie (SPMSM) y los que los llevan en el interior (IPMSM). Pero existen muchas variantes; con el rotor por fuera o por dentro del estator, de flujo magnético axial o radial y los más avanzados con reluctancia variable, como se verá más adelante al abordar este último tipo de motor.

En la fig. 64 se muestran dos motores, el de la izquierda tiene los imanes dispuestos en la superficie del motor y el de la derecha en su interior. La eficiencia del primero es muy alta, porque el par se produce directamente en los imanes que están a una distancia mínima de las



Fig. 64 Rotor SPMSM a la izq. y IPMSM a la der. Av Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12>

bobinas del estator. Tiene la desventaja de tener una proporción relativamente alta de imanes en relación a la potencia entregada, además existe la complicación de adherirlos firmemente al rotor para que no despeguen con la fuerza centrífuga. El motor IPMSM de la derecha en la imagen anterior, monta los imanes en el interior del rotor. Estos van alojados en las ranuras en forma de estrella. Con esta disposición no hay peligro de que los imanes se suelten y además se pueden aprovechar los efectos de una reluctancia variable, pero la construcción del rotor es mucho más complicada.

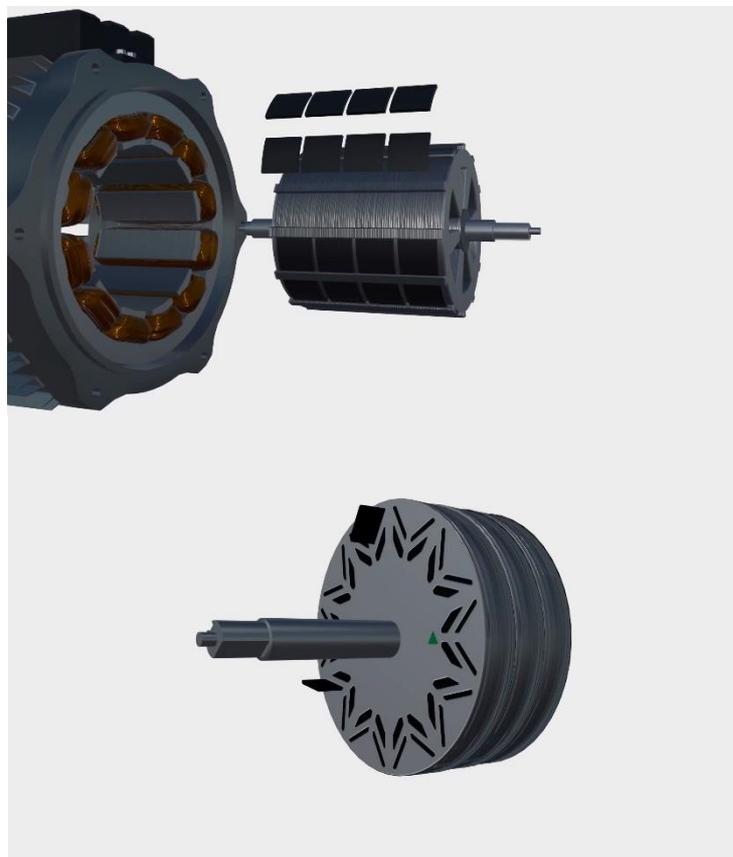


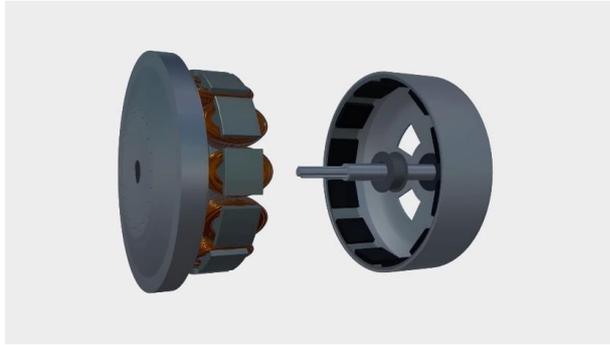
Fig. 65 Construcción de los rotores SPMSM y IPMSM. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12>

Los núcleos de los rotores están hechos de discos, para reducir las corrientes parásitas, como en todos los motores. Sin embargo, hoy en día se usan programas informáticos para



saber exactamente por donde circula el flujo, de forma que se puede retirar material de las zonas por donde no pasa flujo, tal como se ha hecho en el motor SPMSM de la imagen, al que se le han sustraído seis “quesitos” al rotor. Por otra parte, también se pueden diseñar las ranuras del rotor IPMSM de forma que se aproveche la reluctancia variable.

Al igual que en los motores BLDC, los PMSM pueden llevar el rotor por fuera del estator. Esta configuración aumenta el par, ya que la fuerza entre los imanes y el campo del estator se produce a una distancia radial mayor y por



tanto se ejerce un mayor brazo de palanca. Sin embargo, estos rotores no son tan robustos, existiendo el peligro de alabeo, por estar el rotor sujetado por un solo extremo.

Fig. 66 Rotor exterior. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s->

1.2.3.1. MOTORES PMSM DE FLUJO AXIAL

Hasta ahora, todos los motores mostrados están dispuestos de forma que los campos magnéticos creados son radiales, es decir, con los devanados enrollados sobre un eje perpendicular al rotor. Pero últimamente están apareciendo motores con flujo axial, es decir, con los devanados enrollados en torno a un eje paralelo al rotor.

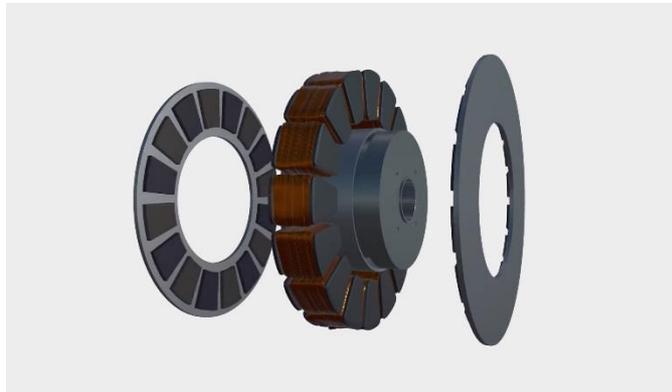


Fig. 68 Motor PMSM de flujo axial con rotor exterior dividido en dos. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12>

dividido en dos. En este caso la fabricación del rotor es complicada, surgiendo problemas de estabilidad rotacional, al igual que los motores de flujo radial con el rotor por fuera del estator. Además, resulta difícil disipar el calor del estator al estar en el centro.

Una mejor solución es dividir el estator en dos y colocar el rotor en la mitad (fig.68). La estabilidad rotacional deja de ser un problema y los imanes se pueden rodear por un anillo que impide que salgan disparados por la fuerza centrífuga. Por otra parte, como las dos mitades del estator tienen una cara mirando al exterior, no tienen problemas para disipar el calor que se genera en los mismos.

Esta configuración aumenta la superficie en la que actúan las fuerzas magnéticas, por lo que tienen una relación peso/potencia menor, en torno a 1kg/kw. Son motores mucho más estrechos, con forma de disco, siendo mucho más adecuados para aplicaciones en los que el espacio es un problema. El estator puede ir en la mitad y el rotor en el exterior,

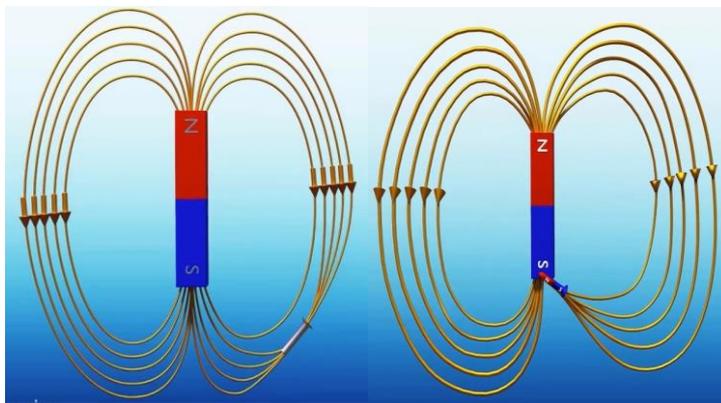


Fig. 67 Motor PMSM de flujo axial con rotor interior. Avid Technology. *Comparison of Permanent Magnet Electric Motor Technology* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=E5VS4s-R7vk&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=12>

Los motores PMSM tienen un rendimiento muy alto en revoluciones bajas y medias, pero a altas revoluciones todos adolecen del mismo problema; el campo magnético formado por los imanes gira tan rápido que induce una fuerza contraelectromotriz muy grande en los devanados del estator. Esta fuerza contraelectromotriz se opone a la corriente con que se alimenta el rotor, por lo que el campo estatórico se debilita mucho pudiendo llegar a desaparecer. Esto implica que su rendimiento a altas vueltas decrece drásticamente. Aun así, su rango de giro es mucho mayor que el de los motores de combustión, pudiendo girar de 0 a 20.000 rpm sin problemas.

