

Universidad de Huelva

Departamento de Ingeniería de Proyectos y Diseño



Desarrollo de un modelo predictivo de las emisiones de CO₂, el consumo energético y el desarrollo sostenible en India 1990-2030

**Memoria para optar al grado de doctor
presentada por:**

Gregorio Ortega Ruiz

Fecha de lectura: 14 de octubre de 2022

Bajo la dirección de los doctores:

José Enrique García Ramos

Ángel Isidro Mena Nieto

Huelva, 2022





**Universidad
de Huelva**

DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO DE LAS EMISIONES DE
CO₂, EL CONSUMO ENERGÉTICO Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN
INDIA (1990- 2030).

Tesis doctoral presentada por

Gregorio Ortega Ruiz

En el programa de doctorado de Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental

Directores

Dr. José Enrique García Ramos

Dr. Ángel Isidro Mena Nieto



**Universidad
de Huelva**

**DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO DE LAS EMISIONES DE
CO₂, EL CONSUMO ENERGÉTICO Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN
INDIA (1990- 2030).**

Tesis doctoral presentada por

Gregorio Ortega Ruiz

En el programa de doctorado de Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental

Directores

Dr. José Enrique García Ramos

Dr. Ángel Isidro Mena Nieto

Director

Candidato a Doctor

Director

Firmado por GARCIA RAMOS
JOSE ENRIQUE - 75443776G el
día 20/06/2022 con un
certificado emitido por AC
FNMT Usuarios

**ORTEGA RUIZ
GREGORIO -
29800563S**

Firmado digitalmente
por ORTEGA RUIZ
GREGORIO -
29800563S
Fecha: 2022.06.20
18:26:22 +02'00'

**MENA NIETO
ANGEL ISIDRO
- 24405423P**

Digitally signed by
MENA NIETO ANGEL
ISIDRO - 24405423P
Date: 2022.06.20
17:18:53 +02'00'

Huelva, junio de 2022

Desarrollo de un modelo predictivo de las emisiones de CO₂, el consumo energético y el desarrollo sostenible en India (1990- 2030).

Autor: Gregorio Ortega Ruiz

Director: Dr. José Enrique García Ramos

Director: Dr. Ángel Isidro Mena Nieto

Texto impreso en Huelva

Primera edición, junio de 2022

a Lara, sin la que nada sería posible

Reconocimientos

Llegado este momento, y después de cinco años de trabajo y dedicación, ha llegado la hora de echar la vista atrás. Es especial esta situación no sólo por ser la última tarea que acometo en este largo proceso de elaboración, sino también, y muy especialmente, por ser una bonita oportunidad para dar las gracias a aquellas personas cuya ayuda ha sido imprescindible para poder realizar este arduo trabajo.

Quiero expresar mi agradecimiento a mis dos directores de tesis, los doctores Ángel Isidro Mena Nieto y José Enrique García Ramos, no solo por la ayuda prestada, sino también por la oportunidad que me ofrecieron para poder trabajar en su equipo. El tiempo pasado junto a ellos ha sido una suerte que me brindó la oportunidad de aprender del tesón, rigor científico y de una disponibilidad que nunca tuvo límites, acompañándome en todo momento con su experiencia y buen hacer a lo largo de este enriquecedor camino.

Abstract

The main objective of this thesis is to analyse and compare the driving forces that cause carbon dioxide emissions in India, given the special global relevance that these emissions are expected to have. To do this, different techniques have been used and are applied, as a matter of comparison, to the six largest emitters in the world, namely China, the United States of America, the European Union, India, Russia and Japan, responsible for more than 67% of global emissions during the period 1990-2018. The analysis is based on an LMDI decomposition procedure of an expanded Kaya identity, considering five driving forces and a Granger causality study. Both techniques allow us to unravel the relationship between the different driving forces and to know how they change from one country to another, facilitating the understanding of the Indian case. On the other hand, an extrapolation will be carried out, within some proposed scenarios, for the CO₂ emissions and the Gross Domestic Product in the country, in order to be able to predict the future behaviour of energy intensity, an indicator proposed by India for the fulfilment of its Commitments in the Paris Agreements.

The main conclusion of the Kaya-LMDI analysis is that economic growth has been the main driver for increasing CO₂ emissions and, to a much lesser extent, population growth in most of the six economies analysed. On the other hand, energy intensity is the main factor to reduce CO₂ emissions. Surprisingly, the term end-use fuel mix rarely contributes to emissions declines, showing that the use of renewable energy still needs to be actively promoted. It is worth noting the different behaviour observed between the four developed countries and the two developing ones, which are the most populated ones, China and India.

Granger causality analysis suggests that energy intensity Granger causes GDP in developed countries, energy intensity also Granger also causes CO₂ emissions in half of the countries, and GDP Granger causes CO₂ emissions in only one case, Japan.

Extrapolation of the data, within the proposed scenarios, suggests that compliance of the Indian Nationally Determined Contributions (NDC) can only be achieved by employing all the measures proposed by India in its NDC, namely, renewable energy expansion, economic growth and deployment of supercritical technology in all coal plants for electricity generation, with the consequent improvement in efficiency.

Resumen

Esta tesis tiene como objetivo principal analizar y comparar las fuerzas motrices que conforman las emisiones de dióxido de carbono en India, dada la especial relevancia mundial que se prevé tendrán dichas emisiones. Para ello, se han empleado distintas técnicas que se aplicarán, a modo de comparación, a los seis mayores emisores del mundo, a saber, China, los Estados Unidos de América, la Unión Europea, India, Rusia y Japón, responsables de más del 67% de las emisiones globales durante el periodo 1990-2018. El análisis se basa, por un lado, en una descomposición LMDI de una identidad Kaya ampliada, considerando cinco fuerzas motrices y, por otro lado, en un estudio de causalidad de Granger. Ambas técnicas nos permiten desentrañar la relación entre las diferentes fuerzas motrices y cómo cambian estas de un país a otro, facilitando la comprensión del caso indio. Por otra parte, se realizará una extrapolación para la India hasta 2030, dentro de unos escenarios propuestos, de las emisiones y el Producto Interior Bruto en el país para, de esta manera, poder prever el comportamiento a futuro de la intensidad energética, indicador propuesto por India para el cumplimiento de sus Compromisos en los Acuerdos de París.

La principal conclusión del análisis Kaya-LMDI es que el crecimiento económico ha sido el principal motor que aumenta las emisiones de CO₂ y, en mucha menor medida, el aumento en población, cosa que sucede en la mayoría de las seis economías analizadas. Por otro lado, la intensidad energética es el factor principal para reducir las emisiones de CO₂. Sorprendentemente, el término de mezcla de combustible rara vez contribuye a la disminución de las emisiones, con las excepciones notables de los EEUU y la UE, lo que demuestra que el uso de energías renovables aún debe promoverse activamente. Cabe destacar el diferente comportamiento observado entre los cuatro países desarrollados y los dos países en desarrollo, que son además los de mayor población, China e India.

El análisis de causalidad de Granger sugiere que la intensidad energética da lugar a causalidad de Granger con el PIB en los países desarrollados, la intensidad energética también da lugar a causalidad de Granger con las emisiones de CO₂ en la mitad de los países y el PIB da lugar a causalidad de Granger con las emisiones de CO₂ solo en un caso, Japón.

La extrapolación de los datos, dentro de los escenarios propuestos, sugiere que el cumplimiento de la Contribución Nacional Determinada (NDC) india solo se puede llevar a cabo empleando todas las medidas propuestas por el país en su NDC, a saber, ampliación del uso de las energías renovables, crecimiento económico e implantación de tecnología supercrítica en el conjunto de las plantas de carbón para la generación eléctrica, con la consiguiente mejora en la eficiencia.

Resultados de la investigación

- Is India on the right pathway to reduce CO₂ emissions? Decomposing an enlarged Kaya identity using the LMDI method for the period 1990–2016.
G. Ortega-Ruiz, A. Mena-Nieto, J.E. García-Ramos.
Science of The Total Environment 737(2020) 139638.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139638>

Science of The Total Environment

Posición en la categoría 25/274, D1 (ENVIRONMENTAL SCIENCES-SCIE)

Abstract

Nowadays, India is the third-largest CO₂ emitter and energy consumer in the world, and, it is soon expected to surpass China as the most populated country. Therefore, it is of great interest to analyse how India is developing its energy transition to a lower-carbon economy. This work analyses the evolution of the main driving forces of CO₂ emissions in India during the period 1990–2016 through the use of an enlarged version of the Kaya identity, which establishes a link between CO₂ emissions, types of energy sources (16), size of the economic sectors (3) and value of the Gross Domestic Product. India's CO₂ emissions increased by 276% in the period under study, due to the rapid economic growth of India, which has been the dominating driving force contributing to the increase in CO₂ emissions by 241%, while the energy intensity has been the main one reducing them by approximately –47%. So far, the use of coal has supported the rapid economic growth and the contribution of renewable energy, although significant, is still short compared to the total amount of energy employed. Remarkably, the estimated value of the emission intensity for 2020 supposes a 26% reduction concerning the value in 2005. According to this result, India is on the right pathway to fulfil its Nationally Determined Contribution but not to reduce its net CO₂ emissions.

- CO₂ emissions and causal relationships in the six largest world emitters.
G. Ortega-Ruiz, A. Mena-Nieto, J.E. García-Ramos, A.A. Golpe.
Renewable and Sustainable Energy Reviews 162(2022) 112435.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112435>

Renewable and Sustainable Energy Reviews

Posición en la categoría 1/44, D1 (GREEN & SUSTAINABLE SCIENCES & TECHNOLOGY-SCIE)

Abstract

This paper aims to analyze and compare the driving forces of the carbon dioxide emissions of the six highest emitters of the world, namely, China, the United States of America, the European Union, India, Russia, and Japan, which are responsible for more than the 67% of the emissions, during the period 1990–2018. The analysis is based on an enlarged Kaya-LMDI decomposition, considering five driving forces and a Granger causality study. Both techniques allow us to disentangle the relationship among the different driving forces and how they change from country to country.

The main conclusion from the Kaya-LMDI analysis is that economic growth has been the main driving force that increases CO₂ emissions, and to a much lesser extent, the increase in population in most of the six analyzed economies. On the other hand, energy intensity is the main factor for reducing CO₂ emissions. Surprisingly enough, the end-use fuel-mix term seldom contributes to the decrease of the emissions, which proves that the use of renewable energy should still be actively promoted. It is worth highlighting the different behavior observed between the four developed countries and the two most populous developing ones, China and India.

The Granger-causality analysis suggests that energy intensity Granger causes GDP in the developed countries, energy intensity also Granger causes CO₂ emissions in half of the countries and, GDP Granger causes CO₂ emissions only in one case, Japan.

Contenidos

Lista de Figuras	XVI
Lista de Tablas.....	XXIV
Lista de abreviaturas.....	XXVI
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 India, país de especial relevancia ante el Cambio Climático	2
1.2 Objetivos de esta tesis	8
1.2.1 Materiales empleados para la consecución de los objetivos.....	10
1.3 Compromisos adquiridos contra el Cambio Climático	12
1.4 Macroeconomía, Producto Interior Bruto	17
1.4.1 Producto Interior Bruto en las sociedades a comparar con India.....	18
1.4.2 Producto Interior Bruto en India.....	26
1.5 Distribución y cambios en la población	30
1.5.1 Distribución y cambios en la población en las sociedades a comparar con India.....	31
1.5.2 Distribución y cambios en la población en India.....	37
1.6 Revisión de la Bibliografía	39
2. ENERGÍA.....	48
2.1 La demanda energética en los 6 países con mayor emisión de GEI	48
2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India	51
2.1.2 Tendencia energética en India	61
2.2 Fuentes que cubren la demanda energética.....	63
2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón	63
2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo	80
2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural	100
2.2.4 Energía eólica y solar	112
2.2.5 Bioenergía	118
2.2.6 Energía Hidroeléctrica.....	123
2.2.7 Energía Atómica	128
2.3 Tendencias registradas en el empleo de combustibles	131

2.3.1 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en los países a comparar con India	132
2.3.2 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en India	143
2.4 Integración de las energías libres de emisiones de GEI	147
2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI	148
2.4.2 Integración de las energías libres de emisiones de GEI	161
3. METODOLOGÍA.....	164
3.1 La identidad Kaya.....	166
3.2 Metodología LMDI	167
3.3 Análisis mediante la causalidad de Granger usando el test de Toda-Yamamoto	170
3.4 Modelo económico	172
3.5 Ecuaciones del modelo.....	174
3.6 Fuentes de datos y preprocesado	176
3.6.1 Datos de población y actividad económica	176
3.6.2 Datos de energía y combustibles	177
3.6.3 Preprocesado de los datos.....	179
3.7 Modelo de validación y verificación.....	180
3.8 Escenarios.....	181
4. RESULTADOS	186
4.1 Emisiones por tipo de combustible y sector en los 6 mayores emisores ..	186
4.2 Emisiones por tipo de combustible y sector en India.....	189
4.3 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO ₂ en los 6 mayores emisores	193
4.4 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO ₂ en India	199
4.5 Intensidad de emisiones en los 6 mayores emisores	205
4.6 Intensidad de emisiones en India y su proyección hasta 2030	207
4.7 Análisis de causalidad de Granger	213

5. CONCLUSIONES	220
5.1 IMPLICACIONES POLÍTICAS.....	224
REFERENCIAS.....	227
ANEXOS.....	236

Lista de Figuras

Figura 1.1 1: Evolución del incremento anual de emisiones de CO ₂ en los seis países con mayor emisión durante el periodo estudiado. Fuente Banco Mundial [5].	3
Figura 1.1 2: Emisión y porcentaje agregado de los mayores emisores de CO ₂ en 2018. Fuente IEA (International Energy Agency) [8]	6
Figura 1.4.1: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en China. Fuente Banco Mundial [6].	18
Figura 1.4.2: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en EEUU. Fuente Banco Mundial [6].	20
Figura 1.4.3: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en la UE. Fuente Banco Mundial [6].	21
Figura 1.4.4: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en Rusia. Fuente Banco Mundial [6].	23
Figura 1.4.5: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en Japón. Fuente Banco Mundial [6].	24
Figura 1.4.6: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en India. Fuente Banco Mundial [6].	27
Figura 1.4.7: Evolución del PIB de las economías estudiadas. Fuente Banco Mundial [6].	28
Figura 1.5.1: Evolución de la población urbana y rural en las 6 economías más emisoras de CO ₂ . Fuente Banco Mundial [6].	30
Figura 2.1: Evolución de la energía total consumida en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [5].	48

Figura 2.1 1: Evolución de la demanda energética por sectores en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	51
Figura 2.1 2: Evolución de la demanda energética por sectores en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	53
Figura 2.1 3: Evolución de la demanda energética por sectores en la Unión Europea. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	55
Figura 2.1.4: Evolución de la demanda energética por sectores en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	57
Figura 2.1.5: Evolución de la demanda energética por sectores en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	59
Figura 2.1.6: Evolución de la demanda energética por sectores en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	61
Figura 2.2.1.1: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	66
Figura 2.2.1.2: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción Industrial en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	67
Figura 2.2.1.3: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	68
Figura 2.2.1.4: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción Industrial en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	69
Figura 2.2.1.5: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	71
Figura 2.2.1.6: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción Industrial en UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	72

Figura 2.2.1.7: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	74
Figura 2.2.1.8: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	75
Figura 2.2.1.9: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	76
Figura 2.2.1.10: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	77
Figura 2.2.1.11: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	78
Figura.2.2.2.1: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en China en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	82
Figura.2.2.2 2: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en China en el sector transporte. IEA (International Energy Agency) [8].	83
Figura 2.2.2.3: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en EEUU en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	85
Figura 2.2.2.4: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en EEUU en el sector transportes. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	86
Figura.2.2.2 5: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en la Unión Europea en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	88
Figura.2.2.2 6: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en la Unión Europea en el sector transportes. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	89
Figura.2.2.2 7: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Rusia en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	91

Figura.2.2.2 8: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Rusia en el sector transporte. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	92
Figura.2.2.2 9: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Japón en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	94
Figura 2.2.2.10: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Japón en el sector transporte. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	95
Figura 2.2.2.11: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en India en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	97
Figura.2.2.2.12: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en India en el sector transporte. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	98
Figura 2.2.3.1: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en China por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	101
Figura 2.2.3.2: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en Estados Unidos por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	103
Figura 2.2.3.3: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en la Unión Europea por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	105
Figura 2.2.3.4: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en Rusia por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	106
Figura 2.2.3.5: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en Japón por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	108
Figura 2.2.3.6: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en India por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	110
Figura 2.2.4.1: Evolución de la nueva potencia instalada eólica. Fuente IEA (International Energy Agency) [79].	113

Figura 2.2.4.2: Evolución de la nueva potencia instalada solar fotovoltaica. Fuente IEA (International Energy Agency) [79].....	114
Figura 2.2.4.3: Evolución de la energía aportada mediante solar y eólica en los países objeto de estudio. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	116
Figura 2.2.5.1: Evolución de la energía aportada mediante biocombustibles para la generación eléctrica en los países objeto de estudio. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	119
Figura 2.2.5.2: Evolución de la energía aportada mediante biocombustibles excluida la generación eléctrica en los países objeto de estudio. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	120
Figura 2.2.6.1: Evolución de la energía Hidroeléctrica aportada en los países objeto de estudio. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	126
Figura 2.2.7.1: Aporte de energía nuclear en el mix energético. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	128
Figura 2.3.1: Evolución de la energía por tipo en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	133
Figura 2.3.2: Evolución de la energía por tipo en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	135
Figura 2.3.3: Evolución de la energía por tipo en la UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	137
Figura 2.3.4: Evolución de la energía por tipo en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	139

Figura 2.3.5: Evolución de la energía por tipo en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	142
Figura 2.3.6: Evolución de la energía por tipo en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	144
Figura 2.4.1: Evolución de la energía aportada por diferentes combustibles para la generación eléctrica en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	148
Figura 2.4.2: Evolución de la energía aportada por fuentes libres de emisiones en la generación eléctrica en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].	158
Figura 2.4.3: Evolución del porcentaje de fuentes libres de emisiones en la generación eléctrica en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [5].	159
Figura 2.4.4: Evolución del porcentaje de fuentes libres de emisiones en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [5].	161
Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso realizado para la obtención de resultados.	165
Figura 3.2: Evolución de la energía entregada por fuentes libres de emisiones de CO₂ comparada con la comprometida por la NDC India.	181
Figura 4.1.1: Evolución de la emisión resultante de CO₂, junto con el tamaño de los sectores económicos en los 6 países con mayor emisión de GEI.	188
Figura 4.2.1: Evolución de la emisión resultante de CO₂ por sectores en India.	189
Figura 4.2.2: Evolución de la emisión resultante de CO₂ por principales combustibles y sectores en India.	191

Figura 4.3.1: Resultados de la aplicación del modelo LDMI aditivo para el periodo 1990-2018 en los países empleados para comparar con India.....	193
Figura 4.3.2: Resultados de la aplicación del modelo LDMI multiplicativo para el periodo 1990-2018 en los países empleados para comparar con India.	195
Figura 4.3.3: Resultados de la aplicación del modelo LDMI aditivo para el periodo 1990-2018 en los países empleados para comparar con India.....	197
Figura 4.4.1: Resultados de la aplicación del modelo LDMI aditivo (A) y multiplicativo (B), para el periodo 1990-2018 en India.	199
Figura 4.4.2: Evolución de la aplicación del modelo LDMI aditivo y multiplicativo para el periodo 1990-2020 en India.	201
Figura 4.4.3: Evolución del término actividad económica (A) e intensidad energética (B) para el periodo 1990-2016 en India.	203
Figura 4.5.1: Evolución de la intensidad de emisiones en los 6 países con mayor emisión de GEI.....	205
Figura 4.6.1: Evolución de la intensidad de emisiones en los distintos sectores de India.	207
Figura 4.6.2: Evolución histórica del PIB a partir de las bases de datos contrastadas y el PIB resultado de la aplicación del modelo	210
Figura 4.6.3: Evolución del indicador emisión de CO2 dentro de los cuatro escenarios propuestos.	211
Figura 4.6.4: Evolución del indicador intensidad energética dentro de los cuatro escenarios propuestos.	212
Figura 4.7.1: Relaciones de causalidad de Granger entre los indicadores analizados...	215

Figura 4.7.2: Relaciones de causalidad de Granger entre los indicadores analizados en el conjunto de sociedades.	216
--	------------

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Estimación de crecimiento para India. Fuente NDC (Gobierno indio) [9].....	5
Tabla 1.2: NDC de los principales emisores de GEI. Fuente Naciones Unidas (UN) [11].	15
Tabla 2.1: Típica composición del gas natural. Fuente naturalgas.org [72].	100
Tabla 2.3.1: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	132
Tabla 2.3.2: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	134
Tabla 2.3.3: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en la UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	136
Tabla 2.3.4: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	139
Tabla 2.3.5: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	141
Tabla 2.3.6: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].....	143
Tabla 3.1: Combustibles analizados y factores de emisión. Fuente EPA (Agencia de Protección Ambiental de EEUU.) [66].	178
Tabla 4.1: Coeficientes estimados para la formulación del PIB empleando mínimos cuadrados en las funciones (11),(12),(13),(14),(15).	208
Tabla 4.2: Resultados de la aplicación del método MAPE en las principales variables del sistema.....	209
Tabla 4.3: Ng y Perron ^{a,b} test para una raíz.	213

Tabla 4.4: Resultados de la aplicación del análisis de causalidad de Granger a las variables estudiadas.	214
--	------------

Lista de abreviaturas

ACS	Agua caliente sanitaria
Act	Actividad económica
AIC	<i>Akaike Information Criterion</i>
ASEAN	Asociación de Naciones de Asia Sudoriental
BWR	Reactor nuclear de tipo reactor de agua en ebullición
CFE	Fuentes libres de emisiones de carbono
CHG	Cogeneración eléctrica-calor
ENE	Energía
EPA	Agencia Americana para la protección del medio ambiente
EUR	Euros
FBR	Reactor nuclear de tipo reactor-generador rápido
FLC	Fuentes libres de carbón
GCF	Fondo Verde para el Clima
GEI	Gases de efecto invernadero
GLP	Gas licuado del petróleo
GW	$1 \cdot 10^9$ vatios
Hab.	Habitantes
HP	Filtro de Hodrick- Prescott
Int	Intensidad energética
kgCO ₂ /§	Kilogramos de CO ₂ por dólar americano.
km ²	Kilómetro cuadrado
koe	kg equivalentes de petróleo
LMDI	índice Logarithmic-mean Divisia
MAPE	Media Absoluta de Porcentaje de Error
Mix	Mix energético
Mtoe	Mega tonelada equivalente de petróleo
MWALD	<i>Modified Wald test</i>
NDC	Contribución Nacional Determinada para la lucha contra el Cambio Climático

OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PHWR	Reactor nuclear de tipo reactor presurizado de agua pesada
PIB	Producto Interior Bruto
PWR	Reactor nuclear de tipo reactor de agua presurizada
REN	Energías renovables
Str	Estructura económica
Tm	Tonelada
Toe	Tonelada equivalente de petróleo
TWh	$1 \cdot 10^{12}$ vatios hora.
US\$	dólares americanos a precios constantes de 2010
VAR	Modelo de variables autorregresivo

CAPÍTULO 1:

1.INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 India, país de especial relevancia ante el Cambio Climático.....	2
1.2 Objetivos de esta tesis.....	8
1.2.1 Materiales empleados para la consecución de los objetivos.....	10
1.3 Compromisos adquiridos contra el Cambio Climático.....	12
1.4 Macroeconomía, Producto Interior Bruto.....	17
1.4.1 Producto Interior Bruto en las sociedades a comparar con India...	18
1.4.2 Producto Interior Bruto en India.....	26
1.5 Distribución y cambios en la población.....	30
1.5.1 Distribución y cambios en la población en las sociedades a	
comparar con India.....	31
1.5.2 Distribución y cambios en la población en India.....	37
1.6 Revisión de la Bibliografía.....	39

*"Gran Bretaña necesitó la mitad de los recursos
del planeta para lograr su prosperidad, ¿Cuántos
planetas requerirá un país como India?"*
Mahatma Gandhi

CAPÍTULO

1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 India, país de especial relevancia ante el Cambio Climático

La subida de la temperatura media de nuestro planeta y su consecuencia, el Cambio Climático, son desde los primeros estudios que atisbaron el incremento medio de la temperatura, uno de los retos a los que se enfrentan las sociedades de todo el planeta. Este incremento térmico, acelerando en los últimos años, ha conseguido captar por sus preocupantes efectos la atención de la sociedad, que ahora considera a este problema como el mayor reto al que se enfrenta la humanidad [1] [2]. La afección que el Cambio Climático ejerce en nuestro planeta se puede cuantificar por sus manifestaciones, relevándose con más frecuencia eventos extremos climáticos, deshielo en zonas polares, así como olas de calor que afectan desigualmente a los diversos ecosistemas, produciendo en las zonas templadas o cálidas, sequías y desertificación. Estos efectos dañan sobremanera a las zonas en vías de desarrollo, donde ejercen una gran perturbación en las sociedades más desfavorecidas, llegando a impedir su modo tradicional de vida hasta el punto de provocar, en muchos casos, la crisis humanitaria que representa la migración de personas desde lugares desfavorecidos a los entornos menos castigados. El aumento en el impacto que el Cambio Climático ejerce en los tres países más densamente poblados del planeta podría obligar a más de 140 millones de personas a mudarse dentro de las fronteras de sus países para 2050, creando una inminente crisis humanitaria [3].

La emisión de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) está detrás del calentamiento global. Entre estos gases se encuentran el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3), pero entre ellos, destaca sobremanera la participación del dióxido de carbono (CO_2). Estos gases, necesarios en nuestra atmósfera para mantener la temperatura que permite la vida, han experimentado una subida drástica en su presencia, dado que la concentración en la atmósfera de estos gases desde la era preindustrial se ha incrementado en un 70%, experimentando un fuerte aumento entre los años 1990 y 2004, en los que la emisión creció un 24%, pasando de 28,7 a 49 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente [4]. Las emisiones de estos gases se han incrementado en diferentes proporciones, siendo especialmente preocupante la participación del CO_2 , cuyas emisiones han aumentado entre 1970 y 2004 alrededor de un 80%, elevándose en 2004 hasta representar el 77% del total de los GEI emitidos de manera antropogénicas [4]. Entre sectores y de manera global,

1. INTRODUCCIÓN

es el del suministro energético el que representa mayor contribución de GEI en el intervalo 1970-2004, resultando un incremento del 145%, destacando igualmente el incremento en el sector transporte que supuso un 120%. A estos ascensos se ha de sumar el proveniente de la industria que ascendió un 65% [4]. La eliminación de la emisión a la atmósfera de los GEI representa un enorme problema político dadas las implicaciones que supone la atenuación o eliminación de tales emisiones, debido a que afectan directamente al crecimiento y modo de vida de los habitantes en cualquier sociedad del planeta.

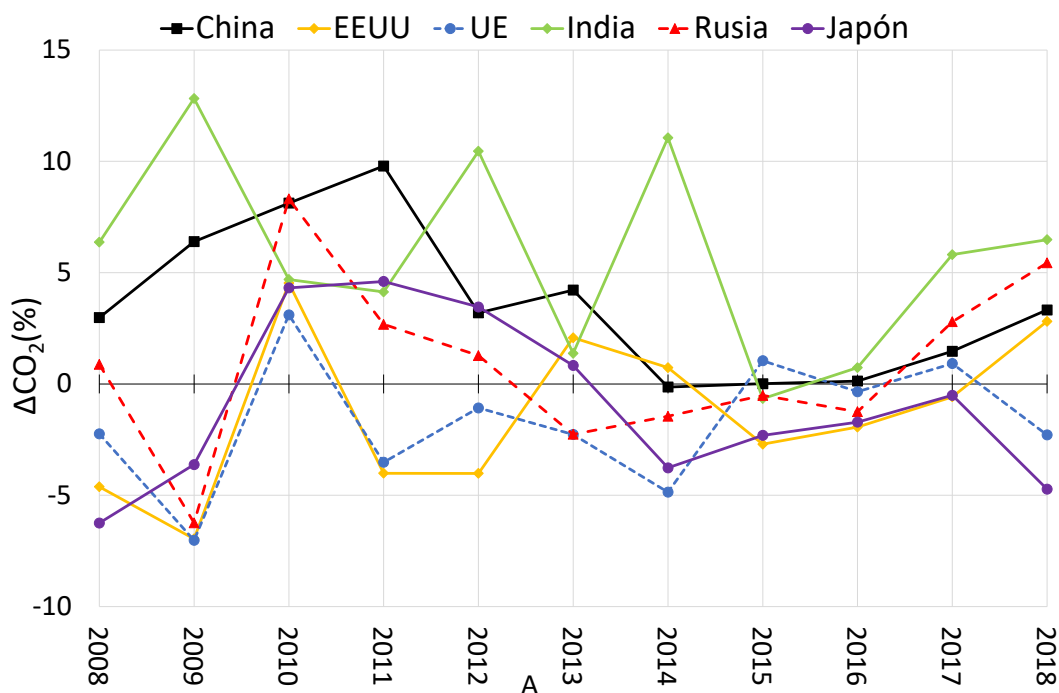


Figura 1.1.1: Evolución del incremento anual de emisiones de CO₂ en los seis países con mayor emisión durante el periodo estudiado. Fuente Banco Mundial [5].

De esta manera y atendiendo a la vulnerabilidad de las zonas más desfavorecidas por el Cambio Climático, este estudio se centrará en India, como zona de especial relevancia, no solo por su horizonte de superpoblación y vulnerabilidad, sino también por la creciente industrialización del país, así como por los medios y combustibles que se emplean para surtir de energía a esta sociedad. Estas especiales características la hacen el objetivo principal de este trabajo, al considerar la política energética de India, como uno de los principales instrumentos para la reducción de una parte importante a nivel global de las emisiones de GEI en el futuro. En este momento India supone un 6,89% de la emisión total de CO₂, pero es significativo constatar cómo mientras entre los mayores emisores

1.1 India, país de especial relevancia ante el Cambio Climático

mundiales de CO₂ se ha registrado una tendencia a la desaceleración en el incremento anual de emisiones, hasta incluso alcanzar la reducción de estas, en India esta tasa permanece al alza, suponiendo la de mayor crecimiento en la emisión entre las citadas.

La *Figura 1.1.1* muestra la evolución del incremento en las emisiones de CO₂, destacando la tendencia de las sociedades desarrolladas en la reducción de las mismas. De esta manera, sociedades como la europea o la japonesa, han sido capaces de reducir sus emisiones en los últimos años, destacando el esfuerzo realizado por Japón, después de tener que suplir la contribución proveniente de las centrales nucleares tras el accidente de Fukushima [6]. Igualmente, la economía China ha conseguido atenuar su incremento en las emisiones de CO₂, consiguiendo durante el intervalo 2014- 2016 un crecimiento cercano a cero. EEUU ha encadenado reducciones en sus emisiones a lo largo de la serie estudiada, aunque cambios en la política energética en EEUU, propiciados por la era Trump, han terminado con la senda de reducción en las emisiones, dando como resultado la subida de sus emisiones a partir de 2017 [7].

En cualquier caso, la tendencia demostrada por India en los últimos años es un indicador de la preocupante evolución en las emisiones del país, que han estado creciendo año tras año, con la sola excepción de 2015, en la que se registró un nivel de emisión semejante al de 2014. En el año 2018 las emisiones India fueron 6,5% superiores a las de 2017, lo que la lleva a casi duplicar la tasa de aumento de China con un incremento del 3,3% en el mismo periodo.

India con una población en 2020 de $1.380 \cdot 10^6$ habitantes [5], es el segundo país más poblado de la Tierra. El país continúa su senda de crecimiento, generando por ello una cantidad de dióxido de carbono que la sitúa en cuarto lugar entre los países más emisores [8]. La República de la India supone el 2,4% de la superficie mundial, pero en ella viven alrededor del 17,5% de toda la población del planeta. Entre su población se alberga la mayor proporción de pobres del mundo, situándose esta tasa en el 30 % de sus habitantes. En este contexto, alrededor del 24 % de la población del país no cuenta con acceso a la electricidad, lo que supone $304 \cdot 10^6$ de personas sin acceso a este bien. Este hecho provoca que alrededor del 30% de su población dependa de biomasa sólida para cocinar, o lo que resulta más preocupante, $92 \cdot 10^6$ personas ni tan siquiera disponen en sus hogares de acceso a agua potable [9].

El consumo medio anual de energía per cápita en 2011 se situó en India en tan solo 0,6 toneladas de petróleo equivalente (toe), en comparación con el promedio mundial de consumo per cápita de 1,88 toe [9]. Partiendo de esta base, es previsible que el consumo energético en India ascienda en los próximos años, dada la incorporación a la red eléctrica de nuevos hogares y a la mejora de su economía que crece a fuerte ritmo, pasando su Producto Interior Bruto (PIB) de $1,67 \cdot 10^{12}$ a $2,87 \cdot 10^{12}$ US\$ en el intervalo comprendido entre los años 2010 y 2019, lo que ha supuesto casi duplicar su PIB en 9 años [5].

1. INTRODUCCIÓN

El propio gobierno de la República de la India, mediante su Contribución Determinada Nacional (NDC)¹ alcanzada en los acuerdos de París, marca el horizonte de crecimiento mostrado en la *Tabla 1.1*, donde se puede apreciar la superpoblación, el progreso económico y la demanda energética en India en el horizonte previsto por su gobierno para el año 2030.

Tabla 1.1: Estimación de crecimiento para India. Fuente NDC (Gobierno indio) [9].

Indicador	India en 2014	India en 2030
Población ^a	1200	1500
Población Urbana ^a	377 (2011)	609
PIB ^b	1,69	6,31
PIB per cápita ^c	1408	4205
Demanda Eléctrica ^d	776 (2012)	2499

^a Población en 10⁶ personas

^b PIB en 10¹² US\$ precios constantes referidos a 2012

^c PIB per cápita en US\$ precios constantes referidos a 2012

^d Demanda eléctrica en 10¹² Wh

Para lograr la comprensión de los factores que están detrás de las emisiones de CO₂ en India, esta tesis disgregará la economía del país en diversos sectores económicos, lo que permitirá conocer con exactitud, los factores socio económicos que confluyen en el aumento o la disminución de las emisiones. Para representar de una manera más completa el problema, este trabajo comparará en primera instancia, la evolución de los factores bajo estudio en las seis economías con más peso en las emisiones globales de CO₂, esto es, República Popular China, Estados Unidos de América, la Unión Europea (considerando como un conjunto)², República de la India, Federación Rusa y el Estado del Japón. De esta

¹ Compromisos acordados por cada estado firmante en los Acuerdos de París para prevenir el Cambio Climático.

² Austria, Bélgica, Bulgaria, Croacia, República de Chipre, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Holanda, Polonia, Portugal, Rumania, Eslovaquia, Eslovenia, España, Suecia y Reino Unido.

1.1 India, país de especial relevancia ante el Cambio Climático

manera se estudiarán en primera instancia más del 67% de las emisiones globales [8], lo que confiere a este estudio capacidad de poner en contexto no solo los valores obtenidos para India, sino también, entender los factores que están detrás de la contaminación global antropogénica mediante CO₂, al estudiar más de un 67% de las emisiones mundiales.

La *Figura 1.1.2*, muestra el valor total de emisiones de CO₂ y la participación agregada de los países anteriormente citados para el año 2018. En dicha figura destaca la participación de China, con alrededor del 28% de las emisiones globales de CO₂ en 2018. Según los datos del Banco Mundial [5], China creció desde los $1135 \cdot 10^6$ habitantes en 1990 hasta $1393 \cdot 10^6$ en 2018. El país asiático impulsó numerosos cambios en su economía desde 1978, entre las que destaca el otorgamiento de licencias a empresas privadas.