1.2.4. MOTORES SÍNCRONOS DE RELUCTANCIA VARIABLE (SYNRM)

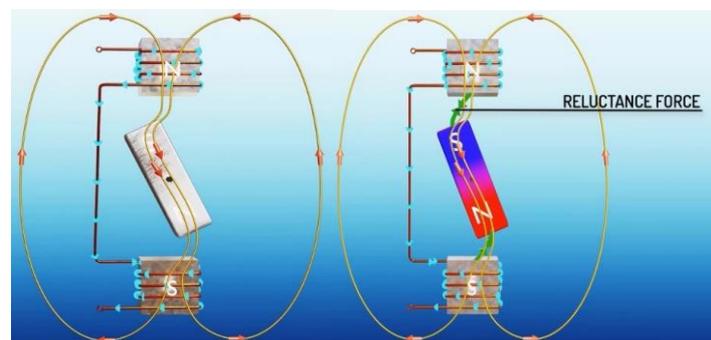
La reluctancia es al magnetismo lo que la resistencia a la electricidad. Es la oposición que ejercen los materiales al flujo magnético, justo lo contrario que la permeabilidad magnética, que es la capacidad de un material para conducir el flujo. El hierro tiene una alta permeabilidad y baja reluctancia, mientras que con el aire ocurre al revés.



Ocurre que el flujo magnético siempre busca el camino con menos reluctancia, aunque tenga que desviarse. Si ponemos un clavo de hierro dentro de un campo magnético, las líneas de campo magnético circundante se desviarán para pasar a través del él. Pero al ser atravesado por este flujo el clavo mismo se convierte en un imán temporal y es atraído por uno de los polos del campo.

Fig. 69 Clavo absorbiendo las líneas de flujo, convertido en imán temporal. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>

De igual modo, si ponemos una barra de hierro que pueda girar sobre un eje dentro del flujo magnético de un electroimán, la barra desviará el flujo para que pase a través suyo, convirtiéndose en un imán, y rotará hasta alinearse con los polos del electroimán.



Si en lugar de introducir la barra en un campo estacionario la colocamos

Fig. 70 Fuerza de reluctancia en una barra de hierro dentro de un campo magnético. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>

dentro del campo giratorio de un motor síncrono, la barra se alinearán con las líneas de flujo y girará con el campo.

Hay que señalar que cuando la barra está perfectamente alineada el par resultante es cero. Si le ponemos un eje a la barra y lo acoplamos a una carga, la barra se retrasará un poco respecto del campo, ya que no existe un par de fuerzas que lo mantenga girando. Pero en cuanto adquiere cierto ángulo respecto del campo, el par de fuerzas aparece y la

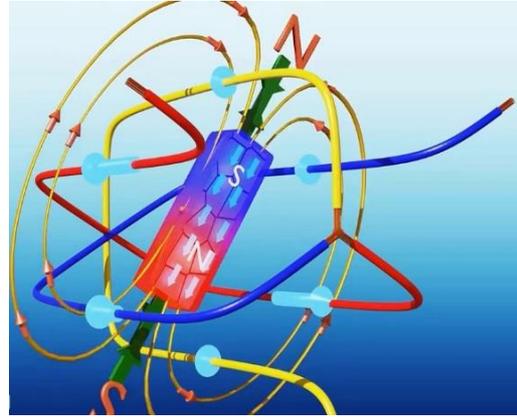


Fig. 71 Barra de hierro en el seno de un campo magnético giratorio. . Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM | A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZl&t=2s>

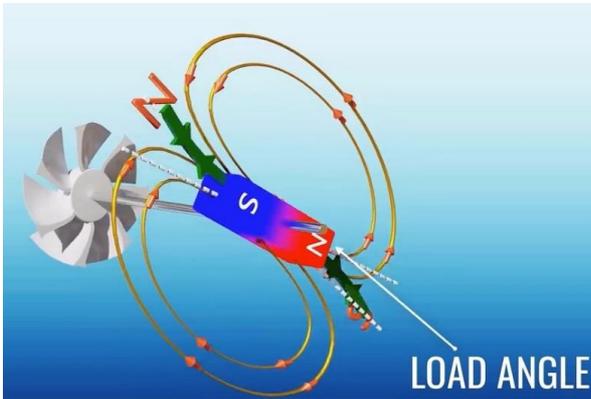


Fig. 72 Ángulo de carga. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM | A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=s>

barra se mantiene girando con cierto ángulo respecto del campo, pero a la misma velocidad y arrastrando la carga consigo.

Si este ángulo se hace demasiado grande la barra se llegaría a desacoplar del campo magnético y se pararía. La clave de estos motores está en el software tan potente que llevan. Un sensor colocado en el eje informa al cerebro electrónico de la posición del eje y este actúa en consecuencia; si el ángulo de carga es demasiado grande aumenta la intensidad de corriente en el devanado del estator para aumentar el par y si la carga es demasiado grande reduce la frecuencia para que la velocidad de rotación del campo disminuya y el rotor no se desacople.

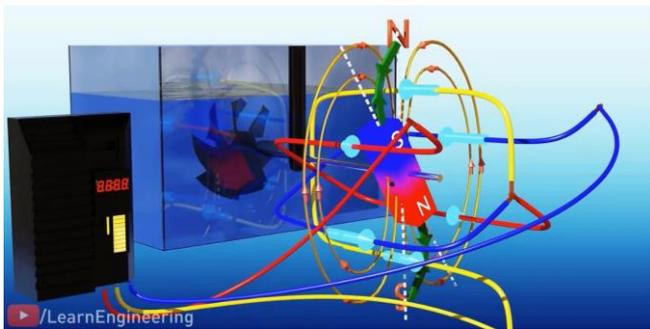
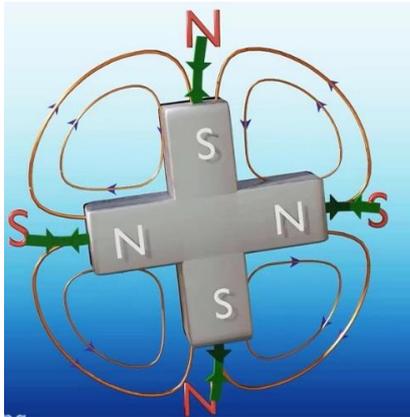


Fig. 73 Controlador de ángulo de carga. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM | A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>

Los motores de reluctancia variable aparecieron a finales del siglo XIX, pero no eran prácticos para girar continuamente ya que se desacoplaban y además no podían arrancar por sí solos, al igual que los motores síncronos con escobillas. Sin embargo, el concepto se desarrolló con los motores “paso a paso” o “steppers”. Aunque

éstos funcionan con corriente pulsada, en la primera década del siglo XXI, con el avance de la electrónica y sobre todo el análisis computacional aparecieron los primeros motores SynRM.

Colocando un rotor con dos barras a 90° en un campo rotatorio de 4 polos, el par aumentará el doble y la velocidad se reducirá a la mitad, es decir, la fuerza con la que gira es directamente proporcional al número de pares de polos, mientras que la velocidad es inversamente



proporcional. El par surge porque la interacción de el rotor con el campo varía considerablemente según la posición del mismo. Cuantas más líneas de campo pasen por el rotor la reluctancia será mucho menor que cuando no lo hacen, por lo que se produce un “par de reluctancia” que obliga a girar al rotor para encontrar la posición en que la reluctancia sea menor.

Si el rotor tuviera una forma redonda la reluctancia siempre sería la misma, independientemente del giro, y por tanto no se produciría el par necesario. Pero si lo diseñamos de forma que la reluctancia sea variable dependiendo de la posición del rotor respecto al campo, entonces aparecerá el par necesario para alinear el rotor en la posición de mínima reluctancia.