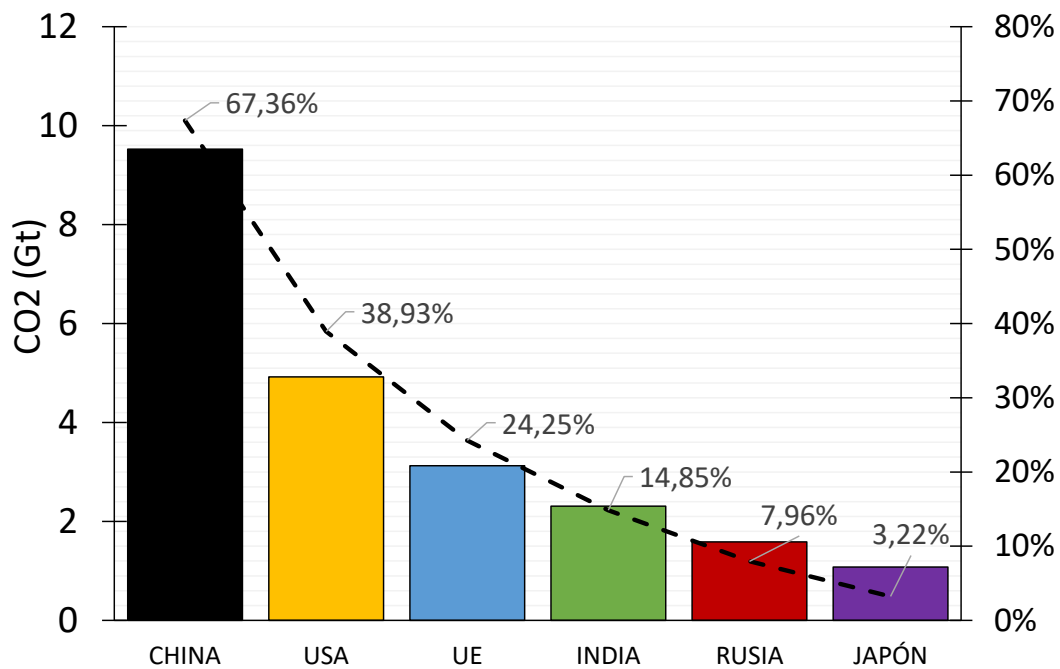


Figura 1.1.2: Emisión y porcentaje agregado de los mayores emisores de CO₂ en 2018. Fuente IEA (International Energy Agency) [8]

Para el periodo 1990 al 2018, intervalo estudiado por esta tesis, las reformas llevadas a cabo por el gobierno chino han propiciado que su PIB creciera anualmente por encima del 10%. De esta manera, China se convirtió en la segunda economía mundial en 2018, con un PIB de $13,8 \cdot 10^{12}$ US\$ [5].

1. INTRODUCCIÓN

EEUU supone el 14,68 % de las emisiones globales en 2018. El país creció de $249 \cdot 10^6$ a $326 \cdot 10^6$ habitantes durante el periodo estudiado, manteniendo la senda de crecimiento económico, únicamente ensombrecido por la crisis del año 2009, cuando su PIB cayó un 2,5%. El PIB del país en 2018 fue de $20,6 \cdot 10^{12}$ US\$ [5].

Con una población de $420 \cdot 10^6$ habitantes en 1990, la Unión Europea supone un 9,4% de las emisiones, alcanzando los $447 \cdot 10^6$ habitantes en 2018. La Unión presentó un constante crecimiento en su PIB en la serie histórica estudiada, con un valor medio de incremento del 2%, salvando la mencionada crisis económica de 2009. Su PIB en 2018 alcanzó los $15,6 \cdot 10^{12}$ US\$ [5].

Rusia representa un 4,74% de las emisiones mundiales de CO₂, disminuyendo su población en alrededor de 3 millones de personas durante el período estudiado, con $1,44 \cdot 10^{12}$ US\$ en 2018. Su PIB sufrió una profunda contracción debido a la desintegración de la antigua Unión Soviética, que provocó la caída de su PIB hasta el año 1997, pero desde entonces la riqueza del país ha aumentado notablemente, con la excepción de los años 2009 y 2015. En 2018 su PIB ascendía a $1,6 \cdot 10^{12}$ US\$ [5].

Japón, con una participación del 3,22% en las emisiones globales, ha incrementado su población en el periodo estudiado en 3 millones de habitantes, alcanzando los $126 \cdot 10^6$ ciudadanos en 2018. Su riqueza ha crecido levemente durante el período estudiado, registrando dos bajadas, la primera de ellas en 2009, con una caída del 5,4%, registrándose la segunda en 2011 debido al desastre nuclear de Fukushima. Su PIB en 2018 alcanzó los $4,955 \cdot 10^{12}$ US\$ [5].

1.2 Objetivos de esta tesis

Esta tesis se marca como objetivo fundamental analizar los factores que están detrás de las emisiones de CO₂ en la República India, debido como se ha precisado, a la especial relevancia global que se prevé tendrán. Estos factores, producen en su mayoría un efecto potenciador de las emisiones resultantes, pero como se probará, existen factores que ejercen una acción reductora, siendo en su totalidad descritos en el capítulo Metodología. Para conseguir este objetivo principal, esta tesis se cimenta en los trabajos, ¿“Is India on the right pathway to reduce CO₂ emissions? *Decomposing an enlarged Kaya identity using the LMDI method for the period 1990–2016*” y “*CO₂ emissions and causal relationships in the six largest world emitters*”, que hemos publicado en *Science of The Total Environment* y *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, respectivamente, donde se han podido identificar cada uno de los factores que han contribuido a la proliferación de emisiones. En la presente tesis, se profundizan estos trabajos, tomando nuevos objetivos, como una mejor definición del problema, analizando en primera instancia los objetivos marcados mediante la NDC, la evolución en lo referente a población y modo de vida, así como a disgregar el tejido productivo indio en sectores, que con más precisión representen la evolución económica experimentada por el país en los 28 años estudiados, o la disgregación realizada en el capítulo Energía, que aporta una clara visión de los combustibles empleados a lo largo del periodo estudiado, así como la evolución en el uso de cada uno de ellos. La inclusión de nuevos combustibles ha sido otro objetivo, mejorando la definición de las fuentes que proveen a cada sistema de energía, así como la emisión final resultante derivada del empleo de cada uno de ellos.

Desde el inicio, esta tesis se marca como objetivo emplear un método analítico para la ponderación de los factores, no solo en India, sino que se pretende llevar el trabajo unos pasos más allá, analizando al grupo de países que representó en su conjunto más del 67% de las emisiones totales de CO₂ en 2018. Este estudio separado de las seis potencias económicas globales aporta un valor añadido a esta tesis, ya que además de poner en contexto los datos indios, permite a su vez conocer la evolución de cada una de las sociedades analizadas. Esta técnica comparativa permitirá a su vez tanto la comparación de los factores examinados en India con países desarrollados, como en aquellos en vías de desarrollo, con marcada tendencia en la evolución positiva de sus emisiones.

Con propósito de mostrar la evolución de India, esta tesis se marca como objetivo adicional emplear una serie temporal que incluya además su mejora económica, posibilitando además la comparación con el resto de países estudiados. De esta manera, se emplea una serie temporal desde 1990 a 2018, último con datos conocidos a la realización de esta tesis. Esta serie temporal se ha mostrado idónea para el trabajo realizado, ya que además de proporcionar una gran cantidad de información, incluye los años bases de las NDC correspondientes a la totalidad de los países estudiados, posibilitando de este modo la visualización completa de cada uno de los compromisos.

1. INTRODUCCIÓN

Otro objetivo ha sido evaluar la relación entre cada uno de los factores analizados, por lo que se emplearán técnicas que tasan cada una de las relaciones, de una manera bidireccional. Este análisis, ponderará la viabilidad del empleo de alguno de los factores para predecir el comportamiento futuro de otros, permitiendo una comprensión del problema de las emisiones resultantes desde otra perspectiva a la empleada mayoritariamente.

Con el objeto de predecir la tendencia de las emisiones en India, esta tesis se marca también como objetivo el análisis del comportamiento futuro, analizando los principales factores generadores de emisiones, así como examinando los objetivos comprometidos por India en su NDC. Para lograr este objetivo, se extrapolarán los datos de emisiones, PIB e intensidad de emisiones, empleando técnicas contrastadas que son de uso en modelos que combinan diferentes escenarios descritos en el capítulo metodología.

El objetivo final de este estudio permitirá evaluar diferentes conclusiones que supongan implicaciones políticas que permitan atenuar las emisiones resultantes en India, aportando para ello modelos a futuro del comportamiento tras los cambios realizados, definidos en cada uno de los escenarios.

1.2.1 Materiales empleados para la consecución de los objetivos.

Para alcanzar estos objetivos, será preciso la descomposición de la economía india en diversos sectores económicos y analizar los combustibles y sistemas que hacen posible su evolución. A lo largo de los sucesivos capítulos, serán debidamente definidos los factores analizados, así como las técnicas analíticas empleadas para su cuantificación, ponderación y extrapolación, para de esta manera, representar la evolución que el estado indio ha experimentado a lo largo del periodo analizado, generando proyecciones de la evolución dentro de los escenarios propuestos de los principales factores. Como se indica en la sección Bibliografía de este capítulo, contrastadas publicaciones han tomado como factor de estudio al PIB, marcando a este factor como de determinante importancia potenciadora de las emisiones. Esta circunstancia hizo que esta tesis se marcara como uno de los factores de estudio al PIB. Otro de los factores a analizar será la población, dada la especial relevancia que ha demostrado la inclusión de este factor, en los artículos publicados descritos con anterioridad.

Para la evaluación de la importancia de cada uno de los factores, esta tesis empleará la identidad Kaya (ver sección 3.1 *La identidad Kaya*), empleando como términos de la identidad a los factores PIB per cápita, la proporción que cada sector económico analizado representa dentro del PIB, la Población, la Energía consumida para generar la riqueza por sectores, los combustibles y sistemas que han aportado esta energía y los factores de emisión de cada uno de los combustibles.

El método de descomposición principal empleado por este trabajo, será la metodología LMDI (ver sección 3.2 *Metodología LMDI*). Este método, que se aplicará empleando la metodología aditiva y multiplicativa en el conjunto de países, permitirá apreciar la importancia que para las emisiones totales de CO₂, ha tenido cada uno de los factores. La aplicación del método permitirá descomponer para cada uno de los factores, el incremento respecto a la totalidad de la emisión de CO₂ desde el año base 1990, a cualquiera entre los años analizados. Este análisis permitirá, para el modelo aditivo, diferenciar que cantidad de emisión directa se debe a cada uno de los factores, resultando la suma de ellos para cualquier año, la totalidad del incremento, lo que distingue a este método por su simplicidad a la hora de evaluar los resultados obtenidos. Esta metodología se aplicará igualmente para cada uno de los sectores económicos analizados, permitiendo apreciar la evolución de cada uno de los factores a lo largo de la serie histórica dentro de cada sector, enriqueciendo el análisis, dado que a lo largo de los años analizados se han producido importantes cambios en los sectores productivos, cambiando de manera notable la actividad económica entre sectores.

Además, para aportar otro enfoque a las relaciones existentes entre los factores analizados, especialmente para aquellos que relacionan la emisión resultante, el PIB y las energías renovables, en la presente tesis se ha realizado un análisis de causalidad de Granger (ver sección 3.3 *Análisis mediante la causalidad de Granger usando el test de Toda-Yamamoto*).

1. INTRODUCCIÓN

Esta metodología permite encontrar relaciones de causalidad entre los diferentes factores estudiados, lo que permite encontrar qué factores (α), pueden emplearse por su relevancia con respecto a la evolución de otros factores (β), para de esta manera predecir el comportamiento futuro de los factores (β), posibilitando analizar desde otro punto de vista las relaciones manifestadas entre los factores bajo estudio. Para este cálculo particular, se han incorporado como variables las energías libres de emisiones, permitiendo de este modo apreciar las relaciones que las renovables tienen en cada uno de los sistemas analizados, así como la influencia efectiva que su incorporación ha tenido al modelo generativo de un país determinado, dada la influencia provocada por su efecto exclusivo en las emisiones de CO₂.

Para la extrapolación de los datos se han propuesto diversos escenarios, que se describirán detalladamente en el capítulo Metodología. El escenario 1 corresponderá a la evolución "natural" siguiendo la tendencia de los años previos. La aplicación exclusiva de las medidas económicas descritas en la NDC de India, pero incluyendo únicamente el crecimiento del aporte de las energías renovables experimentado en la serie histórica, nos dará el escenario 2. El escenario 3 representará la aplicación de las medidas completas descritas en la NDC, con la consecuente ampliación propuesta en energías renovables. El escenario 4 incluirá además medidas de eficiencia energética, que consecuentemente reduzcan la demanda energética final del sistema indio.

Los escenarios descritos aportarán las bases para generar proyecciones de los principales factores, así, se proyectarán para el periodo 2018-2030 los factores PIB, emisiones de CO₂, y por la importancia que representa para el cumplimiento de los Acuerdos de París, la intensidad de emisiones con respecto al PIB.

1.3 Compromisos adquiridos contra el Cambio Climático

India es uno de los 193 países firmantes de los acuerdos de París, entre los que se cuenta a la Unión Europea como un solo firmante. Este acuerdo vinculante que entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, pretende establecer objetivos a largo plazo para el conjunto de naciones firmantes, entre los que destacan:

- Reducir de manera sustancial las emisiones de GEI para limitar el aumento de la temperatura media del planeta en este siglo por debajo de 2°C, esforzándose para que este incremento no rebase los 1,5°C.
- Revisar cada 5 años los compromisos alcanzados por cada estado firmante.
- Establecer líneas de ayudas a los estados firmantes en vía de desarrollo para, de esta manera, posibilitar el acceso a tecnologías que permitan reducir las emisiones contaminantes, fortalecer su resiliencia y mejorar su capacidad de adaptación a los impactos del Cambio Climático.

En este marco India establece su Compromiso nacional determinado (NDC) basados en la justicia climática, los principios de equidad y la responsabilidad común ante el problema del cambio climático, pero establece de fondo un enfoque que marca las diferencias entre las sociedades desarrolladas y las que se encuentran en vías de desarrollo, con capacidades distintas a la hora de afrontar el citado problema común [9]. Con este enfoque, India entra en los Acuerdos sin renunciar a erradicar la pobreza en la que se encuentran inmersos una gran parte de su sociedad, pretendiendo alcanzar unos requisitos que marquen un espacio equitativo de emisiones de carbono, posibilitando de esta manera que no se frene su desarrollo. En esta línea, se refirió en su discurso ante las Naciones Unidas el primer ministro de India el 25 de septiembre de 2015, cuando aseguró “Todos creemos que la asociación internacional debe estar en el centro de nuestros esfuerzos, ya sea para el desarrollo o la lucha contra el Cambio Climático. Y, el principio común pero diferenciado las responsabilidades como base de nuestra empresa colectiva. Cuando hablamos solo de Cambio Climático, hay una percepción de nuestro deseo de asegurar las comodidades de nuestro estilo de vida. Cuando nosotros hablamos de justicia climática, demostramos nuestra sensibilidad y determinación para asegurar el futuro de los pobres de los peligros de los desastres naturales” [9].

Siguiendo estos principios, el Estado indio se marca como compromiso un plan que pretende resolver el problema actuando en distintas direcciones. De esta manera, se actuará sobre la mitigación de las emisiones de GEI, la adaptación ante el Cambio Climático,

1. INTRODUCCIÓN

la creación de instrumentos financieros y la cooperación externa. Entre las estrategias de mitigación marcadas por el Gobierno indio destacan la promoción de energías libres de emisiones contaminantes, potenciando la energía eólica, solar, biomasa, hidroeléctrica y nuclear. Así, se pretende ampliar la capacidad instalada de cada una de las citadas, lo que convertirá a India en el quinto país por potencia instalada de manera eólica, alcanzando una potencia instalada en 2022 por encima de 60 GW [9]. La energía solar también recibirá un gran impulso, siendo esta tecnología la principal iniciativa del Gobierno indio. Así, se establece un ambicioso plan que fomenta la instalación solar, pretendiendo alcanzar una potencia instalada de 100 GW (2022) [9]. Del mismo modo, se pretende potenciar uno de los tradicionales pilares energéticos en el entorno rural, la biomasa. Esta energía de la que dependen el 70% de los hogares en zonas rurales se pretende fortalecer y emplear para la generación eléctrica, construyendo nuevas plantas que permitan alcanzar en 2022 una capacidad instalada de 10 GW [9].

En el citado compromiso, India no descarta al carbón como principal fuente de energía primaria para la generación eléctrica, pero pretende impulsar una renovación de sus plantas aplicando una estrategia de mejora en la eficiencia. Así, todas las nuevas plantas generadoras que emplean el carbón como combustible, han recibido el mandato de utilizar Tecnología Supercrítica, que presenta unos niveles de eficiencia mucho mayores. De esta manera, se están renovando y modernizando las viejas centrales eléctricas existentes, de acuerdo a un plan de mejora escalonado [9]. La Tecnología Supercrítica domina la industria de generación eléctrica mediante carbón gracias a su rendimiento, lo que repercute en la generación de una misma cantidad de energía con una menor emisión contaminante. Esta tecnología permite alcanzar mayor eficiencia gracias a elevar la temperatura del vapor, de esta manera, se pueden alcanzar rendimientos de hasta un 52 %, en contraposición con los rendimientos en las plantas tradicionales que se encuentran por debajo del 35 % [10].

La vulnerabilidad del estado indio marca su política de adaptación al Cambio Climático. Esta fragilidad difiere entre estados y regiones, cambiando igualmente entre diferentes grupos de personas dentro de la misma región debido a variaciones sustanciales en la topografía, el clima, clases sociales y los diversos ecosistemas. Esta política de mitigación se centra entre otros en la agricultura, dado que es el sustento económico de casi dos tercios de la población, el agua, la salud, las regiones costeras e islas, la dirección de los desastres y la protección de la biodiversidad y el ecosistema himalayo [9].

En lo que se refiere a los instrumentos financieros que posibilitarán los cambios a realizar, el gobierno indio se basa en las fuentes presupuestarias de programas sectoriales en curso, pero también ha ampliado alguna de las medidas que hasta ahora tomaba. De esta manera, los fondos nacionales son en primera instancia los recursos que cubrirán las inversiones, especialmente la tasa al carbón, que cargaba con 0,8 US\$ por cada tonelada consumida desde 2010, ampliada a 3,2 US\$ por tonelada como medida de compensación ante el reto

1.3 Compromisos adquiridos contra el Cambio Climático

que supone la NDC [9]. En el mismo sentido han sido impulsadas medidas que reducen subsidios o incrementan con tasas a los combustibles que tienen como origen el petróleo, especialmente el diésel y la gasolina, mientras que han sido eliminadas las tasas para los nuevos proyectos en energías renovables.

Aunque la intensidad de emisiones referida al PIB de India ha venido reduciéndose a lo largo de los años, el Estado indio pretende aumentar su eficiencia empleando para ello la cooperación externa. Esta medida pretende generar canales de comunicación para compartir nuevas tecnologías que mitiguen los efectos del Cambio Climático. Estos cauces de comunicación compartirán información y esfuerzos de manera multilateral, involucrando tanto a los sectores públicos como a las empresas del sector privado. Esta colaboración bilateral ha permitido que tecnologías desarrolladas por India, hayan sido llevadas a cabo por países desarrollados y viceversa, generando de este modo una corriente de información que permite incrementar la eficiencia de la energía, así como posibilitar la entrada en el mix energético de tecnologías renovables.