Fig. 74 2 barras a 90°. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvwk4ppUZU&t=2s>

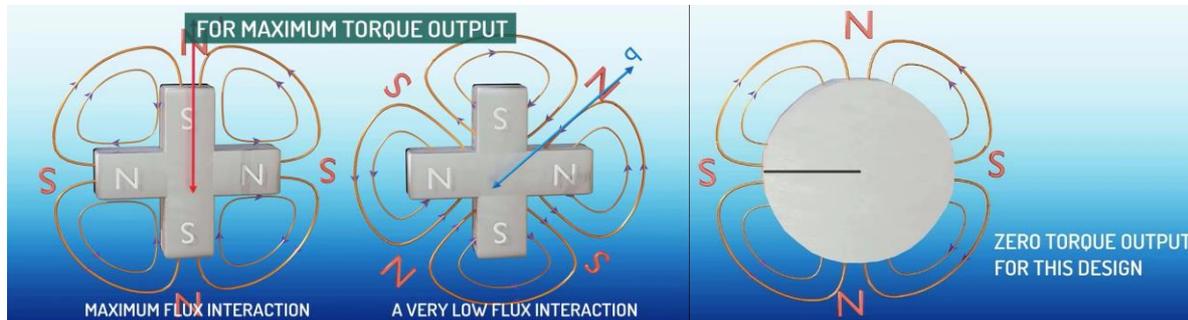


Fig. 75 Rotor con reluctancia variable a la izq. y con reluctancia invariable a la der. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>

En la imagen inferior se puede ver una simulación informática, como las que se usan actualmente para obtener la imagen del campo magnético, en este caso el generado por un estator de 4 polos.

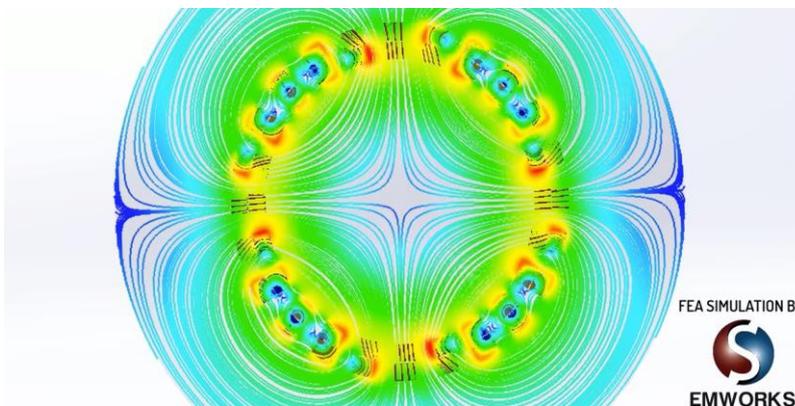


Fig. 76 Simulación informática de las líneas de flujo magnético a través del rotor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM / A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>

Mediante estas simulaciones, se diseñan rotores teniendo en cuenta por dónde pasan las líneas de flujo, intercalando material no ferromagnético allí por donde no pasan.

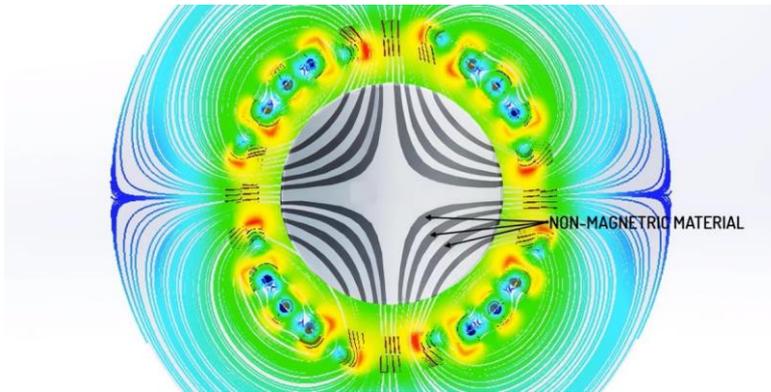


Fig. 77 Rotor diseñado teniendo en cuenta las líneas de flujo. Simulación informática de las líneas de flujo magnético a través del rotor. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM | A new giant in the electrical world* (vídeo Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvwk4ppUZU&t=2s>)

Como se puede ver, en los rotores así diseñados la diferencia de reluctancia entre una posición y otra es drástica.

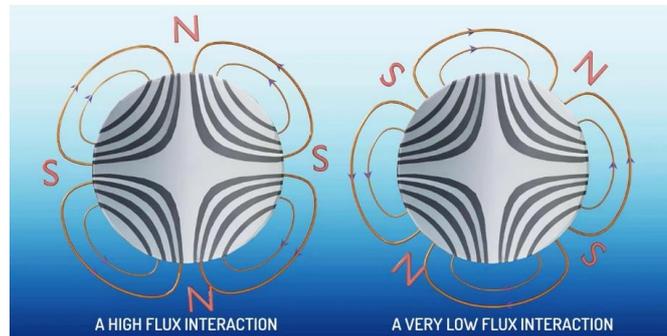


Fig. 78 Posición de reluctancia mínima a la izq. y máxima a la derecha. Rotor con reluctancia variable a la izq. y con reluctancia invariable a la der. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM | A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>

En la práctica, el rotor se fabrica uniendo muchos discos con huecos, siendo el aire el material no ferromagnético. De esta manera se consiguen unos rotores más ligeros y robustos.



Fig. 79 Fabricación del rotor mediante discos a la izq. y mediante capas superpuestas de material ferromagnético y no ferromagnético a la derecha. El montaje de la derecha es más eficiente pero menos práctico. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *SynRM | A new giant in the electrical world* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU&t=2s>

Aunque inherentemente los motores síncronos no pueden arrancar por sí solos, como ya se ha dicho en los motores SynRM, el truco está en la electrónica que usan y que es capaz de reducir la frecuencia en el arranque, de manera que el campo estático gire lentamente y el rotor pueda acoplarse. Una vez acoplado y teniendo en todo momento cuidado de que el ángulo máximo de carga no se sobrepase, el controlador va aumentando la frecuencia hasta que el motor gire a su velocidad nominal.

Los motores de reluctancia variable son lo último en cuanto al estado del arte de los motores eléctricos. Son más baratos de fabricar que el resto, son más ligeros, ofrecen más par de arranque que los de inducción y al igual que éstos no tienen mantenimiento, ya que no llevan ni escobillas ni imanes permanentes. Su rendimiento es muy alto porque al igual que los motores de imanes permanentes no gastan energía alimentando el rotor, pero a diferencia de éstos, no tienen problemas a altas velocidades, ya que no hay ningún campo rotórico que ejerza fuerza contraelectromotriz alguna en el devanado del estator. Son los únicos motores que funcionan con un solo campo magnético. En los apenas 10 años que estos motores llevan con nosotros, su cuota de mercado no deja de crecer exponencialmente y grandes compañías como ABB o Siemens están apostando por ellos.

Actualmente se han comenzado a fabricar motores síncronos que combinan la tecnología de imanes permanentes y la reluctancia variable, son los llamados IPMSynRM o motores de imanes permanentes interiores y reluctancia variable. Tesla ha empezado a montarlos en su modelo más actual y Toyota ha hecho lo mismo con el Prius. En ambos casos han logrado rendimientos del 96%.



Fig. 80 Motor Syn RM de ABB. ABB, LTD. *Start saving energy with ABB's IE5 SynRM motors* (vídeo)

Recuperado de

<https://www.youtube.com/watch?v=3g9IDqkCP3g&list=PLV-PtkGwDV8hXRgTAjPJe0bIS0TRPBwVk&index=2&t=5s>

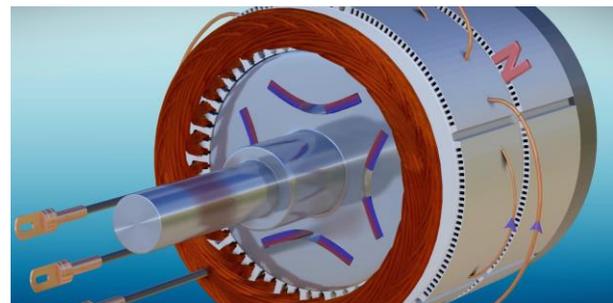


Fig. 81 Nuevo motor IPMSynRM de Tesla. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=3s>



Fig. 82 Motores IPMSynRM de Tesla y Toyota. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it* (vídeo). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio&t=3s>

ANEXO III

1. BATERÍAS Y CELDAS DE COMBUSTIBLE

1.1. BATERÍAS

Se basan en la pila galvánica que a finales del siglo XVIII construyó Alessandro Volta, para zanjarse la disputa de la rana con Luigi Galvani. Demostró que dos metales diferentes sumergidos en un electrolito producen una corriente eléctrica cuando se conectan entre sí, usando cobre, zinc y una solución salina.