Las citadas medidas adoptadas pretenden impulsar los compromisos indios ante Naciones Unidas mediante su NDC, que se pueden resumir de la siguiente manera:

- Promover y proponer una forma de vida sostenible, basada en las tradiciones y valores de conservación y moderación.
- Adoptar un camino sostenible con el clima, más limpio que el seguido por otras economías con el mismo nivel de desarrollo económico.
- Reducir la intensidad de emisiones referidas al PIB de un 33 a un 35% en 2030, tomando como referencia las emitidas en 2005.
- Alcanzar alrededor del 40% de la capacidad instalada de energía eléctrica acumulada a partir de recursos energéticos basados en combustibles no fósiles para 2030 con la ayuda de la transferencia de tecnología y financiación internacional de bajo costo, incluido el Fondo Verde para el Clima (GCF).
- Crear un sumidero de carbono adicional de 2,5 a 3 mil millones de toneladas de CO₂ equivalente a través de una cubierta forestal y arbórea adicional para 2030.
- Adaptarse mejor al cambio climático mejorando las inversiones en desarrollo de programas en sectores vulnerables al cambio climático, particularmente agricultura, agua, recursos, región del Himalaya, regiones costeras, salud y gestión de desastres.
- Movilizar fondos nacionales, nuevos y adicionales de países desarrollados para implementar las acciones de mitigación y adaptación anteriores en vista del recurso requerido y la brecha de recursos.
- Para desarrollar capacidades, crear un marco nacional y una arquitectura internacional para la difusión de tecnología climática de vanguardia en la India y para la I+D colaborativa conjunta para tales tecnologías futuras.

1. INTRODUCCIÓN

Cabe destacar que el único apartado de la NDC referida a la bajada de emisiones contaminantes está referido a la intensidad de emisiones con respecto al PIB, por lo que no existe un compromiso de reducción de emisiones totales, siendo una subida de su PIB superior al incremento de emisiones, una herramienta suficiente para bajar el indicador comprometido. Para mejorar la comprensión del alcance de los objetivos comprometidos por India, la *Tabla 1.2* compara los compromisos adquiridos por los países objeto de colación en este trabajo.

Tabla 1.2: NDC de los principales emisores de GEI. Fuente Naciones Unidas (UN) [11].

País	Fecha	Indicador	Compromiso
CHINA	30-06-2015	Intensidad de Emisiones (CO ₂ /PIB)	Alcanzar el pico de emisiones de dióxido de carbono alrededor de 2030 y hacer los mejores esfuerzos para alcanzar el pico incluso antes. Reducir las emisiones de dióxido de carbono por unidad de PIB entre un 60 % a un 65 % con respecto al nivel de 2005. Incrementar la participación de los combustibles no fósiles con el consumo de energía primaria de alrededor del 20%.
EEUU	31-03-2015	Emisiones	Intención de lograr un objetivo de reducción de GEI en toda la economía del 26%-28% por debajo de su nivel de 2005 en 2025 y hacer esfuerzos para reducir sus emisiones en un 28%.
	22-04-2021		Estar en el camino para lograr cero emisiones netas en toda la economía, a más tardar en 2050, lo que contribuiría sustancialmente al objetivo descrito en el Artículo 4.1 de alcanzar el punto máximo global de emisiones de GEI lo antes posible y emprender reducciones rápidas a partir de entonces de acuerdo con los mejores conocimientos científicos disponibles, para lograr un equilibrio entre las emisiones y absorciones antropógenas.
UE	06-03-2015	Emisiones	Al menos un 40 % de reducción interna de las emisiones de GEI para 2030 en comparación con 1990.
	18-12-2020		Reducción de al menos un 55% de las emisiones de GEI para 2030 en comparación con 1990.
INDIA	01-10-2015	Intensidad de Emisiones (CO ₂ /PIB)	Reducir la intensidad de emisión de su PIB en un 33-35% para 2030 tomando como referencia 2005.
RUSIA	01-04-2015	Emisiones	Reducir las emisiones de GEI en un 25-30% desde los niveles de 1990 para 2030.
JAPÓN	17-07-2015	Emisiones	Reducciones de emisiones del 26,0% en 2030 (ejercicio fiscal) en comparación con 2013 (ejercicio fiscal). (Reducción del 25,4% respecto al ejercicio 2005).

1.3 Compromisos adquiridos contra el Cambio Climático

Es preciso constatar que mientras las economías desarrolladas han optado por compromisos que toman como indicador la emisión final de GEI, las economías en desarrollo han optado por la opción de tomar como indicador la intensidad de emisiones referidas al PIB. Este indicador resulta más ventajoso para las citadas economías, dado que las posibilita continuar con el desarrollo de sus respectivas sociedades, permitiendo la eliminación de la barrera que supondría una reducción de emisiones sin la posibilidad económica de un cambio en su modelo generativo de energía.

1.4 Macroeconomía, Producto Interior Bruto

El PIB es uno de los principales indicadores económicos empleados para caracterizar la economía de un país. Su valor nos aporta una instantánea de la situación económica de un estado. Se emplea como base para la comparación del tamaño y la evolución de una economía.

Como se respaldará en la revisión de la literatura, uno de los mayores contribuidores a de la emisión de GEI es la actividad económica. Esta razón está detrás de incluir las variaciones a lo largo de la serie temporal de este indicador, atendiendo igualmente, a las variaciones que India y el resto de países analizados, ha tenido en la composición del PIB entre los principales sectores económicos. Para elaborar este epígrafe, se han separado los sectores únicamente en 3, empleando para ello la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de actividades económicas (ISIC versión 3). De esta manera, se han agrupado los sectores como primario, correspondiente a las secciones A y B de la CIIU, que incluyen agricultura, ganadería, silvicultura y pesca, además de minería y explotación de canteras. El sector Industrial, correspondientes a las secciones C, D, E y F, incluyendo, entre otros, la fabricación, suministro de electricidad, gas, agua, gestión de residuos y construcción. Finalizando con el sector servicios, que incluye el resto de secciones compuestas por comercio, transporte y almacenamiento, consumo residencial y servicios públicos. Esta clasificación promovida por Naciones Unidas nos permite comparar de manera uniforme los datos correspondientes a diferentes países, combustibles y sectores.

Esta diferenciación por sectores en cada economía estudiada permite a su vez el seguimiento en la evolución de una sociedad, marcando los cambios en los sectores que posibilitan el PIB final del estado estudiado. Esta manera de presentar los datos permite apreciar los cambios que, como en India, han venido sucediéndose para pasar de ser una sociedad tradicionalmente agrícola, a la rápida inmersión en una floreciente industria. A lo largo de este trabajo se verán las patentes repercusiones que estos cambios en la actividad económica ejercen en las emisiones finales de GEI.

Para tener una referencia para la comparación de los datos de India, este estudio mostrará los resultados para el mismo indicador en las otras 5 sociedades que presentan mayores índices de emisión de dióxido de carbono. De esta manera se presentarán en primera instancia los indicadores de China, EEUU, UE, Rusia y Japón, para terminar en cada sección con un análisis en mayor profundidad y detalle de los indicadores de India.

1.4.1 Producto Interior Bruto en las sociedades a comparar con India

CHINA

El creciente poder económico de China es un hito en la última mitad del pasado siglo. Las reformas económicas llevadas a cabo por esta sociedad han producido deslumbrantes resultados, sacando a cientos de millones de chinos de la pobreza extrema [12].

El país ha experimentado un crecimiento extraordinario a lo largo de la serie histórica estudiada, comenzado con un PIB de $0,83 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990), para alcanzar un volumen total de $10,87 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018). El ritmo de crecimiento no ha sufrido recesión en ningún momento, siendo este indicador siempre positivo a lo largo del periodo estudiado. El máximo ritmo de crecimiento anual del PIB alcanzó un valor del 14,23% (2007), mientras que los ritmos más bajos se encuentran al final de la serie temporal donde el país registra una desaceleración, aunque esta supone simplemente marcar ritmos de crecimiento por debajo del 7%, registrando un mínimo del 6,75% (2018).

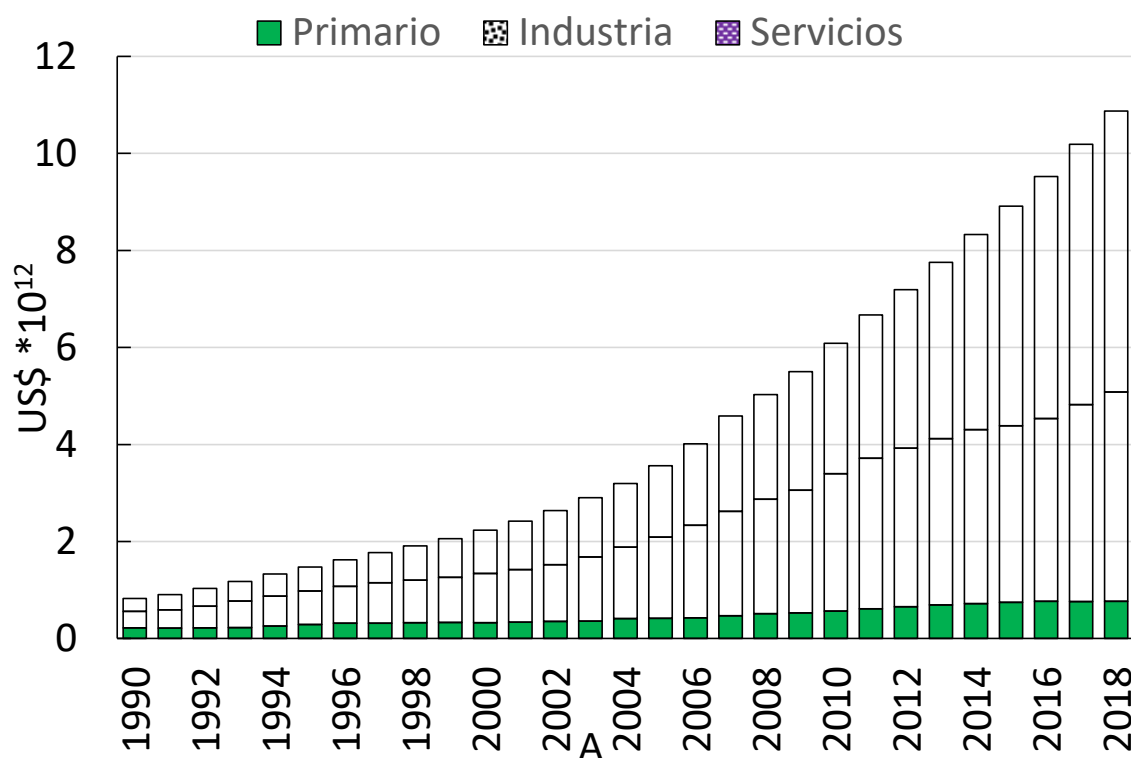


Figura 1.4.1: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en China. Fuente Banco Mundial [6].

1. INTRODUCCIÓN

Para el año 2005, China poseía un PIB de $2,26 \cdot 10^{12}$ US\$, siendo este superior al de Francia, Gran Bretaña e Italia. Esta situación llevará a China a ser la cuarta economía en importancia mundial, siendo a su vez la tercera nación en volumen de exportaciones a nivel mundial [5].

La *Figura 1.4.1* presenta los datos descritos, apreciándose en los primeros años de la serie temporal una similitud en el tamaño de los sectores estudiados. La evolución del estado asiático ha sido imparable a lo largo de la serie, suponiendo una variación a lo largo de los 28 años analizados del 1213,6 %.

Para alcanzar los niveles de PIB iniciales de China fue preciso un aporte del 26,6% del sector primario. Esta cuota inicial del sector primario supone el máximo para la serie estudiada, ya que los avances en industria y servicios han llevado al sector primario a aportar únicamente el 7,04 % del PIB (2018), a pesar de que el volumen que este sector aporta anualmente al PIB alcanzó en 2018 una cantidad similar ($0,77 \cdot 10^{12}$ US\$), a la aportada por el conjunto de sectores para el año en 1990.

El principal sector para el impulso de la economía China ha sido, al igual que lo ocurrido en otras economías estudiadas, el sector servicios. Este sector ha evolucionado desde aportar $0,27 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990) a aportar $5,79 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018), lo que le confiere el 53,3 % del PIB del país [5].

El sector industrial ha experimentado un formidable avance igualmente, pasando de suponer inicialmente un 41,03% del total del PIB, con un aporte de $0,34 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990) a contribuir con un 39,69% del PIB en 2018. Esta contribución ha sido disminuida por la mayor subida del sector servicios, aunque la aportación total experimente una tremenda subida, dado que el sector industrial aporta un total de $4,31 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018).

EEUU

La primera potencia económica mundial ha pasado a lo largo de la serie histórica por diferentes crisis económicas, pero aun así registra un importante crecimiento desde los $9,00 \cdot 10^{12}$ US\$(1990), hasta alcanzar los $17,90 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018). Las citadas crisis se fundamentan en déficit elevados, produciendo la primera de la serie estudiada en 1991. Pasada esta etapa sólo se gestaron superávits en las cuentas fiscales entre 1997 y 2001 [13]. En esta etapa se estaba produciendo una caída en el ahorro de las familias, que en muchos casos debían rehipotecar sus casas para mantener su gasto, mientras que los inversores extranjeros, fundamentalmente el gobierno chino, se encargaban de cubrir el déficit

1.4.1 Producto Interior Bruto en las sociedades a comparar con India

comprando la deuda del país. Al mismo tiempo numerosas empresas americanas, con aparentes sólidos beneficios, situaban su tejido productivo fuera de las fronteras americanas, impulsados por la reducción de costes en mano de obra, instalaciones y energía, pudiendo de paso eliminar los compromisos fijados en el país de origen con respecto a la emisión de gases y otras trabas medioambientales [14].

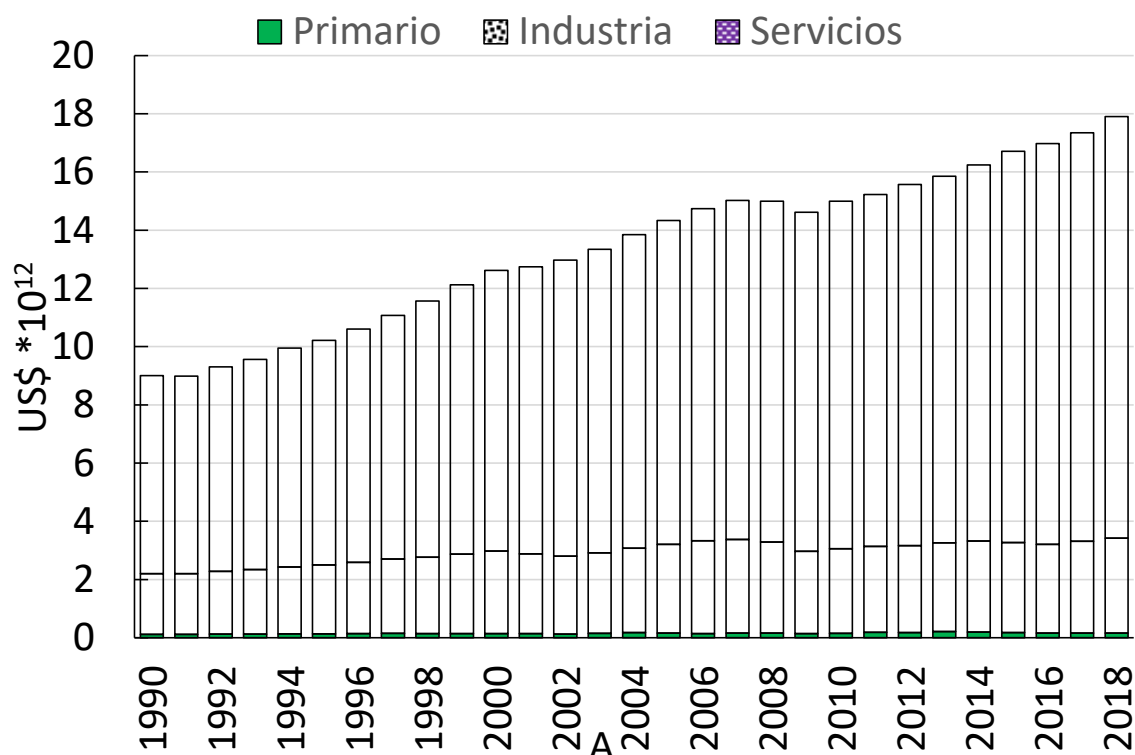


Figura 1.4.2: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en EEUU. Fuente Banco Mundial [6].

De nuevo a mediados de 2007 el país cae en una secuencia semejante, registrándose en primera instancia un déficit fiscal. Los intentos por corregir la situación, basados en la expansión del gasto, volvieron nuevamente a expandirlo desde comienzos de 2009, originando la crisis más acentuada de la serie histórica analizada [13].

La *Figura 1.4.2* muestra la evolución de los diferentes sectores estudiados dentro de EEUU, destacando claramente el sector servicios, con la mayor contribución al PIB del estado, aportando una riqueza que lo sitúa con un 80,88 % del PIB en el país, lo que supone un volumen económico del sector servicios que aportaba la suma de $14,48 * 10^{12}$ US\$ (2018).

1. INTRODUCCIÓN

En términos relativos el sector industrial ha perdido representación. Este sector partía al comienzo de la serie histórica con una contribución del 23,13 % (1990) del PIB, para pasar a incorporar únicamente el 18,21% (2018). Esta caída relativa se debe a que la subida del sector no ha sido proporcional a la registrada por el conjunto de la economía, dado que el crecimiento del sector le ha llevado subir su aporte desde $2,08 * 10^{12}$ US\$ (1990), hasta aportar $3,26 * 10^{12}$ US\$ (2018).

El sector primario ha perdido igualmente representación, pasando de aportar el 1,34% del PIB del país en 1990 a simplemente aportar el 0,92% en 2018, lo que supone un volumen de $0,16 * 10^{12}$ US\$ (2018).

UE

Situación similar se presenta en la Unión Europea, donde se verifican recesiones de similar importancia a la americana y registradas en el mismo periodo. La UE en los últimos años han estado dominada por periodos de crisis y cortos períodos de recuperación. En este sentido existe un conjunto de elementos coyunturales que actuaron a favor y en contra del crecimiento. Entre los elementos favorables se encuentran la disminución de los precios del petróleo, la depreciación del euro y la política monetaria expansiva del Banco Central Europeo (BCE).