Esta corriente es producto de las reacciones redox que se dan entre los dos metales y el electrolito, a través de las cuales uno de los metales se oxida y cede sus electrones al otro, que se reduce. El electrolito, una disolución de iones, permite que los electrones “regresen” al metal que se está oxidando y cierra el circuito, permitiendo que se establezca una corriente en el mismo. Se forma una celda galvánica en la que el electrodo negativo o ánodo es el metal que se oxida y el electrodo positivo o cátodo el que se reduce. Es un efecto bien conocido en los buques, donde los diferentes metales del casco sumergidos en un electrolito, como lo es el agua de mar, forman la celda galvánica, acelerando la corrosión del metal más reactivo, que se oxida y frenando la de los demás, que se reducen. Por esta razón este tipo de corrosión se llama corrosión galvánica.

Debido a varios factores, entre ellos la electronegatividad o fuerza con que cada elemento atrae a sus electrones y a los de los demás, cada metal tiene su propio potencial de oxidación. Este valor nos indica el voltaje que se genera en el proceso de oxidación entre el metal en cuestión y un electrodo de referencia, que suele ser de hidrógeno.

Si disponemos dos metales en una celda galvánica, el que tenga mayor potencial de oxidación se oxidará y el que tenga menor se reducirá, obteniendo un voltaje en la celda igual a la diferencia entre los potenciales de oxidación de cada uno. Normalmente en las tablas o series electroquímicas se suele dar el potencial de reducción en lugar del de oxidación, por lo que cambia el signo, aunque el valor sea el mismo.

Según la tabla de la imagen en la que se dan los potenciales de reducción de varios metales, si fabricamos una celda galvánica con cobre y zinc, como hizo Volta, obtendremos un voltaje de 1,1V, ya que el potencial de reducción del cobre es 0,34V y el del cinc -0,76V. $0,34 - (-0,76) = 1,1V$. Como hablamos de potencial de reducción, el valor más alto corresponde al metal que se reducirá y el más bajo al que se oxidará, por tanto, el cobre se reducirá y el cinc se oxidará.

Half Reaction	Standard Potential (V)
$F_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2F^-$	+2.87
$Pb^{4+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb^{2+}$	+1.67
$Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Cl^-$	+1.36
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	+1.23
$Ag^+ + 1e^- \rightleftharpoons Ag$	+0.80
$Fe^{3+} + 1e^- \rightleftharpoons Fe^{2+}$	+0.77
$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	+0.34
$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	0.00
$Pb^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb$	-0.13
$Fe^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Fe$	-0.44
$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Zn$	-0.76
$Al^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Al$	-1.66
$Mg^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Mg$	-2.36

Fig. 83 Serie electroquímica. VCE Chemistry 2021 *Spontaneous Reactions*. Recuperado de <https://chemistryvce.weebly.com/spontaneous-reactions.html>

Pero si en lugar de cobre usamos magnesio, que tiene un potencial de reducción menor que el cinc, será éste quien se oxide mientras el cinc se reduce, obteniéndose un voltaje de 1,59V (-0,76 – (-2,35)). Conectando varias celdas galvánicas en serie, se puede formar una pila o batería con el voltaje deseado.

Las celdas de las baterías no necesariamente han de estar compuestas por dos metales diferentes, pudiendo usar el mismo metal o incluso un metal y un no metal. Las baterías de arranque que se vienen usando en los automóviles de combustión, por ejemplo, utilizan dos electrodos de plomo, uno de los cuales está oxidado y se reduce (el cátodo) y el otro es puro y se oxida (el ánodo). La cuestión es separar el proceso de oxidación y de reducción para que la sustancia que se oxida únicamente pueda pasar sus electrones a la que se reduce a través de un circuito exterior, de forma que podamos aprovechar la corriente generada. Esta circulará hasta que uno de los electrodos no se pueda oxidar o reducir más, cuando ya no queden más iones libres en el electrolito y por tanto no se puedan transportar las cargas eléctricas necesarias para que las reacciones de oxidación y reducción se sigan produciendo. Una vez descargadas, las baterías se pueden volver a cargar aplicándoles una corriente en sentido contrario, lo que hace que el ánodo gane electrones y se vuelva a reducir y el cátodo los pierda y se vuelva a oxidar, quedando listos para el siguiente ciclo de descarga.

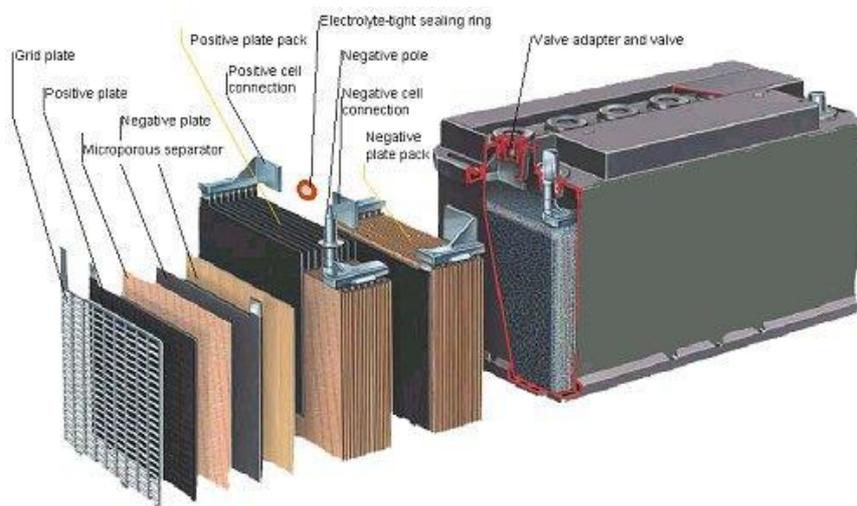


Fig. 84 Batería de plomo-ácido. Studentlesson 2021. *Understanding battery used in automobiles.* Recuperado de <https://studentlesson.com/automotive-battery-definition-functions-components-diagram-working/>

Como ya se ha dicho, las baterías se fabrican conectando varias celdas voltaicas en serie, constando cada celda de varios cátodos y ánodos intercalados y conectados en paralelo. En aras de aumentar la superficie, los ánodos y cátodos tienen forma de placas, elaborando una pasta con el material del que están hechos y aplicándola a una rejilla rectangular que les sirve de soporte. Las placas positivas y negativas así formadas están tan juntas que hay que intercalar una membrana porosa impregnada en electrolito para evitar el contacto entre los dos electrodos, impidiendo el paso de los electrones, pero permitiendo el de los iones. Existen muchos tipos de baterías, dependiendo de la tecnología y los materiales que se usen para fabricar los electrodos, el electrolito y la membrana.

La primera batería recargable data de 1859, era de plomo-acido y se sigue usando actualmente. Luego vinieron las alcalinas de níquel-cadmio, las de mercurio (las pilas de botón) y ya más recientemente las de níquel-metal hidruro, pero a partir de 1991 en que Sony sacó la primera batería de iones de litio comercial, estas se han impuesto sobre todas las demás. Al ser el metal con uno de los potenciales de oxidación más altos, se consiguen baterías con mayor capacidad y todavía no se ha conseguido extraer todo su potencial. Las baterías ion-litio actuales cuatriplifican la densidad energética de las baterías de plomo-ácido, triplican las de níquel-cadmio y doblan las de níquel-metal-hidruro.