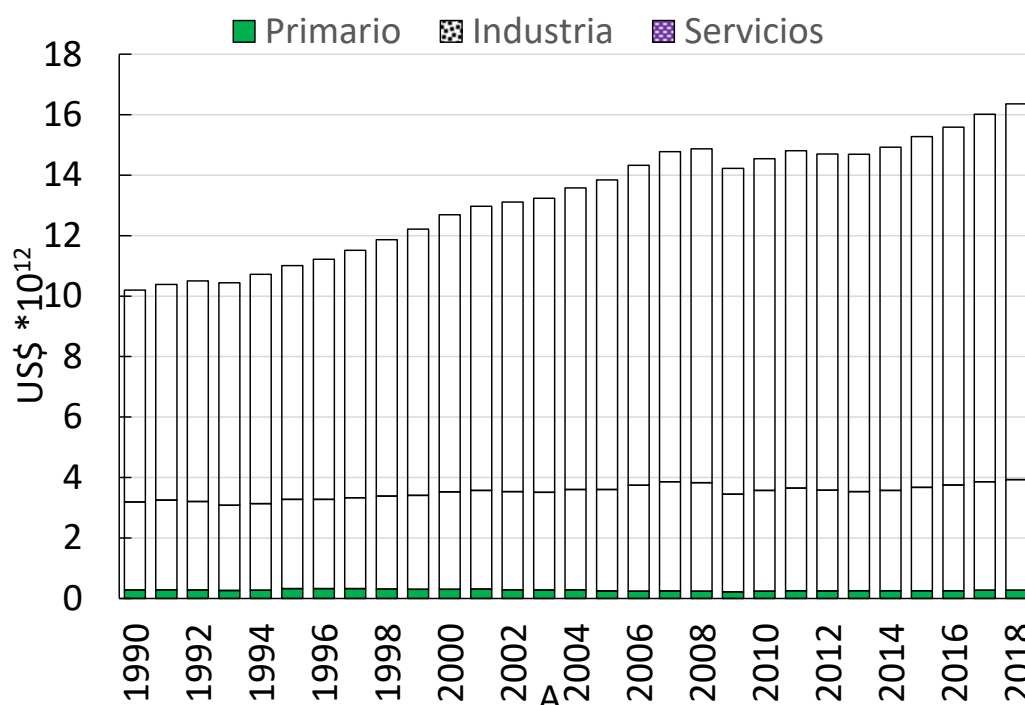


Figura 1.4.3: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en la UE. Fuente Banco Mundial [6].

1.4.1 Producto Interior Bruto en las sociedades a comparar con India

La *Figura 1.4.3* muestra la evolución del PIB en la zona euro, mostrando además el crecimiento del sector servicios por encima del resto. De este modo, el sector servicios creció desde un aporte de $7,01 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990), a aportar $12,46 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018), lo que le lleva a aportar un 75,97 % de PIB.

El sector industrial ha bajado su representación en la economía europea, partiendo al comienzo de la serie histórica con un aporte del 28,55% (1990), para reducirse hasta alcanzar el 22,37% (2018), aportando $3,66 \cdot 10^{12}$ US\$.

La tendencia del sector primario, presenta similares características a las mostradas para los países anteriormente citados, registrando una bajada en la proporción que del PIB ocupa. Esta tendencia sitúa al aporte del sector primario en un 1,66% del PIB (2018), después de comenzar la serie histórica con un aporte del 2,75%.

RUSIA

Rusia dispone de un PIB de $1,73 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018), después de subir desde los niveles registrados en 1998, que presentan un mínimo en la serie histórica analizada de $0,81 \cdot 10^{12}$ US\$.

El país experimentó una profunda crisis al disolverse la antigua Unión Soviética en 1991, cuando Mijail Gorbachov inició un periodo de apertura política conocido como Perestroika. Este cambio de rumbo daba mayor autonomía a los directivos de las empresas públicas, lo que originó una apertura hacia las empresas privadas. Los cambios estructurales en el PIB ruso a principios de la década de 1990, la contracción en la producción militar en un 65% y la reducción de la fabricación de la producción civil tuvieron un impacto negativo sobre el mercado ruso. El peso de las industrias ligera y alimentaria se contrajo hasta casi la mitad, creciendo el precio de los combustibles y la energía. La reducción de la producción de artículos de tecnología avanzada se observó en toda la industria. La prestación de los servicios a la población se redujo más rápidamente que la producción de los bienes de consumo. La parte de los gastos de investigación y desarrollo disminuyó, igualmente se redujo en ciencia y tecnología [15].

La *Figura 1.4.4* muestra la evolución citada para Rusia, pudiéndose apreciar la evolución entre sectores económicos, encabezados por el sector servicios que sostiene el 63,81 % del PIB, aportando $1,11 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018). Este sector ha evolucionado desde un aporte al final de la crisis económica de 1998 donde aportaba únicamente $0,49 \cdot 10^{12}$ US\$, con una cuota del PIB del 60,95%.

1. INTRODUCCIÓN

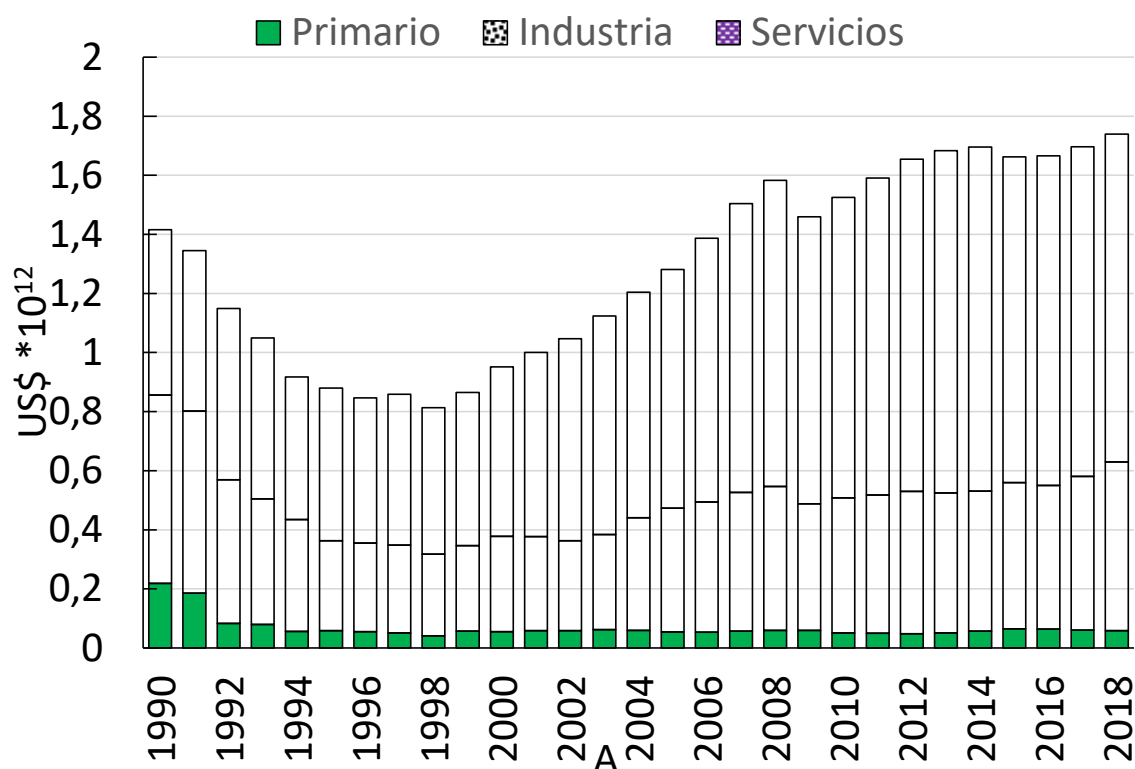


Figura 1.4.4: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en Rusia. Fuente Banco Mundial [6].

El sector industrial ha recuperado los niveles registrados antes de la desintegración de la Unión Soviética, aportando al PIB la cantidad de $0,57 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018), lo que sitúa a este sector como el 32,81% el PIB. Este sector evoluciona desde aportar únicamente $0,27 \cdot 10^{12}$ US\$ (1998), con una participación del 33,94% del PIB.

El sector primario no recupera los valores registrados en el inicio de la serie temporal, donde aportaba $0,21 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990), con una participación del 15,46%. Este indicador ha venido desplomándose, como en el resto de países desarrollados, hasta representar únicamente el 3,37% de la economía rusa, aportando al PIB un total de $0,06 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018).

1.4.1 Producto Interior Bruto en las sociedades a comparar con India

JAPÓN

EL país nipón ha registrado una subida moderada en el conjunto del PIB que aportan cada uno de los sectores económicos. Esta subida se cifra en un 31,18% a lo largo de la serie estudiada, lo que supone un 1,1% de subida anual. En concreto, el PIB registrado en Japón suponía $4,70 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990), alcanzando un valor final de $6,17 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018).

Tradicionalmente el estado japonés ha tenido gran capacidad económica asociada a su sector servicios, suponiendo desde el principio de la serie histórica un 63,35% de la totalidad de su PIB, lo que llevaba al sector a aportar $2,98 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990). Este sector económico ha venido registrando subidas hasta situarse en el 69,69%, alcanzando el volumen de $4,30 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018).

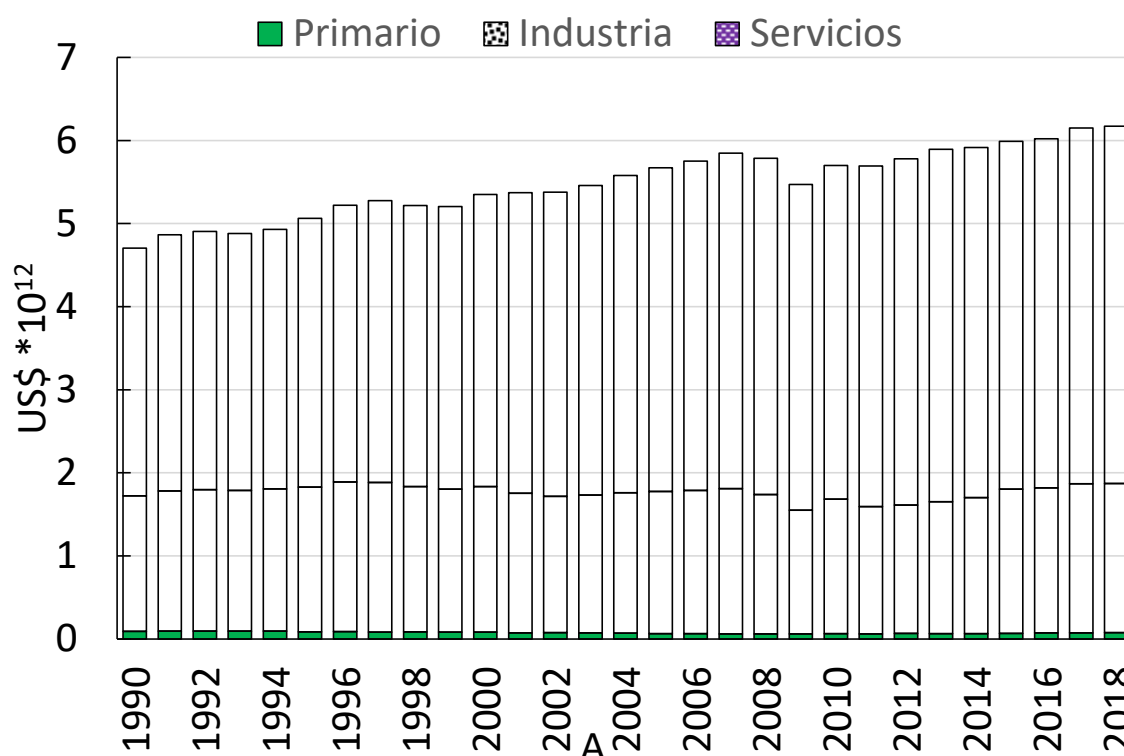


Figura 1.4.5: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en Japón. Fuente Banco Mundial [6].

La *Figura 1.4.5* muestra la evolución del PIB en cada uno de los sectores, pudiéndose apreciar, como en el resto de los países estudiados, la escasa aportación al PIB del sector primario que, con un aporte del 1,94% (1990), ha reducido su importancia hasta alcanzar

1. INTRODUCCIÓN

el 1,24% (2018). El sector industrial ha presentado estabilidad, aunque se ha registrado una tímida bajada en su aporte, de esta manera, se ha pasado de una contribución del 34,70% (1990), a reducir su participación hasta el 29,07% (2018).

1.4.2 Producto Interior Bruto en India

El caso la India puede compararse en cierta medida al de China, ambos estados poseen poblaciones similares e impulsaron sus economías después de realizar cambios políticos de apertura al liberalismo. El cambio que impulsó la economía china se produjo en 1970 con las reformas introducidas por Den Xiaoping y el de India se produjo 20 años después con las políticas impuestas por Rajiv Ghandi que introdujo el liberalismo como modo de cambiar el bajo ritmo de crecimiento económico del país.

La evolución de la historia reciente de la India está marcada por su independencia de Inglaterra el 15 de agosto de 1947. Pasado ese momento se han producido dos fases claramente diferenciadas, la primera, justamente anterior al periodo estudiado por este trabajo, discurre entre el momento de la independencia y el comienzo de la serie estudiada en 1990, pasado este momento se produce la etapa conocida como liberalización, que es la comprendida entre 1990 hasta la actualidad. Antes de la liberalización, el entramado industrial indio era económicamente y tecnológicamente débil [16]. Alcanzada la etapa de liberalización, La política india no solo cambió la estructura de la industria nacional, sino que también suavizó su política relativa a la inversión extranjera. De esta manera, las antiguos trabas impuestas a la inversión extranjera directa o indirecta fueron suprimidas. Otra de las medidas tomadas para liberalizar el mercado fue otorgar facultades al Banco Central para otorgar una aprobación automática para muchas industrias específicas. Esto aumentó competitividad entre las industrias y también impulsó el crecimiento [16].

El caso de India no es el único que ha experimentado una rápida evolución después de políticas de aperturas de mercados, países como Pakistán, Uganda y Vietnam, también han experimentado una subida en la eliminación de la pobreza, desarrollando un más rápido crecimiento económico, debido principalmente a la política de apertura impuesta en sus respectivas economías. Los países en desarrollo que bajan sus aranceles crecen más rápidamente que aquellos que no globalizan sus economías [17].

Durante el periodo de 1990 a 2015 el número de empresas y la inversión se acrecentaron cada año. Vale la pena notar que la inversión viene en forma de servicios, manufactura o energía. También se debe notar que la inversión extranjera ha sido irregular, registrándose caídas en la inversión exterior en diferentes años debido principalmente a riesgos derivados de la incertidumbre del mercado y de ataques terroristas registrados en el país [17].

Como se aprecia en la *Figura 1.4.6*, la evolución económica de India está marcada por el desarrollo de todos los sectores económicos, creciendo desde un PIB de $0,51 \cdot 10^{12}$ US\$ (1990) hasta alcanzar un volumen total de $2,82 \cdot 10^{12}$ US\$ (2018), lo que supone un aumento del 456,02% en los 28 años estudiados, lo que le confiere un ritmo de crecimiento medio anual para el periodo del 16,29%.

1. INTRODUCCIÓN

El caso del país es singular entre los estudiados por la capacidad del estado en crecer en el sector primario, avanzando en el estado indio numerosos proyectos de economía regional basados en el sector de la alimentación y de las empresas agrícolas [17]. En concreto el sector primario ha crecido desde aportar $0,14 * 10^{12}$ US\$ (1990), lo que le confería un 26,90% del PIB, a aportar al indicador $0,43 * 10^{12}$ US\$ (2018), suponiendo un 15,41% del PIB, dado el impulso registrado fundamentalmente por el sector servicios.

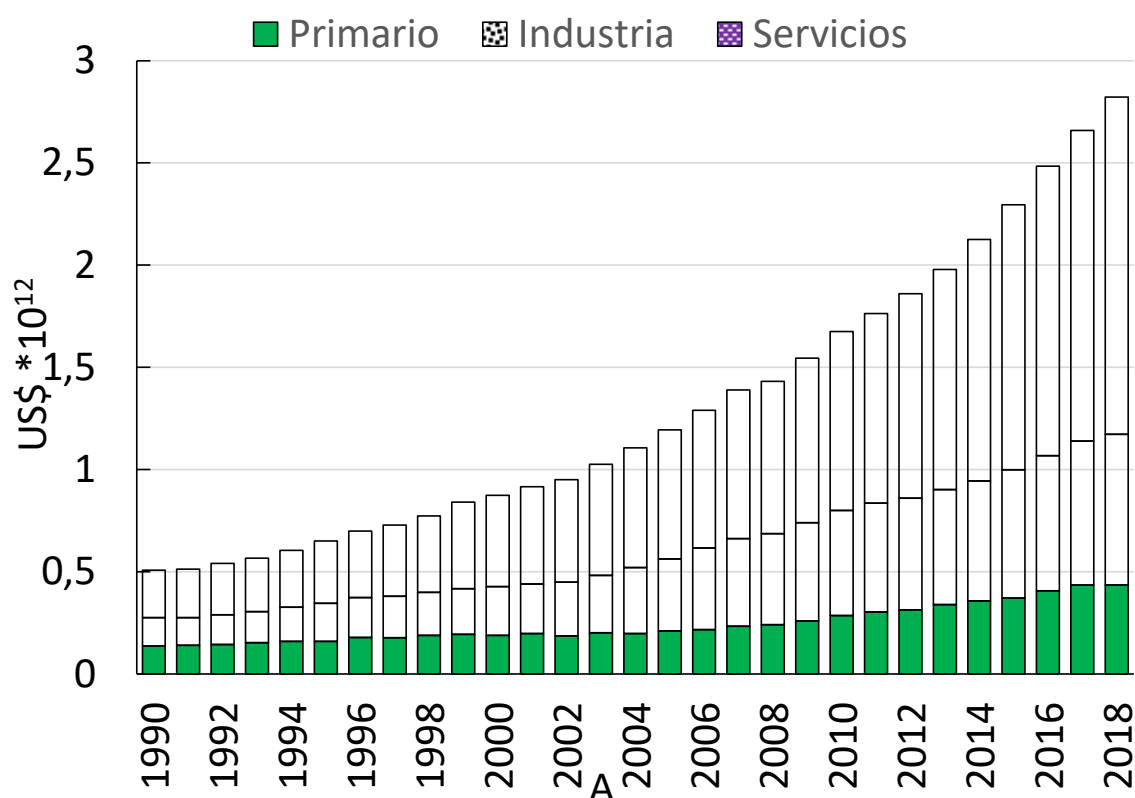


Figura 1.4.6: Evolución del PIB en los principales sectores económicos en India. Fuente Banco Mundial [6].

Muchas de las industrias del país han sido renovadas mediante el aporte de nuevas tecnologías que han venido al estado indio gracias a las políticas de apertura citadas, dichas políticas han posibilitado aumentar la fabricación disminuyendo la energía y recursos necesarios, lo que ha aumentado la eficiencia y el beneficio de las empresas [17]. Estas circunstancias han facilitado el aumento registrado por la industria, que parte con un aporte al PIB de $0,14 * 10^{12}$ US\$ (1990), lo que representaba un 27,45% del PIB, a alcanzar un aporte total de $0,74 * 10^{12}$ US\$ (2018). El porcentaje que la industria tiene en el total de

1.4.3 Producto Interior Bruto en India

India ha bajado en los últimos 12 años estudiados, registrando un máximo de representación del 30,92% (2006). Desde ese momento el empuje del sector servicios ha hecho que la representación de la industria caiga hasta el 26,13%.

El verdadero motor en el crecimiento de la economía india es el sector servicios, en el que cada vez más potenciales clientes adquieren la capacidad para adquirir bienes de servicio. De esta manera el citado sector ha aumentado participación desde el 45,65% (1990) hasta aportar el 58,47% (2018), lo que representa una cantidad de $1,65 \times 10^{12}$ US\$ (2018). Uno de los impulsores de este beneficio han sido las empresas eléctricas y las de telecomunicaciones [17].

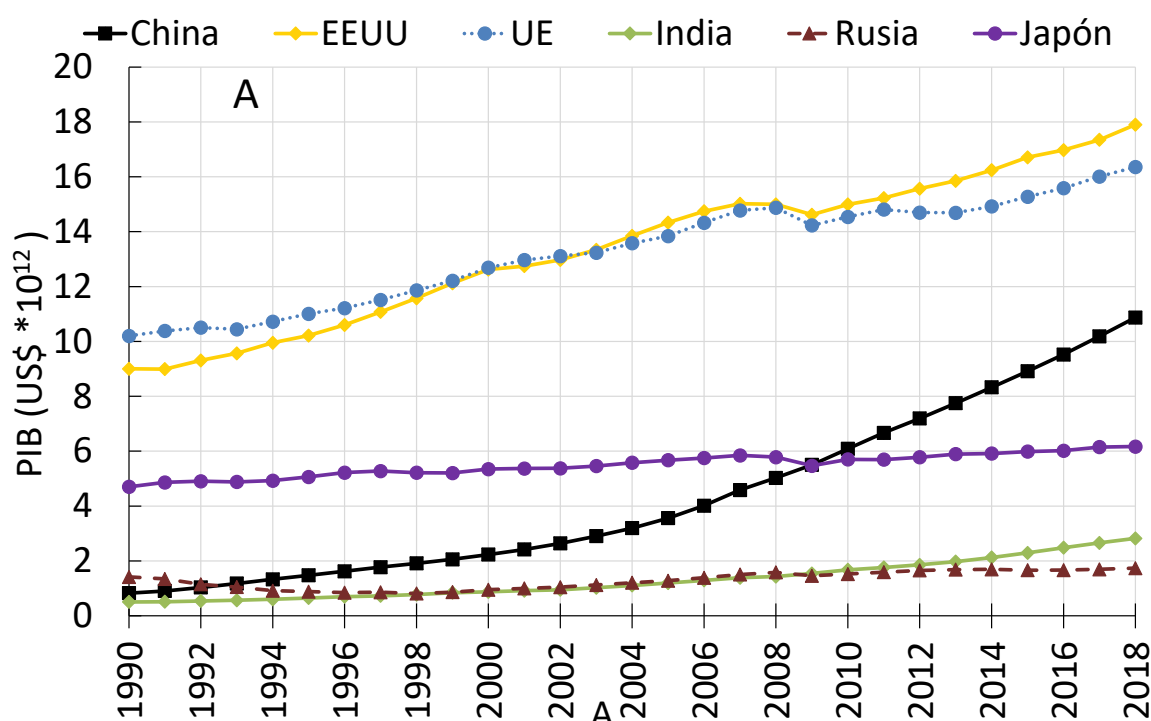


Figura 1.4.7: Evolución del PIB de las economías estudiadas. Fuente Banco Mundial [6].

La Figura 1.4.7 muestra la evolución conjunta del PIB en las economías a comparar por este estudio. En ella se muestra de una manera detallada la diferencia entre la magnitud total del PIB en los años estudiados. Uno de los aspectos a destacar es la menor pendiente de crecimiento de la economía europea con respecto a la americana, aunque registren cada una, la misma tendencia global, incluso teniendo una época entre los años 2000 a 2008, en la que los valores finales registrados por el indicador eran similares. Estas dos economías son las de mayor potencial económico de las estudiadas por este trabajo. La tercera en

1. INTRODUCCIÓN

importancia hasta 2009 había sido Japón, que sostiene una tendencia con mucha menor pendiente de crecimiento, lo que aleja a esta economía de la europea y americana. China registra unas tasas de crecimiento por encima del resto, lo que ha hecho despegar su economía. Esta sociedad partía por debajo de la rusa en el comienzo de la serie histórica, pero después de los procesos descritos con anterioridad supera a Rusia en 1992 y a Japón en 2009, continuando a un ritmo de crecimiento que la acerca a las primeras potencias económicas mundiales.

En cuanto a India, comienza una senda de crecimiento que la lleva a registrar mayor riqueza que Rusia para 2009, registrando una tendencia que la acerca a Japón. El ritmo de crecimiento anual en el PIB indio tiene un máximo del 8,84% (1999), registrando una tendencia ascendente que le lleva a subidas anuales por encima del 7% a lo largo del periodo comprendido entre los años 2003 a 2010. Desde 2009 el PIB indio no ha descendido del 5,24 % anual (2011), alcanzando un ritmo de crecimiento anual medio del 7,03 % en los últimos 10 años, muy superior al alcanzado por los países analizados como el caso de Japón, con un ritmo de crecimiento en los últimos 10 años del 0,68%, o el caso de Rusia con un 1,01%. Entre los países con mayores índices de riqueza, como EEUU y la UE, este indicador referido a la media en los últimos 10 años también es inferior al indio, dado que en Europa la tasa ha representado únicamente el 0,98% y en EEUU un 1,80%, debido a las épocas de recesión citadas con anterioridad.

China ha sido el estado entre los analizados con mayor índice de crecimiento del PIB en los diez últimos años, alcanzando una subida media en el PIB del 8,02%.

1.5 Distribución y cambios en la población

Como se verá en la metodología y dado el carácter antropogénico de las emisiones estudiadas por este trabajo, las variaciones en la población serán de suma importancia para comprender las variaciones producidas en las emisiones de CO₂. Esta razón confiere al estudio de las variaciones en la población, un apartado diferenciado en este trabajo, siendo de especial relevancia dado que se analizan sociedades con diferentes ritmos de crecimiento y distribución. Para ilustrar estos cambios, se muestra en la *Figura 1.5.1* la evolución en la población de los estados, diferenciando, por el desigual modo de vida, entre zonas rurales y urbanas.

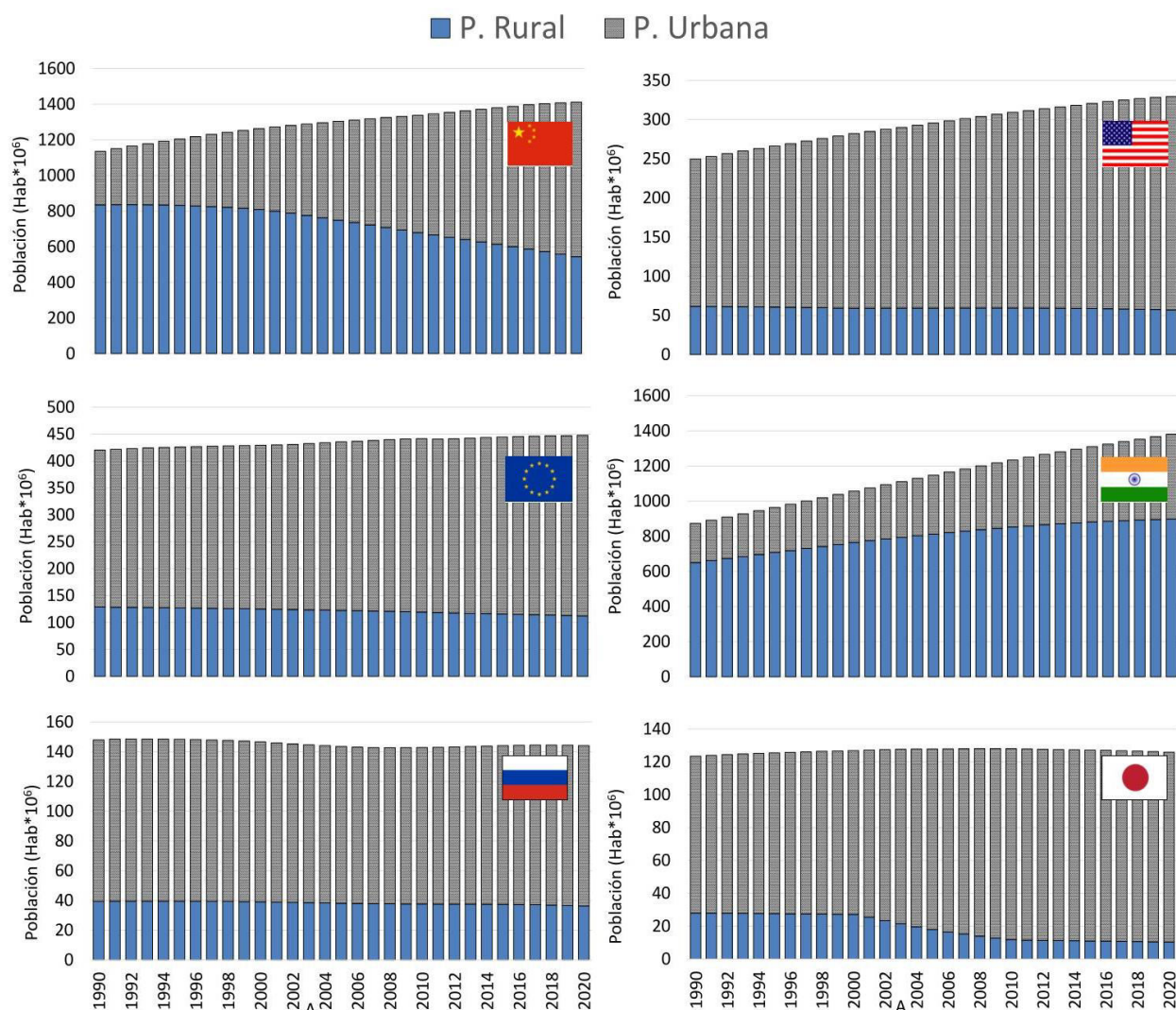


Figura 1.5.1: Evolución de la población urbana y rural en las 6 economías más emisoras de CO₂.
Fuente Banco Mundial [6].

1.5.1 Distribución y cambios en la población en las sociedades a comparar con India

CHINA

En el país asiático viven $1439 \cdot 10^{12}$ habitantes (2020), lo que supone el 18,21% de la población mundial. China ocupa una superficie de $9.706.961 \text{ Km}^2$, lo que le confiere en 2020 una densidad de población de 149 habitantes por km^2 . Para el citado año el crecido demográfico se situó en un 0,29 % [18]. Este incremento poblacional es inferior al registrado en años anteriores, dado que el país ha contenido el ritmo de crecimiento que su población experimentaba en la década de los 70, donde la población pasó de los $818,31 \cdot 10^{12}$ a los $981,23 \cdot 10^{12}$ hab. entre 1970 y 1980, lo que supone un ritmo de crecimiento del 1,99 % anual [5]. En los últimos 10 años del periodo estudiado (2018-2008), el ritmo de crecimiento medio ha sido del 0,58 %.

Como se aprecia en la *Figura 1.5.1*, la sociedad China ha variado en su distribución a lo largo de la serie estudiada, registrado una migración poblacional desde las áreas rurales a las grandes ciudades. En este periodo el país asiático ha visto una de las mayores migraciones humanas en la historia, representando un aumento de la población urbana desde los $191 \cdot 10^6$ (1980), a los $622 \cdot 10^6$ (2009). En este contexto se prevé $200 \cdot 10^6$ de migrantes del campo a la ciudad durante los próximos 10 años. En 2011, la proporción de la población de China clasificada como urbana alcanzó el 51%, superando así por primera vez a la proporción que vivía en zonas rurales [19]. La población urbana en China ha experimentado un gran incremento, pasando en las tres últimas décadas de 40 ciudades (1978) con poblaciones de más de 500 000 personas a 140 ciudades (2007). El crecimiento está siendo impulsado por diferentes elementos, destacando entre ellos las reformas económicas a finales de la década de 1970, que aumentó la disparidad entre los salarios de la población urbana y de la rural. Otro de los factores importantes es la búsqueda de empleo de la población rural excedente y la conversión de las tradicionales tierras de labranza para uso urbano [19].

Las principales ciudades en orden de población en 2022 son [18]:

- Shanghai 22.315.474 Habitantes.
- Beijing 11.716.620 Habitantes
- Tianjin 11.090.314 Habitantes
- Guangzhou 11.071.424 Habitantes

1.5.1 Distribución y cambios en la población en las sociedades a comparar con India.

La tasa de población activa para mayores de 15 años se situaba en torno al 73,02 y 85,0% (1990) para mujeres y hombres, respectivamente, para registrar una bajada hasta situarse en el 63,1 y 75,1% (2018) entre mujeres y hombres, respectivamente [5].

El país presentaba una esperanza media de vida al nacer de únicamente 45,2 y 42,4 años, respectivamente, para mujeres y hombres en 1960, este indicador que refleja el grado de desarrollo de una sociedad, atendiendo a la atención médica, y también a las condiciones de vida, ha subido gracias a la mejora en las condiciones hasta alcanzar los 71 y 67,4 años en 1990, para mujeres y hombres, respectivamente. A lo largo de la serie estudiada, este indicador ha subido alcanzando una esperanza media de 79 y 74,5 años (2018) para mujeres y hombres respectivamente [5].

EEUU

Estados Unidos posee de un área de 9.147.420 Km² y en ellos vivían alrededor de $331 \cdot 10^{12}$ hab. (2020), lo que le hace ser el tercer país del mundo en número de habitantes, por detrás de China y la India [5]. En los últimos años su población crece a un ritmo del 0,57%. El país dispone de enormes extensiones con muy baja densidad de población, sobre todo en los estados del centro del país y en zonas de Alaska, por lo que la densidad total de población media se fija únicamente en 37 habitantes por km² [18].

Revisando la *Figura 1.5.1* se puede apreciar que la población de Estados Unidos ha crecido principalmente en las zonas urbanas a lo largo del periodo estudiado. En concreto este crecimiento de la población en zonas urbanas se fija en el 44,9% a lo largo de toda la serie estudiada, comenzando con una población urbana de $188 \cdot 10^{12}$ hab. (1990), para alcanzar los $272 \cdot 10^{12}$ hab. (2020). La población rural ha experimentado un tímido retroceso, estando constituida por $61,7 \cdot 10^{12}$ hab. (1990), quedando limitada a $57,1 \cdot 10^{12}$ hab. (2020), lo que supone una reducción del 7,4% [5].

Revisando los 50 estados que componen el país, los más poblados corresponden a California y Texas, con $39,6$ y $29,7 \cdot 10^{12}$ hab. (2020) respectivamente, encontrándose los mayores índices de población a lo largo de las costas que bañan el país, siendo la densidad de población mucho menor en el interior.

La multiculturalidad es uno de los emblemas del país, que ha recibido y recibe un importante número de inmigrantes procedentes fundamentalmente de Asia y Latino

1. INTRODUCCIÓN

América, principalmente de México, China e India. La colonia China e India en EEUU contaban con 3,8 y 4,4* 10¹² hab. (2020), respectivamente [18].

Las principales ciudades en orden de población en 2022 son [18]:

- New York 8.175.133 Hab.
- Los Ángeles 3.971.883 Hab.
- Chicago 2.720.546 Hab.
- Brooklyn 2.300.664 Hab.

La tasa de población activa para mayores de 15 años se situaba en torno al 56,5 y 74,9% (1990) entre mujeres y hombres, respectivamente, para registrar una bajada hasta situarse en el 56,6 y 67,9% entre mujeres y hombres, respectivamente [5].

Analizando los datos de esperanza de vida como indicador del grado de desarrollo y de condiciones higiénico sanitarias del país, EEUU presentaba una media de vida al nacer de 73,1 y 66,6 años, respectivamente, para mujeres y hombres en 1960. Estos valores han subido paulatinamente hasta alcanzar los 78,8 y 71,8 años en 1990. A lo largo de la serie estudiada, este indicador ha subido instalándose en una de las mayores entre los estados analizados, presentando una esperanza media de vida de 81,2 y 76,2 años (2018) para mujeres y hombres, respectivamente [5].

UE

La Unión Europea estudiada por este trabajo incluye aún al Reino Unido entre sus estados miembros, lo que eleva sustancialmente la población de la Unión, reducida en casi un 10% tras la salida del citado país. Para la serie temporal estudiada, el área de la Unión se cifraba 4.479.968 km² y en ellos vivían alrededor de 447,8* 10¹² hab. (2018), lo que la sitúa como el tercer estado según la población de las estudiadas por este trabajo. La densidad de población, a diferencia de la americana con muchas zonas despobladas, es alta, con 109 hab. por km² [18].

En el último año estudiado su población creció a un ritmo de 0,16% [5]. Revisando la *Figura 1.5.1* se puede apreciar que la población de Europa se ha mantenido estable a lo largo del periodo estudiado. En concreto se ha registrado un leve crecimiento de su población en zonas urbanas, situándose con un porcentaje del 15,1% a lo largo de toda la serie estudiada, comenzando con una población urbana de 291,7* 10¹² hab. (1990), para alcanzar los

1.5.1 Distribución y cambios en la población en las sociedades a comparar con India.

335,7* 10¹² hab. (2020). La población rural ha experimentado un tímido retroceso, estando constituida por 128,8* 10¹² hab. (1990), bajando a 112,1* 10¹² hab. (2020), lo que supone una reducción del 12,9%.