1.1.1. BATERÍAS DE ION-LITIO

Funcionan bajo el mismo principio que el resto, pero de una forma más compleja. El cátodo es un óxido de litio, cobalto y níquel, mientras que el ánodo es un compuesto de intercalación de grafito. Ambos están separados por una barrera impregnada

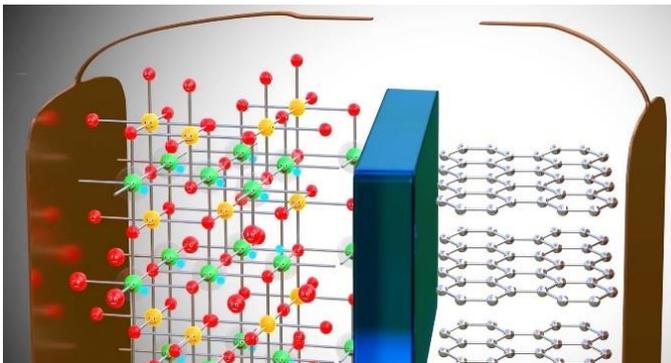


Fig.86 Celda de ion-litio descargada. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?*(video) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>

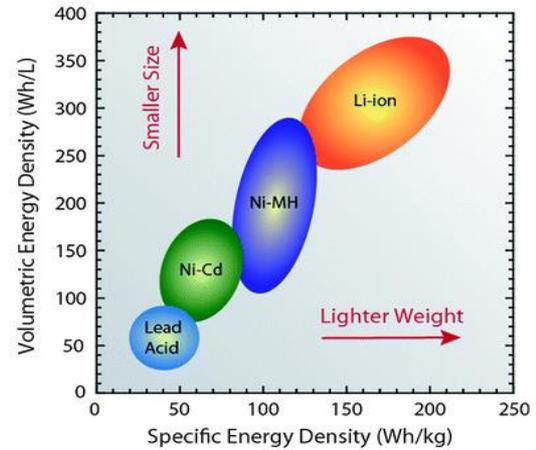


Fig. 85 Densidad energética de distintas clases de celdas. Sinovoltaics Group 2021. *Energy density and specific energy of battery*. Recuperado de <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/energy-density-and-specific-energy-of-battery/>

en sales de litio, que forman el electrolito. A nivel molecular, la estructura cristalina del grafito tiene la particularidad de ordenarse en capas de un átomo de grosor, en las cuales los núcleos de los átomos se enlazan formando unas mallas hexagonales.

En las figuras que acompañan al texto se ha representado una celda de este tipo, con el cátodo a la izquierda y el ánodo a la derecha. Las bolitas verdes representan el litio, las amarillas el cobalto y las rojas el níquel. El compuesto de intercalación de carbono se representa por la estructura laminar color plata de la derecha.

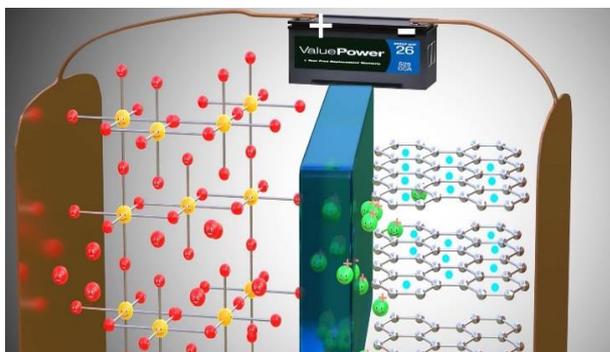


Fig.87 Celda de ion-litio en carga. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?*(video) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>

Cuando se aplica una corriente en sentido inverso³⁰, los electrones que se encuentran en el óxido metálico son forzados a salir del cátodo y a entrar en el ánodo, intercalándose en la estructura del grafito. Los iones positivos del cátodo son atraídos por los electrones que se han marchado al ánodo, al otro lado de la barrera. Como la barrera puede ser atravesada por los iones, éstos la traspasan y también se intercalan en la estructura del grafito. Una vez que la estructura de grafito se llena de átomos de litio, la batería está cargada

Cuando volvamos a conectar los electrodos, el litio, que tiene un gran potencial de oxidación (sólo hay un electrón en su último orbital y está deseando deshacerse de él), cederá sus electrones al óxido de cobalto del cátodo, reduciéndolo. A medida que aumenta el número de electrones en el cátodo, los iones positivos se ven atraídos y abandonan la estructura de grafito para migrar otra vez al cátodo, equilibrando la diferencia de cargas a ambos lados de la barrera.

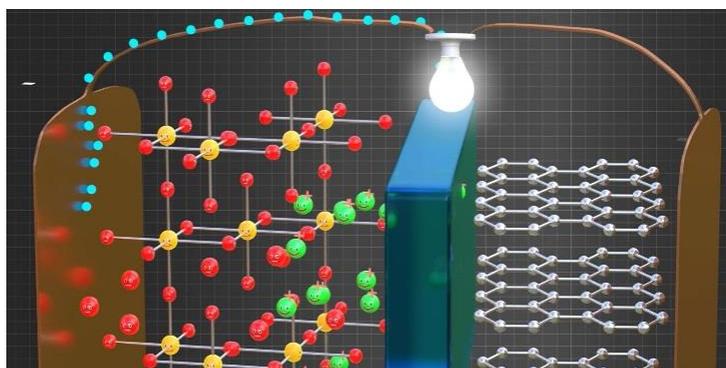


Fig. 88 Celda de ion litio a punto de descargarse del todo. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?*(video) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>

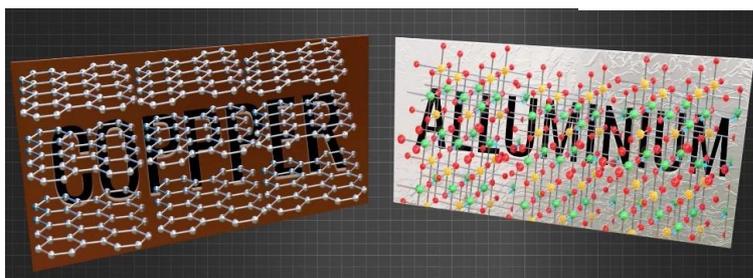


Fig. 89 Compuesto de intercalación adherido a la lámina de cobre (izq) y óxido de litio y cobalto a la de aluminio (der). Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?*(video) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>

Tanto el óxido de cobalto como el compuesto de intercalación de grafito no permiten una buena transferencia de electrones hacia los polos de la celda, por lo que van estampados en una lámina de aluminio y cobre respectivamente, llamados colectores. El aluminio del cátodo se conecta al polo positivo y el cobre del ánodo al negativo.

³⁰ Siempre refiriéndonos al sentido real de la corriente

Según el tipo de aplicación y los factores que vayan a primar, tal como el precio, la capacidad o los ciclos de vida, el cátodo se fabrica con óxidos de distintos metales, siendo el cobalto el más caro. En la figura se muestran varios tipos de baterías ion-litio.

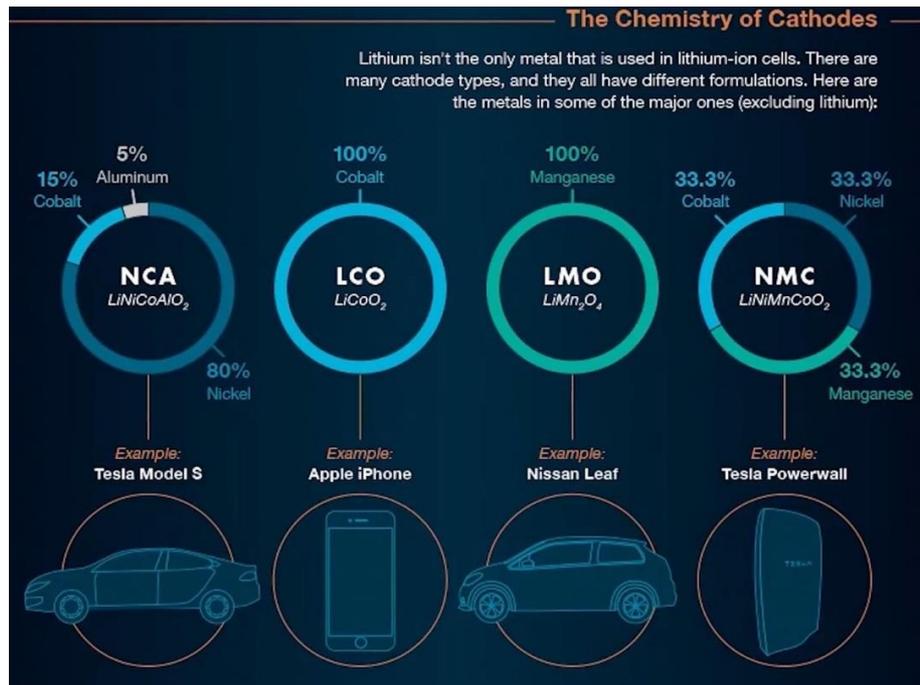


Fig. 90 Distintos tipos de baterías de ion litio. Curious Elephant. *Tesla Battery, How does it Work?* (vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=9fCRWOa9gQk&list=PLV-PtkGwDV8givqNn2aj2ig761gtfE6A2&index=2&t=55s>