Las principales ciudades en orden de población en 2022 son [18]:

- Londres 8.961.989 Hab.
- Atenas 3.812.330 Hab.
- Berlín 3.426.354 Hab.
- Madrid 3.334.730 Hab.
- Roma 2.778.662 Hab.

La tasa de población activa para mayores de 15 años se situaba en torno al 45,3 y 68,6% (1990) entre mujeres y hombres respectivamente, para evolucionar hasta situarse en el 51,2 y 63,9% (2018) entre mujeres y hombres respectivamente, lo que marca una notable incorporación al mundo laboral de las mujeres en la Unión, que se han incorporado al mundo laboral, pese a la reducción de empleos producida por las crisis financieras comentadas en secciones anteriores [5].

Los datos de esperanza de vida de la Unión son los más altos de su entorno. Así pues, la Unión presentaba una media de vida al nacer de 71,7 y 66,5 años, respectivamente, para mujeres y hombres en 1960. Estos valores que nos aportan información del grado de desarrollo de una sociedad, atendiendo a la atención médica, y también a las condiciones de vida, ha subido paulatinamente hasta alcanzar los 78,4 y 71,2 años en 1990. A lo largo de la serie estudiada, este indicador ha continuado al alza posibilitando una esperanza de vida media de 83,9 y 78,3 años (2018) para mujeres y hombres, respectivamente [5].

RUSIA

En los 16.376.870 Km² de la Federación Rusa vivía un 1,87% (2020) de la población mundial. El país contaba con una población cifrada en 145,8* 10¹² hab. (2020), lo que le hacía ser el noveno país del mundo por número de habitantes. En los últimos años su población crece a un ritmo de 0,04%, pero a lo largo de la serie estudiada el estado ha registrado bajadas en su demografía. El país dispone de enormes extensiones con muy baja densidad de población, por lo que la densidad total de población se fija en 9 habitantes por km² [18].

1. INTRODUCCIÓN

Revisando la *Figura 1.5.1* se puede apreciar que la población de Rusia se ha visto reducida a lo largo del periodo estudiado. En concreto, se fija el grado de disminución de la población en zonas urbanas en el 0,8% a lo largo de toda la serie estudiada, comenzando con una población urbana de $108,6 \cdot 10^{12}$ hab. (1990), para alcanzar los $107,7 \cdot 10^{12}$ hab. (2020). La población rural ha experimentado igualmente un retroceso, siendo este caso más acentuado que el citado con anterioridad, estando constituida por $39,4 \cdot 10^{12}$ hab. (1990), quedando limitada a $36,4 \cdot 10^{12}$ hab. (2020), lo que supone una reducción del 7,6%. La Federación Rusa es uno de los estados con menor tasa de fertilidad, representando ésta únicamente 1,58 nacimientos por mujer (2020). Este factor resulta determinante si se le une la baja tasa de inmigración que el país registra, impidiendo de esta manera un crecimiento de la población de la Federación Rusa [18].

Las principales ciudades en orden de población en 2022 son [18]:

- | | |
|-------------------|-----------------|
| - Moscú | 10.381.222 Hab. |
| - San Petersburgo | 5.028.000 Hab. |
| - Novosibirsk | 1.419.007 Hab. |
| - Yekaterimburgo | 1.349.772 Hab. |

Moscú, la capital del estado, es a su vez la ciudad en el puesto 11 en cuanto a población en el mundo, siendo las áreas de San Petersburgo y Moscú las zonas más densamente pobladas del país. Es destacable que, pese a la baja densidad demográfica del país, la densidad en las citadas áreas se sitúa por encima de cualquier zona de la Unión Europea [18].

La tasa de población activa se situaba en torno al 57,8 y 74,9% (1990), respectivamente entre mujeres y hombres, para evolucionar hasta situarse en el 55,31 y 70,5% (2018), lo que ha supuesto una reducción de similar magnitud entre hombres y mujeres [5].

Analizando los datos de esperanza de vida, el país presentaba una media de vida al nacer de 70,2 y 62,1 años, respectivamente, para mujeres y hombres en 1960. Estos valores han subido paulatinamente hasta alcanzar los 74,3 y 63,7 años en 1990. A lo largo de la serie estudiada, este indicador ha subido aportando una esperanza media de 77,8 y 67,7 años (2018) para mujeres y hombres, respectivamente [5].

1.5.1 Distribución y cambios en la población en las sociedades a comparar con India.

JAPÓN

El país asiático cuenta con un área de 364.555 km², situándose su población en 125,6* 10¹² hab. (2022), lo que le hace ser el décimo primer país del mundo en número de habitantes. En los últimos años su población decrece a un ritmo de 0,3%. El país dado su área y población, presenta uno elevados niveles de densidad de población, alcanzando esta un nivel de 344 habitantes por km² [18]. Revisando la *Figura 1.5.1* se puede apreciar que la población rural de Japón ha decrecido principalmente a partir del año 2000. En concreto este decrecimiento de la población en zonas rurales alcanza el 63,0% a lo largo de toda la serie estudiada, comenzando con una población rural de 27,9* 10¹² hab. (1990), para verse reducida hasta los 10,3* 10¹² hab. (2020). Esta bajada de población en zonas rurales ha posibilitado un aumento en las zonas urbanas, experimentado un incremento en los niveles de población. Estos niveles alcanzaban los 95,5* 10¹² hab. (1990), para incrementarse hasta alcanzar 115,5* 10¹² hab. (2020), lo que supone una subida del 20,9% [5].

Las principales ciudades en orden de población en 2022 son [18]:

- Tokyo 8.336.599 Hab.
- Yokohama 3.574.443 Hab.
- Osaka 2.592.413 Hab.
- Nagoya 2.191.279 Hab.

La tasa de población activa se situaba en torno al 50,1 y 77,2% (1990) para mujeres y hombres respectivamente, para evolucionar hasta situarse en el 53,3 y 71,4% (2018) para mujeres y hombres, marcando una gran diferencia entre sexos en el país asiático.

Japón presenta una esperanza de vida muy alta. Así pues, el país presentaba una media de vida al nacer de 70,1 y 65,3 años respectivamente para mujeres y hombres en 1960. Estos valores han subido hasta alcanzar los 81,9 y 75,9 años en 1990. A lo largo de la serie estudiada, este indicador ha subido alcanzando la mayor esperanza de vida de las sociedades estudiadas por este trabajo, llegando a una media de 87,3 y 81,2 años (2018) para mujeres y hombres, respectivamente [5].

1.5.2 Distribución y cambios en la población en India

El país asiático cuenta con un área de 2.973.190 km², situándose su población en 1403×10^{12} hab. (2022), lo que lo hace ser el segundo país del mundo en número de habitantes. En los últimos años su población crece a un ritmo de 1%. El país dispone, dados su elevado índice de población y superficie, de muy alta densidad de población, por lo que este indicador refleja una media en el país de 473 habitantes por km² [18]. Es representativo indicar que en India nacen 65.719 personas de media al día, y que 1 de cada 6 personas en el planeta vive en India. Entre los años 2001 y 2011, la población del país creció un 17,7%. Esta subida representó un aumento de su población de $181,5 \times 10^{12}$ hab. solo en el transcurso de los citados años. El país ha duplicado su tamaño poblacional en solo 40 años y se espera que ocupe el puesto de país más poblado, desplazando a China en los próximos veinte años. Esto niveles de masificación alcanzan su máximo en Bombay, donde se vive bajo una densidad de población es de 21×10^3 habitantes por km² [18].

Revisando la *Figura 1.5.1* se puede observar que se ha experimentado un aumento tanto en la población rural como en la urbana a lo largo del periodo estudiado. En concreto este crecimiento de la población en zonas urbanas se fija en el 116,0% a lo largo de toda la serie estudiada, comenzando con una población urbana de 223×10^{12} hab. (1990), para alcanzar los $481,9 \times 10^{12}$ hab. (2020), este hecho ha posibilitado que en la actualidad el país cuente con cincuenta ciudades con poblaciones por encima del millón de personas. La población rural, más numerosa en el país, crece de una manera más pausada, experimentado un aumento que le ha llevado desde los $650,1 \times 10^{12}$ hab. (1990), hasta alcanzar los $898,0 \times 10^{12}$ hab. (2020), lo que supone un aumento del 38,1%.

Las principales ciudades en orden de población en 2022 son [18]:

- Bombay 12.691.836 Hab.
- Delhi 11.034.555 Hab.
- Bangalore 5.104.047 Hab.
- Calcuta 4.631.392 Hab.

Delhi es la segunda ciudad de la India en cuanto a población se refiere, experimentando un crecimiento por encima del de Bombay. Por esta razón, los modelos predicen que se convertirá en la ciudad más poblada de India en 10 años. La ciudad cuenta con graves problemas de hacinamiento y abastecimiento, dado que alrededor del 50% de los habitantes de Delhi viven en suburbios, siendo la tasa de pobreza de la ciudad completa

1.5.1 Distribución y cambios en la población en India.

cuatro veces la de la media de India. En el interior de Delhi se estableció la capital de la nación, Nueva Delhi. Esta ciudad capital tiene una población de 249.998 personas [18].

La tasa de población activa por encima de los 15 años se situaba en torno al 30,4 y 84,2% (1990) entre mujeres y hombres, respectivamente, para registrar una bajada hasta situarse en el 21,2 y 73,2% (2018), indicando una profunda brecha entre hombres y mujeres [5].

A nivel educativo, el país contaba con un nivel de perseverancia en la educación primaria en varones únicamente del 42,1% (1973), subiendo esta tasa hasta alcanzar el 86,0% (2018). Si contrastamos este indicador con el femenino, podremos volver a encontrar desigualdades entre sexos, porque la perseverancia para mujeres estaba en el 32,6% (1973), subiendo hasta superar a la de los chicos con un 87% (2018). Es destacable que la tasa de alfabetización del país alcanzase únicamente el 48,2% (1991), subiendo a lo largo del periodo temporal estudiado hasta el 74,4% (2018) [5].

El país presentaba una esperanza media de vida al nacer de únicamente 40,2 y 42,3 años respectivamente para mujeres y hombres en 1960. Curiosamente India es la única entre las sociedades estudiadas con una esperanza de vida menor en mujeres que en hombres. Este indicador refleja el bajo grado de desarrollo de la sociedad india por entonces, pese a haber sido una colonia de un estado desarrollado desde 1858 a 1947. Las mejoras en las condiciones socio sanitarias permitieron al estado indio alcanzar una esperanza media de 58,2 y 57,5 años en 1990, para mujeres y hombres, respectivamente. A lo largo de la serie estudiada la mejora en las condiciones de vida han posibilitado un espectacular incremento en este indicador, subiendo hasta presentar una esperanza media de 70,7 y 68,2 años (2018) para mujeres y hombres, respectivamente [5].

1.6 Revisión de la Bibliografía

La bibliografía que relaciona las emisiones de GEI, destacando especialmente el CO₂, y la economía para India y los países considerados como referencias en este trabajo es extensa; por tanto, este apartado se centrará únicamente en aquellos trabajos que consideren un conjunto de países como el tratado en este estudio, utilizando además la identidad Kaya (ver sección 3.1 *La identidad Kaya*), unida a cualquier tipo de técnica de descomposición, principalmente el método empleado por este trabajo, el LMDI (ver sección 3.2 *Metodología LMDI*). Además, en la presente revisión también se considerarán aquellos trabajos en los que se ha realizado un análisis de causalidad de Granger (ver sección 3.3 *Análisis mediante la causalidad de Granger usando el test de Toda-Yamamoto*) entre las diferentes magnitudes estudiadas que modelan el comportamiento de las emisiones de CO₂ o de la energía.

En lo referente a las emisiones de CO₂, no puede dejar de mencionarse el trabajo del japonés Kaya quien formuló la “identidad Kaya” [20]. Identidad que ha sido el punto de partida para muchos trabajos posteriores, incluyendo la tesis doctoral de Robalino [21], que sirve de punto de inicio para este trabajo.

Siguiendo la metodología propuesta por Kaya, pueden identificarse tres enfoques o líneas de estudio diferentes a la hora de sistematizar esta área de estudio, aunque en muchos trabajos se presentan agrupadas. En primer lugar, deben mencionarse los trabajos que han estudiado la relación entre PIB-consumo de energía, consumo de energía-emisiones de CO₂, PIB-emisiones de CO₂ o las tres: PIB-consumo de energía-emisiones de CO₂, incluyendo las relaciones de causalidad. En segundo lugar, están los autores que se han concentrado en el análisis del cumplimiento o no de la hipótesis de Kuznets medioambiental de evolución de los contaminantes ambientales mencionada anteriormente, o de otros aspectos relacionados con la misma, tanto para países desarrollados como menos desarrollados, llegando en ocasiones a conclusiones contradictorias.

Por último, mucho más recientemente, otros autores aplican la metodología de “Análisis de Escenarios” para hacer predicciones sobre la evolución de las emisiones de CO₂ en periodos futuros, basándose en datos históricos previos. Grossman y Krueger [22], fueron los primeros en proponer e intentar probar la hipótesis ambiental de Kuznets inspirada en la curva de Kuznets original. Su estudio fue confirmado por Shafik y Bandyopadhyai [23]. Más adelante, Stern [24] y Dinda [25] presentaron una detallada revisión de la literatura, pero Johansson y Krström [26] concluyen que son necesarias más evidencias empíricas para confirmar o no la hipótesis ambiental de Kuznets.

Padilla y Serrano [27] estudiaron las diferencias en cuanto a emisiones de CO₂ de una amplia muestra de países y su relación con el PIB per cápita para el período 1971-1999,

concluyendo que las diferencias en las emisiones de CO₂ se explican principalmente por la diferencia en sus PIB per cápita. De modo semejante, Soytaş y Sari [28] hallaron cambios en el crecimiento económico a partir de cambios en el consumo de energía para los países del G-7; Altınay y Karagöl [29] para Turquía y Ghosh [30] para India.

Anteriormente, Robalino-López et al. [21], [31], [32], desarrollaron un modelo matemático de las emisiones de CO₂ en Dinámica de Sistemas, en Ecuador y más tarde a Venezuela, para el periodo 1980 – 2025 y bajo cuatro escenarios diferentes, encontrando que la principal causa de variaciones en la evolución de las emisiones de CO₂ en esos dos países procedía del crecimiento en el PIB.

Para el caso del modelo económico, este estudio se apoya en los trabajos realizados por Chien Taichen y Hu Jin-Li [33], que en 2013 publicaron un trabajo que estudiaba 116 economías en el año 2003, empleando para ello un enfoque basado en el modelado estructural de ecuaciones (SEM). En este trabajo se descompone el PIB empleando para ello el criterio del “enfoque del gasto”, aportando como indicador las energías renovables en la formación de capital y la balanza comercial, lo que aporta como resultado una contribución positiva de las renovables en la formación de capital.

La relación entre el crecimiento económico, el uso de energía y las emisiones de CO₂ en India no ha sido estudiada extensamente en la bibliografía, dado que las publicaciones se concentran en su mayoría en los últimos diez años. En particular, la conexión entre economía y emisiones de CO₂ ha sido estudiada en algunas publicaciones, haciéndolo para un conjunto de países, entre los que se encontraba India. En [34] se estudiaron 33 países durante el período entre 1995 y 2007, concluyendo que el principal impacto en el crecimiento de emisiones de CO₂ provinieron del crecimiento económico, mientras que las mejoras en la eficiencia de la energía generan las mayores reducciones. Sin embargo, el análisis para la India se restringió al período 2004-2008. En [35], los autores analizan en profundidad el acoplamiento entre economía y emisiones de CO₂ en los países BRIC, a saber, Brasil, Rusia, India y China, durante el período comprendido entre 1995 y 2014. Una vez más, se observó cómo la energía jugó un papel importante en la moderación del aumento de las emisiones de CO₂. En el caso de la India, el mix energético y los efectos de la energía fósil también contribuyeron a la reducción de emisiones, pero ni durante todo el período ni para todos los países.

El método *Logarithmic Mean Divisia Index* (LMDI) es otro de los pilares de este trabajo. Este método apareció a finales de la década de 1970 y se enmarca en el Análisis de Descomposición de Índices (IDA), siendo una herramienta analítica adaptada originalmente para estudios de energía. Sin embargo, desde entonces, se ha extendido a muchas otras áreas, incluidos los estudios de emisiones de CO₂, la gestión ambiental y el uso sostenible de los recursos naturales. El LMDI se basa en la suma de cambios relativos que se pondera de manera adecuada y que utiliza el concepto de índice Divisia introducido en la década de

1. INTRODUCCIÓN

1920 por F. Divisia. Por otro lado, se introdujo por primera vez la función de peso medio logarítmico por Ang [36], generando la primera familia de métodos de descomposición mediante LMDI. En ese trabajo, me centraré en la descomposición de las intensidades de emisión de energía y gases agregadas para la industria. El uso de LMDI ha tenido un rápido crecimiento, en particular gracias a los trabajos de Ang et al [37] donde se definieron LMDI-I y LMDI-II y para Ang [38] que proporciona una guía práctica de LMDI para principiantes, que ayuda a la elección del método más apropiado para cada aplicación. Hace unos años, una revisión actualizada sobre el uso de LMDI fue publicada por Ang (2015) donde el autor analiza 554 artículos publicados hasta 2014 que usan LMDI como una herramienta analítica, lo que demuestra el grado de implantación que el método ha alcanzado.

En [39], una descomposición LMDI de 10 economías desarrolladas y 3 emergentes, India entre ellas, se realizó para el período comprendido entre 1971 y 2005. Una conclusión interesante es que el principal impulsor para mitigar el aumento de emisiones de CO₂ es la evolución de la intensidad energética en el sector manufacturero. Por otro lado, la transición a un sector de servicios tuvo un pequeño impacto en la disminución del valor de la intensidad energética en 7 de los países desarrollados analizados. En el caso de la India el efecto tecnológico en la fabricación y el uso de combustibles más eficientes son los responsables de la reducción de intensidad energética. Otra descomposición mediante LMDI se empleó en [40], aquí los autores analizaron el efecto de la población y la tecnología sobre el consumo de energía en China e India en el periodo de 2000 a 2012, encontrando que el aumento del uso de la energía en India, debido a su evolución, no ha representado una subida significativa en el ingreso económico individual medio de los habitantes indios, situación completamente diferente a la presentada en China, donde se aprecian subidas en los ingresos medios. Este estudio encontró además que aún no se ha producido en India una fuerte tendencia de disminución de la intensidad energética. En [41], se estudiaron diferentes países en desarrollo y escenarios durante el período comprendido entre 1971 y 2008 concluyendo que los esfuerzos de mitigación deben ser mayores de lo esperado para cumplir con los requisitos de reducciones. En [42], tres economías emergentes, Brasil, China e India, y tres desarrolladas, Portugal, España y Reino Unido, fueron estudiadas durante el período comprendido entre 1971 y 2008. Se observó cómo en los países en desarrollo el aumento del consumo de energía es un factor común, mientras que en los desarrollados la tendencia es justo la opuesta. Solo la mejora de la eficiencia energética puede compensar el aumento de consumo de energía en los países en desarrollo, inducido por un rápido crecimiento. Solaymani [43], quien estudió las emisiones de CO₂ provenientes del sector transporte en Brasil, Canadá, China, India, Japón, Rusia y Estados Unidos durante el período comprendido entre 1990 y 2015, concluyó que en el caso de India las emisiones aumentaron rápidamente, siendo India el tercer mayor contribuyente debido principalmente a vehículos diésel. En [44], se estudian 40 países diferentes, analizando el desarrollo durante el período comprendido entre 1995 y 2007. Se observa en

el caso de la India cómo la mejora en la intensidad energética es en su mayoría a través del cambio tecnológico.