Las baterías de ion litio son paquetes formados por celdas individuales cuyos electrodos, con forma de lámina, van plegados formando una placa, o enrollados como las pilas comunes. Este último formato es el que más se usa en baterías de tracción, sobre todo después de que Tesla lo adoptara para fabricar las baterías de sus coches, formadas por miles de celdas individuales. Tesla comenzó a fabricar sus baterías con celdas suministradas por Panasonic, con el estándar 18650, es decir, 65mm de largo y 18mm de diámetro. Su reducido tamaño permite fabricar baterías con gran cantidad de celdas individuales, de manera que la intensidad de corriente suministrada por cada unidad no sea excesiva. Con ello se consigue generar menos calor y evacuarlo más fácilmente, puesto que al haber muchas celdas la superficie de contacto es mayor. Sin embargo, éste último lustro la tecnología de las celdas de ion-litio se está desarrollando enormemente, reduciendo su resistencia interna y aumentando su rendimiento, de forma que cada vez generan menos calor y se pueden construir más grandes. La celda NCA

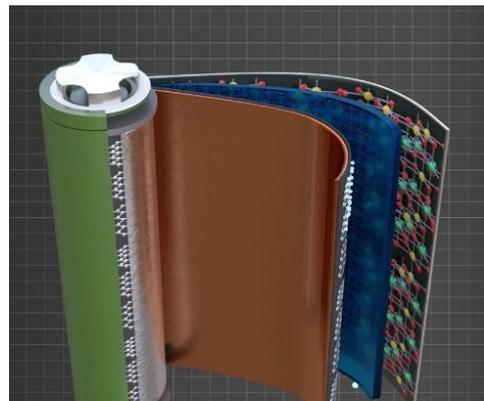


Fig.91 Celda individual. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?*(vídeo) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2t8U&t=30s>

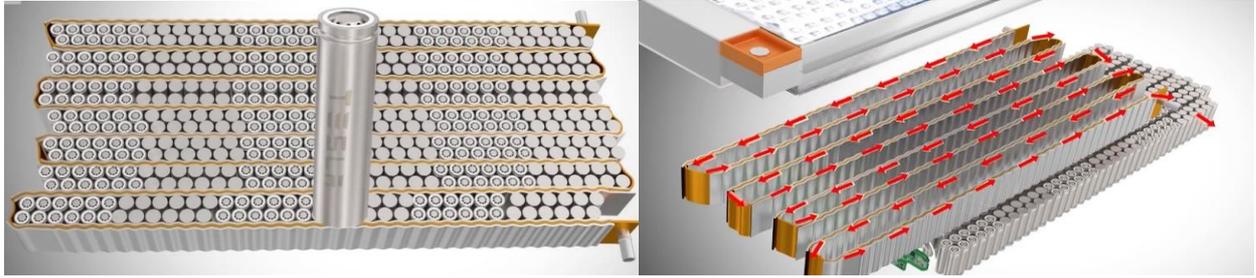


Fig. 92 Paquete de celdas y sistema de refrigeración (izq). Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?*(video) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30>

18650 que fabricaba Panasonic para Tesla ofrecía una densidad energética de 210wh/kg y 1.500 ciclos de vida.

A principios de 2018 Tesla empieza a fabricar sus propias celdas, pero con el estándar 21700, aumentando el tamaño hasta 70mm de largo y 21mm de diámetro. Con una capacidad de 9Ah (17,5wh) y un peso de 70g, logran una densidad energética de 260wh/kg y más de 2.000 ciclos de vida.

Tras tres años más de desarrollo, en 2021 Tesla se pasa al estándar 46800 y gigantes como Panasonic, LG o CATL, también acuerdan producir celdas con el mismo estándar. Estas celdas tienen 46mm de diámetro por 80mm de longitud, multiplicando su volumen por 5, respecto del estándar 21700. Esto rebaja considerablemente los costos de producción, puesto que hacen falta menos celdas para fabricar las baterías, simplificando el proceso. Las nuevas celdas 46800 han

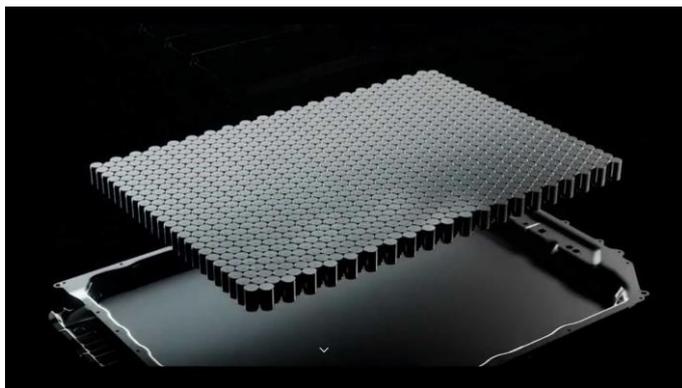


Fig. 93 Batería estructural de Tesla con celdas 46800. Lesics Engineers PVT LTD. 2021. *Lithium-ion battery, How does it work?*(video) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U&t=30s>

logrado superar los 5.000 ciclos de vida y con un peso de 350gr y algo más de 25Ah de capacidad (90wh), han aumentado ligeramente su densidad energética, hasta los 278 wh/kg. Pese a que la densidad energética de las celdas 46800 no es mucho mayor que las 21700, la diferencia aumenta cuando comparamos los paquetes fabricados con las primeras respecto de los fabricados con las segundas. Las baterías fabricadas con celdas 46800 son más livianas, pues se evitan miles de conexiones eléctricas y el circuito de refrigeración es menor.

Asimismo, al ser más robustas, se pueden fabricar baterías que formen parte estructural del vehículo, contribuyendo a disminuir el peso general del conjunto y aumentando la densidad energética aún más.

1.1.1.1. Problemática de las celdas li-ion

Básicamente existen cuatro grandes inconvenientes que esta tecnología ha de superar; la poca autonomía que ofrecen con relación a los combustibles fósiles, la degradación que sufren, la sostenibilidad y su alto precio:

1.1.1.1.1. Autonomía.

El problema de su escasa autonomía viene dado por las dificultades técnicas para aprovechar todo su potencial. El litio es el elemento con mayor potencial de oxidación y por ello las baterías que lo usan son las de mayor capacidad. Sin embargo, es tan reactivo que si utilizamos un ánodo de litio puro la reacción es demasiado violenta, destruyendo el electrolito y la barrera que separa ambos electrodos, cortocircuitándolos. Por otra parte, durante la carga, los iones de litio que se transforman en litio puro se expanden de tal forma que el ánodo aumenta su volumen de forma incontrolable. Hasta que Sony no introdujo el compuesto de intercalación de grafito para almacenar separadamente los iones de litio y los electrones, no se pudo usar el litio en las baterías. Almacenar el litio de esta forma permite dominar su reactividad frente al electrolito y mantener el aumento de volumen a raya, pero a costa de disminuir la cantidad de litio en el ánodo y por tanto la capacidad de la batería. Tanto Tesla como Panasonic están desarrollando siliconas que sustituyan al grafito, lo que doblaría su densidad energética³¹, debido a que pueden almacenar mucho más litio, pero aún no se ha conseguido controlar suficientemente el aumento de volumen.

1.1.1.1.2. Degradación

Este problema es común a todas las baterías. Según se van sucediendo los ciclos de carga y descarga aparecen zonas que dejan de trabajar y entorpecen a las que siguen activas. Los electrodos comienzan a perder material, el número de iones disponibles disminuye, los electrones cada vez encuentran más resistencia eléctrica y los iones mayor dificultad para migrar de un electrodo a otro. A partir de un cierto número de ciclos el rendimiento cae tanto que la batería deja de ser funcional.

³¹ Zhang, X., Wang, D., Qiu, X. et al. Stable high-capacity and high-rate silicon-based lithium battery anodes upon two-dimensional covalent encapsulation. *Nat Commun* 11, 3826 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17686-4>

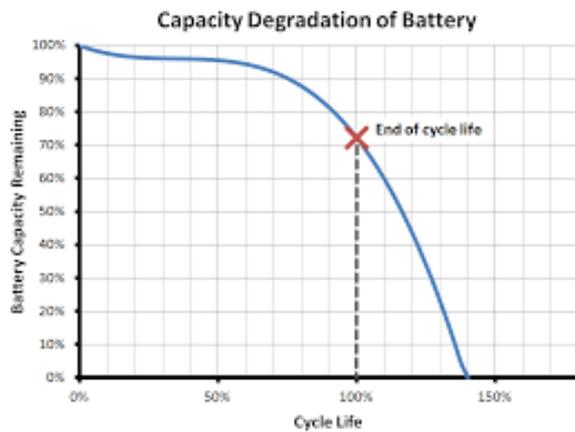


Fig. 94 Curva de degradación Hosen, Md Sazzad et al. iScience, Volume 24, Issue 2, 102060 Recuperado de [https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042\(21\)00028-6.pdf](https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042(21)00028-6.pdf)

En el caso de las de iones de litio el ritmo de degradación es relativamente alto durante los dos o tres primeros ciclos, hasta que se forma una capa protectora en la superficie del ánodo y se estabiliza. La batería continúa degradándose, pero a un ritmo muy bajo, por lo que en esta fase el rendimiento de la batería va disminuyendo poco a poco. Pero cuando desciende a un valor en torno al 80%, la degradación vuelve a acelerarse y el rendimiento cae drásticamente. Por esta razón la duración de las baterías se expresa como el número de ciclos de carga y descarga que pueden realizar hasta que su rendimiento cae al 80%.

En las baterías de litio la degradación y consiguiente disminución de rendimiento están muy relacionados con una capa pasivante llamada SEI (solid electrolyte interphase), que se forma en la superficie del ánodo de manera análoga a la capa de alúmina que se forma en el aluminio. Éste, aunque no tanto como el litio, también es muy reactivo con el oxígeno de la atmósfera, por lo que se oxida rápidamente, sin embargo, la superficie oxidada forma una capa pasivante que aísla el aluminio del interior y evita que siga oxidándose. Del mismo modo, la superficie del compuesto de intercalación de carbono y litio reacciona con el electrolito y forma la capa SEI, que protege el compuesto aislándolo aún mejor del cátodo y evitando que el litio de su interior reaccione excesivamente con el electrolito. Pero a diferencia de la alúmina, la capa SEI sigue reaccionando con el electrolito, aunque muchísimo más lentamente, aumentando su grosor poco a poco. La formación de esta capa consume material del ánodo y del electrolito, disminuyendo el número de iones disponibles para moverse entre los electrodos. Paralelamente, la dificultad para realizar dicho movimiento va en aumento, puesto que la capa que tienen que atravesar para entrar y salir del ánodo es cada vez mayor.

Otro factor determinante en la degradación de las baterías de litio, así como de las de plomo o cinc, es la formación de dendritas. Las cargas muy rápidas o excesivas pueden provocar una mayor dificultad para que los iones que vuelven al ánodo se distribuyan lo suficientemente rápido como para poder entrar antes de que lleguen los demás. Los iones se amontonan en su superficie formando una especie de estalactitas microscópicas de litio metálico

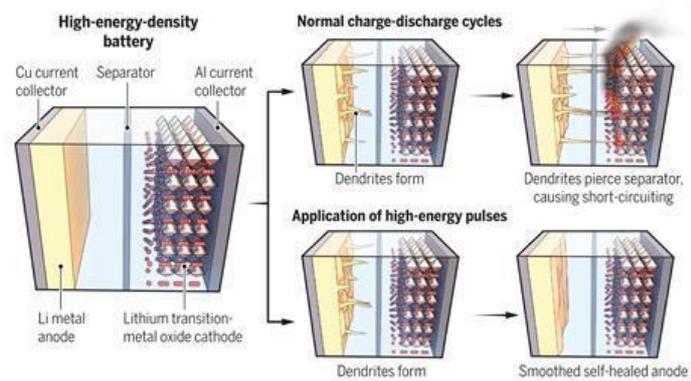


Fig. 95 Formación de dendritas con carga normal o pulsada. Hosen, Md Sazzad et al. iScience, Volume 24, Issue 2, 102060 Recuperado de [https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042\(21\)00028-6.pdf](https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042(21)00028-6.pdf)

llamadas dendritas, que pueden crecer lo suficiente como para perforar la barrera y cortocircuitar la batería, lo que es especialmente peligroso en las de litio puesto que el electrodo es inflamable. Por otra parte, durante las cargas muy rápidas o cuando la batería está excesivamente cargada, puede ocurrir que muchos iones entren al ánodo sin estar totalmente disueltos, destruyendo algunas zonas del mismo y aumentando su resistencia interna. Las altas intensidades de la corriente provocan asimismo un gran estrés mecánico en la estructura de grafito del compuesto de intercalación, que además tiene que soportar la variación de volumen del litio, pudiendo aumentar hasta un 13% cuando está cargada. Con el tiempo se van desprendiendo partes del grafito que se quedan fuera de juego, formando pequeñas “islas” eléctricamente inactivas que dejan expuesta nueva superficie virgen, donde se forma aún más capa SEI. La variación de volumen del ánodo también provoca que el contacto entre el colector de cobre y el compuesto de intercalación se reduzca, aumentando la resistencia eléctrica.

En el cátodo no se forman ni la capa SEI ni las dendritas, sin embargo, el óxido metálico también sufre estrés mecánico cuando se establecen corrientes altas, tanto de carga como de descarga y termina perdiendo material. Por otro lado, cuando la batería está completamente descargada, el exceso de iones en el cátodo provoca que algunos se depositen en distintas zonas del mismo, formando diferentes compuestos y dejando de estar disponibles facilitando, además, que los colectores de aluminio y cobre empiecen a disolverse en el electrolito, contaminándolo.

Todos estos fenómenos provocan una pérdida de material activo para producir electricidad y restringen el movimiento tanto de los iones como de los electrones, por lo que como ya se ha dicho, el rendimiento disminuye con el tiempo. Sin embargo, las baterías de ion-litio todavía tienen un gran margen de mejora y pueden alcanzar una densidad energética y vida útil mayores, si se solucionan estos problemas, o parte de ellos. Según Tesla, sus celdas alcanzarán los 400wh/kg en los siguientes dos años y se están desarrollando aditivos que añadidos al electrolito frenan el crecimiento de la capa SEI, así como la formación de dendritas, lo que permitirá sobrepasar los 10.000 ciclos de vida en dos años³². Hay que tener en cuenta que pese a que llevan 30 años con nosotros, ha sido recientemente y gracias a la irrupción del coche eléctrico y especialmente del primer Tesla en 2008, que se ha invertido tanto en investigar y desarrollar nuevas tecnologías para aprovechar mejor aún su potencial.

1.1.1.1.3. Sostenibilidad

Este es un problema que las celdas de última generación prácticamente lo han resuelto. Si la primera generación utilizaba Cada año su capacidad aumenta y su precio disminuye. En realidad, las baterías de iones de litio lo que menos contienen es litio, metales muy caros como el cobalto o el níquel se usan en proporciones mucho mayores que el propio litio. La extracción de estos metales supone un problema medioambiental y también social, ya que los yacimientos se

³² New Insight on the Role of Electrolyte Additives in Rechargeable Lithium Ion Batteries

Jun Ming, Zhen Cao, Yingqiang Wu, Wandí Wahyudi, Wenxi Wang, Xianrong Guo, Luigi Cavallo, Jang-Yeon Hwang, Atif Shamim, Lain-Jong Li, Yang-Kook Sun, and Husam N. Alshareef

ACS Energy Letters 2019 4 (11), 2613-2622

DOI: 10.1021/acsenergylett.9b01441

encuentran en países en desarrollo en los que es mucho más fácil primar el interés económico frente a las condiciones laborales. Por otra parte, el reciclaje de los materiales que forman las celdas no llegaba al 10%. No obstante, las nuevas celdas 46800 son reciclables hasta en un 90% y usan muchísimo menos cobalto y níquel. En este sentido Panasonic ya anunció a principios de este año sus nuevas baterías libres de cobalto, lo que las hace más baratas y sostenibles.

1.1.1.1.4. Precio

Lo cierto es que los sistemas de producción han mejorado considerablemente, siendo mucho más eficientes y cada vez se prescinde más de metales caros como el cobalto, el níquel o el manganeso. En 2010 fabricar una celda de ion-litio costaba 1.100\$ por cada Kwh de capacidad, mientras que las baterías con estándar 46800 del 2021 tienen un coste de producción de 100\$ por cada Kwh, una caída mayor del 1000% en 10 años.

A día de hoy se está investigando e invirtiendo más dinero que nunca, para aumentar la capacidad de las baterías de litio, aumentar su vida útil y reducir su precio, bien solucionando los problemas antes descritos o bien desarrollando nuevas tecnologías. A este respecto existen varios caminos a seguir y en el siguiente apartado se muestran los tres principales

1.1.2. NUEVAS TECNOLOGÍAS

1.1.2.1. Baterías de estado sólido

En lugar de usar un electrolito en estado líquido, estas baterías usan electrolito sólido, lo que permite fabricar baterías mucho más compactas, al evitar los materiales porosos que contienen el electrolito líquido. Posibilitan además usar ánodos de litio puro, en lugar de iones de litio. Estas dos circunstancias pueden aumentar la densidad energética más allá de los 1000wh/kg. Por otra parte, son mucho más seguras ya que no se inflaman, tienen más ciclos de vida y se pueden recargar mucho más rápido. A finales del año pasado Samsung publicó sus investigaciones en torno a estas baterías y presentó un prototipo de 900wh/kg con una vida útil de 1.000 ciclos de carga y descarga. Volkswagen, Toyota, Hyundai y BMW también están invirtiendo en esta tecnología. Volkswagen, por ejemplo, ha invertido 300 millones de dólares en la start up estadounidense QuantumScape, relacionada con la universidad de Stanford. Esta compañía lleva más de 10 años y 300 millones de dólares invertidos en el desarrollo de baterías de estado sólido y Volkswagen tiene intención de introducirlas en sus automóviles a partir de 2025. Según el CEO de QuantumScape ya han conseguido densidades en torno a los 1.000wh/kg. Toyota por su parte lleva investigando en esta tecnología desde 2012 y ha tramitado miles de patentes relacionados con la misma. Ha anunciado que a finales de este año se proponen introducirlas en su nuevo modelo eléctrico. Por su parte, el gobierno japonés ha destinado 19.000.000.000 de dólares para desarrollar tecnologías que acaben con la dependencia de los combustibles fósiles, de los cuales más de 14.000.000 se han destinado a formar un consorcio entre la propia Toyota, Honda, Nissan y Yuasa, entre otras compañías, para producir baterías de estado sólido. El mayor reto de esta tecnología es conseguir que los prototipos de laboratorio funcionen satisfactoriamente en condiciones reales y poder fabricarlos en masa, lo que actualmente es extremadamente caro.

1.1.2.2. Baterías de litio-aire

Las baterías de metal-aire ya llevan un tiempo con nosotros y se pueden encontrar en el interior de los audífonos. Estas baterías usan cinc, pero se está intentando escalar la tecnología a las baterías de litio, ya que teóricamente estas podrían alcanzar una densidad energética de 3.460wh/kg. La gran ventaja de estas baterías es que usan el oxígeno del aire para oxidar el litio, y por tanto se puede prescindir del óxido de cobalto y níquel o de cualquier otro metal que lo aporte. En las baterías de litio-aire el cátodo es de grafito y el ánodo de litio puro. El oxígeno entra en el electrolito y se disuelve en iones positivos que junto a los iones de litio y los electrones que llegan al grafito del cátodo, forman óxido de litio en el mismo. Cuando se carga la batería se hace pasar la corriente en sentido contrario, arrancando los electrones del óxido y devolviéndolos al ánodo. Al extraer los electrones del óxido de litio en el cátodo, el oxígeno se libera al ambiente y el litio vuelve al electrolito en forma de iones, desde donde pueden volver al ánodo y recuperar el electrón que les falta para formar litio puro.

El hecho de prescindir de óxidos metálicos y poder usar litio puro las convierte en unas baterías muy ligeras de gran capacidad. El problema es que los electrodos se llenan de sales de litio y dejan de funcionar, los prototipos fabricados hasta ahora se degeneran después de unas pocas docenas de ciclos de carga. IBM ha apostado fuerte en esta tecnología, pero todavía no se ha presentado ningún prototipo. El mayor reto de estas baterías radica en separar el oxígeno e inyectarlo en el electrolito, ya que si se no se separa el nitrógeno y las impurezas que contiene el aire, el electrolito se degenera.

1.1.2.3. Baterías de grafeno

El grafeno no es más que una sola capa de grafito, de un átomo de espesor, pero sus propiedades son impresionantes. Es el mejor conductor que existe a temperatura ambiente, de hecho, entra en la categoría de superconductor. También es el mejor conductor térmico que se conoce y sólo dos capas de este material, es decir, dos átomos de grosor pueden resistir el impacto de una bala. Estas propiedades lo hacen extremadamente valioso para mejorar las capacidades de las baterías. Añadiendo una capa de grafeno a los electrodos de una batería de litio, teóricamente se puede aumentar su capacidad más de cuatro veces. Su altísima conductividad lo convierte en un colector perfecto para remover los electrones del ánodo y distribuirlos en el cátodo sin generar calor por resistencia eléctrica, evacuando al mismo tiempo el producido por las reacciones redox de forma extremadamente eficaz. Al prescindir de los colectores metálicos el peso de la batería disminuye considerablemente, resultando en unas baterías “frías” y ligeras que no necesitan de un sistema de refrigeración, que pueden cargarse mucho más rápido y con una mayor vida útil.

El gran problema del grafeno es que es carísimo de fabricar a gran escala, pero el precio baja año tras año. Desde que se descubrió en 2004 hasta ahora su valor es 100.000 veces menor, que se dice pronto.

Varias empresas están sacando al mercado las primeras baterías mejoradas con grafeno; Samsung patentó el año pasado una tecnología que ellos llaman “bolas de grafeno” y presentarán sus baterías a finales de este año. La startup americana Real Graphene ya está comercializando una pequeña estación de recarga para pequeños dispositivos electrónicos que está compuesta por baterías de litio mejoradas con grafeno y la española Grabat, en colaboración con la Universidad

de Córdoba asegura que sus celdas con grafeno triplican la capacidad de las baterías de litio convencionales.

1.2. CELDAS DE COMBUSTIBLE

Al igual que las baterías, las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que mediante reacciones redox generan electricidad, pero a diferencia de éstas, no tienen ciclos de carga y descarga, sino que funcionan de forma continua mientras se les suministra combustible. Las más comunes y sostenibles son las que funcionan con hidrógeno y oxígeno, ya que los únicos subproductos que generan son calor y agua.

Se podría decir que son una mezcla entre los motores de combustión y las baterías. Al igual que los primeros, necesitan de un combustible para funcionar, pero la energía no se genera por combustión, sino por reacciones electroquímicas.



Fig. 96 Celda de combustible de hidrógeno de Intelligent Energy. Intelligent Energy (2021). *Product Catalogue*. Recuperado de <https://www.intelligent-energy.com/our-products/>

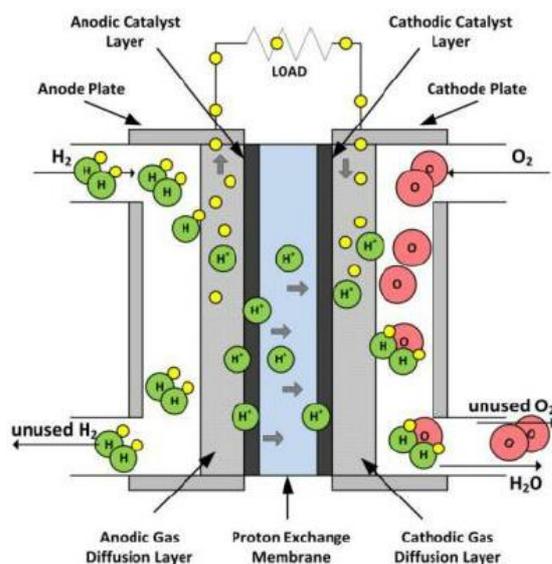


Fig. 97 Funcionamiento celda de combustible Quora (2021). *Why do all of the fuel cell cars use PEMFC in combination with a hydrogen tank?* Recuperado de <https://www.quora.com/Why-do-all-of-the-fuel-cell-cars-use-PEMFC-in-combination-with-a-hydrogen-tank>

Su funcionamiento es silencioso y al no tener partes móviles tienen una gran fiabilidad.

Cada celda contiene dos recipientes, en uno se introduce hidrógeno (ánodo) y en el otro aire (cátodo). Estos recipientes están separados por una membrana electrolítica que no deja que se mezclen, permitiendo únicamente el paso de los iones (protones del hidrógeno en este caso), pero impidiendo el de los electrones y el de los átomos enteros.

En el recipiente de hidrógeno se instala un catalizador, normalmente de platino, que divide las moléculas de hidrógeno en átomos y luego separa los electrones de sus núcleos.

Los protones de hidrógeno resultantes pueden atravesar la membrana electrolítica y viajan al cátodo donde se encuentra el oxígeno del aire. Esta membrana impide el paso de los electrones, que no tienen más remedio que llegar al cátodo por un circuito exterior, generando electricidad.

Una vez llegan al cátodo, junto con los protones de hidrógeno y el oxígeno que allí se encuentra, pasan a formar moléculas de agua. El hidrogeno se oxida y el oxígeno se reduce.

Cada celda produce entre 0,5 y 1,0 voltios, por lo que al igual que las baterías tradicionales han de conectarse varias de estas celdas en serie, según el voltaje final que queramos obtener.