Dong et al. [45] realizaron una descomposición LMDI para 133 países con diferentes niveles de ingresos, incluyendo los países objeto de estudio de esta tesis con la excepción de Rusia y cinco países de la UE. Este estudio fue realizado para el periodo 1980-2015, con proyecciones hasta el 2030, concluyendo que la intensidad energética produce la reducción más significativa de las emisiones, mientras que el aumento del PIB produce el aumento más considerable de las emisiones de CO₂. En [46], los autores estudiaron la influencia del consumo de energía, el crecimiento de la economía y el desarrollo financiero sobre las emisiones de carbono en un grupo de 122 países. Los autores utilizaron procedimientos de cointegración y estimación, encontrando que existía cointegración entre las variables. Una de las conclusiones de mayor importancia para los países de altos ingresos, es la relación entre el crecimiento económico y el desarrollo financiero con la mitigación de las emisiones de CO₂. Esta correlación no se experimentaba en aquellos países con bajos o medianos ingresos, dado que índices positivos en crecimiento económico y desarrollo financiero estaban asociados al incremento de emisiones de GEI.

Kizito Uyi Ehigiamusoe et al. [47], centraron su trabajo en el análisis del papel del consumo de energía, los ingresos y su relación con las emisiones de CO₂ en un abanico de países con ingresos medios, analizando la dependencia. Estos autores no encontraron evidencias de la influencia del consumo de energía en la moderación de la relación entre ingresos y emisiones de CO₂ entre los países.

En M. González-Torres et al. [48], los autores propusieron un enfoque piramidal entre países para analizar y descomponer la intensidad energética considerando el método de descomposición LMDI y centrándose en China, EEUU., la Unión Europea, India, Rusia y Japón durante el periodo 1995-2017. Este estudio concluye que las economías emergentes habían empeorado su eficiencia energética a medida que aumentaban sus ingresos. Sofia Teives et al. [49] encontraron los factores que motivaban las emisiones de CO₂ a largo plazo durante el período 1980-2011 para nueve países de la UE-28, Estados Unidos y Japón. En el citado estudio se demuestra el crecimiento económico como principal factor en la creación de emisiones contaminantes, mientras que el cambio tecnológico se destaca como el principal factor para la compensación de emisiones a largo plazo, particularmente durante las últimas décadas. En [50], se profundiza en los factores que intervienen en las emisiones de CO₂ de 57 países de la “Franja Económica de la Ruta de la Seda”, incluida China, India, Rusia y 12 países de la UE. En este trabajo se analizan un periodo temporal que va desde 1991 hasta 2016. Igualmente, se analizan cinco indicadores que están detrás de las emisiones de CO₂, identificados mediante un modelo Kaya-LMDI.

Inglesi-Lotz [51] demostró a lo largo del período 1990-2014 que la desaceleración de las emisiones de CO₂ está fuertemente relacionada con mejoras llevadas a cabo sobre la

1. INTRODUCCIÓN

intensidad energética y la intensidad de carbono en todos los países BRICS, a saber, Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica.

En Shuping et al. [52], los autores analizaron la conexión entre emisiones de CO₂ y desarrollo económico en diferentes países en desarrollo, incluida China e India, durante el período 2001-2017. Llegaron a la conclusión de que el desarrollo económico y la población aumenta rápidamente el consumo de energía, aunque la intensidad energética disminuye, con el carbón y el petróleo como principales obstáculos en el camino de la transición energética de China e India.

Marcucci y Fragkos [53], desarrollaron en su trabajo un análisis de descomposición multimodal de las emisiones de CO₂ para China, India, la UE y los EE. UU. bajo diferentes escenarios durante el período 2000-2100. Los autores identificaron los supuestos y las características del modelo que conducen a diferentes resultados de descomposición en escenarios de política climática moderados y estrictos. En [54], los autores analizan en profundidad el acoplamiento entre economía y emisiones de CO₂ en los países del BRIC durante el período 1995-2014, encontrando como otros trabajos revisados en este documento, que la intensidad energética puede frenar el aumento en emisiones de CO₂. El mix energético y los efectos de la energía fósil también contribuyen a la reducción de las emisiones, pero observan que este último factor no se refleja para toda la serie temporal de su estudio ni es regular en todos los países.

Mehdi Ben Jebli and Montassar Kahia. [55] dedican su estudio a las relaciones causales entre las emisiones de CO₂, el crecimiento económico, la generación de energía y el servicio de valor agregado para 65 países. El estudio se centró en el período que va desde 1980-2014 utilizando el modelo vectorial autorregresivo, la casualidad de Granger y pruebas de Toda-Yamamoto. Sus resultados más concluyentes apuntan hacia una fuerte causalidad bidireccional entre las emisiones de CO₂ y las energías no renovables, emisiones de CO₂ y la generación de valor agregado, y entre energía no renovable y servicios de valor agregados. En [56], los autores utilizan la prueba de causalidad de Toda-Yamamoto, incluyendo una aproximación de Fourier, para investigar las causas de Granger entre el desarrollo financiero, el consumo de energía y el crecimiento económico en 21 mercados emergentes. Encontraron que el análisis de causalidad con los cambios estructurales proporciona un vínculo causal en la mitad de los casos. Estos resultados apoyan que la actividad económica causa principalmente desarrollo y consumo de energía en las economías emergentes de rápido crecimiento de la muestra.

Kablamaci Baris [57] analiza, aplicando un análisis de causalidad de Granger, a 91 países con bajo desarrollo durante el período 1970-2013, concluyendo que el consumo de energía provoca el crecimiento económico en doce países. Pata y Aydin [58] estudiaron la relación entre la energía hidroeléctrica, el consumo de energía, la huella ecológica y el crecimiento económico de los seis principales países consumidores de energía hidroeléctrica, a saber,

Brasil, China, Canadá, India, Noruega y Estados Unidos. Utilizaron la prueba de causalidad de Fourier Toda-Yamamoto, lo que sugiere una relación de causalidad unidireccional que apunta desde el consumo de energía hidroeléctrica y el crecimiento económico en Brasil y bidireccional entre estas dos variables en China. En [59], los autores realizaron un análisis de causalidad de Granger en el G-8 y países del sudeste asiático desde 1970 hasta 2010, concluyendo que el consumo de energía provoca la producción industrial.

Sankaran et al. [60] utilizan la metodología de Toda-Yamamoto para estudiar la causalidad entre consumo de electricidad, el ingreso per cápita, tipo de cambio real, importación y exportación de producción manufacturera, desde 1980 hasta 2016, para diez naciones recientemente industrializadas, incluida India. Sus resultados apoyan la existencia de crecimiento, conservación, retroalimentación e hipótesis de neutralidad para diferentes naciones. En [61], los autores realizaron un estudio sobre los efectos de la inversión extranjera directa y la apertura comercial en el consumo de energía limpia para los países BRICS durante el período 1985-2017. Los autores aplicaron el enfoque de Fourier Toda-Yamamoto para analizar la causalidad de Granger. Estos autores encontraron que la inversión extranjera provoca consumo de energía libre de emisiones de GEI en China. En [62], los autores estudian la causalidad de Granger utilizando la prueba de Toda-Yamamoto para el consumo de energía, el crecimiento económico, la formación de empleo y la generación de capital fijo en varios países altamente desarrollados de la OCDE. Encontrando una relación causal bidireccional entre el consumo de energía y el PIB en Italia, Nueva Zelanda, Noruega y España.

Después de haber recopilado la bibliografía más actualizada sobre el análisis de las emisiones de CO₂ En cuanto a los seis principales emisores, se han identificado algunas lagunas en la bibliografía existente, a saber:

- Para realizar el análisis en un período de tiempo más extenso y común, para obtener información del impacto de los diferentes factores que impulsan la emisión de CO₂ a lo largo del tiempo, en el grupo de los países más contaminantes.
- Esclarecer el efecto del tamaño de los sectores económicos sobre la cantidad de emisiones de CO₂.
- Proporcionar una visión más clara de la evolución de las fuerzas motrices del CO₂ a lo largo del tiempo, proporcionando los valores de los indicadores analizados mediante la aplicación de la metodología LMDI con respecto a un solo año de referencia, en lugar de presentar el cambio relativo año tras año.
- Estudiar la relación causal de Granger entre las fuerzas motrices de las emisiones de CO₂. Por lo tanto, este trabajo contribuiría a la literatura existente sobre la relación entre las fuerzas impulsoras de las emisiones de carbono para los seis mayores emisores del mundo, según el enfoque Kaya-LMDI y el estudio de causalidad de Granger, utilizando la prueba

1. INTRODUCCIÓN

Toda-Yamamoto. Este estudio global apenas aparece en la literatura y proporcionaría indicadores clave para diseñar futuras políticas de mitigación.

CAPÍTULO 2

2. ENERGÍA.....	48
2.1 La demanda energética en los 6 países con mayor emisión de GEI	48
2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India.....	51
2.1.2 Tendencia energética en India	61
2.2 Fuentes que cubren la demanda energética.....	63
2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón.....	63
2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo.....	80
2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural	100
2.2.4 Energía eólica y solar	112
2.2.5 Bioenergía.....	118
2.2.6 Energía Hidroeléctrica	123
2.2.7 Energía Atómica	128
2.3 Tendencias registradas en el empleo de combustibles	131
2.3.1 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en los países a comparar con India.....	132
2.3.2 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en India ...	143
2.4 Integración de las energías libres de emisiones de GEI	147
2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI	148
2.4.2 Integración de las energías libres de emisiones de GEI	161

*"A lo largo del espacio hay energía. ... es una
mera cuestión de tiempo hasta que los hombres
tengan éxito en sus mecanismos vinculados al
aprovechamiento de esa energía."
Nikola Tesla*

CAPÍTULO

2

2. ENERGÍA

2.1 La demanda energética en los 6 países con mayor emisión de GEI

Los países estudiados por este trabajo han ido cambiando sus fuentes de energía para cubrir las necesidades de sus respectivas sociedades. En esta búsqueda del aporte de energía necesaria, cada estado ha estado influenciado por diversos factores, entre las que se pueden destacar entre otros, la climatología, aumento de la población, urbanización y modernización. Dado el crecimiento a nivel mundial que se prevé, la demanda de energía aumentará considerablemente en los próximos años. Las economías estudiadas dependen en gran medida de combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades energéticas. Estos combustibles, entre los que destacan el petróleo, el gas y el carbón proporcionaban en 2005 casi el 80% de la demanda mundial de energía [63]. Por otra parte, las energías con tecnologías libres emisión de GEI, entre las que destacan las fuentes energéticas eólica, solar, hidroeléctrica y la energía nuclear, han comenzado a suplir parte de la energía aportada por las tradicionales.

En este orden de cosas, sociedades con climas adversos, sobre todo aquellas que soportan muy bajas temperaturas, precisarán de un aporte extra de energía para permitir las condiciones mínimas para la vida de su población. Así pues, tomando como referencia Rusia, se precisará un mayor aporte energético para contrarrestar la temperatura promedio en enero de $-7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en su capital, que para hacerlo en Nueva Deli con una temperatura mínima para enero de media $13,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [64].

De esta manera, este estudio revisará las necesidades energéticas de cada estado analizado, estableciendo una diferenciación entre sectores económicos, que dividirá las sociedades en los tres principales sectores, sector primario, sector industrial y servicios, aunque, en diferentes partes del estudio se realizará una división más detallada de los sectores, atendiendo a los sectores industrial, primario, transporte, residencial y de comercio y servicio público. Del mismo modo, se atenderá a una división realizada por la EIA denominada energía no especificada, siendo esta energía consumida en actividades distintas a las anteriormente citadas, debido a no quedar adscrita a ninguno de los apartados anteriormente citados, como puede ser reservas estratégicas o defensa. Como

2. ENERGÍA

se definirá en la metodología, se ha diferenciado el sector transportes, comercio y residencial para mejorar la comprensión de cada sociedad, realizando un estudio con mayor detalle no solo de las necesidades energéticas, sino de dónde se encuentran para cada sociedad estudiada.

Es preciso indicar que la necesidad energética por sectores, a la que hace referencia este apartado, es el resultado de la adición de las energías finales consumidas por sectores más la energía secundaria aportada por la energía eléctrica. Por tanto, este apartado no atenderá a la energía primaria consumida para la generación de la electricidad que, en función del modelo generativo de cada sociedad, empleará desiguales procesos y combustibles para generar. De este modo, este apartado solo atenderá a la energía consumida por sectores, dado que lo que pretende mostrar es la demanda y la proporción de cada sector con respecto a la totalidad. En futuros apartados del presente trabajo se realizará la adición de la totalidad de la energía primaria, lo que dará como resultado un mayor consumo energético en las sociedades estudiadas, al incorporar la necesaria para la generación eléctrica.

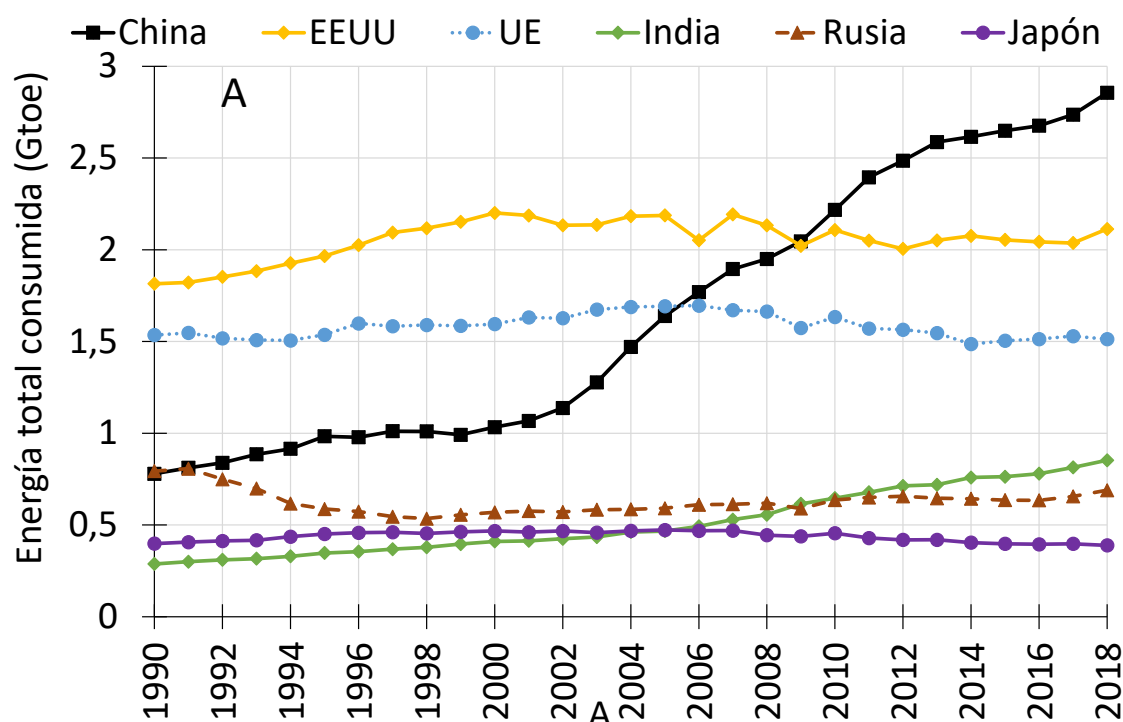


Figura 2.1: Evolución de la energía total consumida en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [5].

Así pues, y como muestra de la tendencia registrada a lo largo del periodo estudiado, se muestra la *Figura 2.1* que permite la comparación en la evolución de las sociedades

2.1 La demanda energética en los 6 países con mayor emisión de GEI

estudiadas, permitiendo comparar la evolución de India en el contexto del resto de sociedades.

La demanda de energía presenta una tendencia diferente en los distintos países estudiados en esta tesis, posibilitando una separación en dos grupos diferenciados que mejora la comprensión del estudio. Así pues, se tiene por un lado a EEUU, la UE, Rusia y Japón, sociedades que muestran una evolución plana, mientras que China e India muestran un claro incremento en su evolución. Como se observa en la *Figura 2.1*, en el primer grupo de países hay un pequeño aumento en el consumo de energía durante el período estudiado o incluso, como en el caso de Europa y Japón, una disminución. Estos cambios en el consumo posibilitaron que la variación porcentual fuera en la UE de un -1.5%, Rusia -13,2 %, EE. UU. 16,4 % y Japón -2,4 %. En el segundo grupo, hay un colosal aumento en el consumo de energía, correspondiendo a un aumento del 196,6% en India y del 266,6% en China.

2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India

CHINA

Para el caso de China se han incrementado notablemente las necesidades energéticas, especialmente a partir del año 2001, en el que cambia la tendencia del consumo energético. La *Figura 2.1.1* muestra el gigantesco aumento de sus necesidades energéticas en el sector industrial, que ha crecido a lo largo de la serie histórica un 326,1%, situándose la necesidad energética a cubrir en el sector industrial en 997,08 Mtoe (2018). Del mismo modo, se ha registrado una subida espectacular en el requerimiento energético del sector transporte, que ha crecido en el periodo estudiado un 932,2 %, pasando a precisar una energía total de 327,2 Mtoe (2018). Curiosamente la necesidad energética para el sector residencial no ha crecido en la misma medida que las anteriores, solo precisando un incremento del 18,9 %, alcanzando 346,7 Mtoe (2018), este aumento proporcional resulta inferior al registrado por la población, cuya tasa de crecimiento en este intervalo se situó en un 22,7% [8].

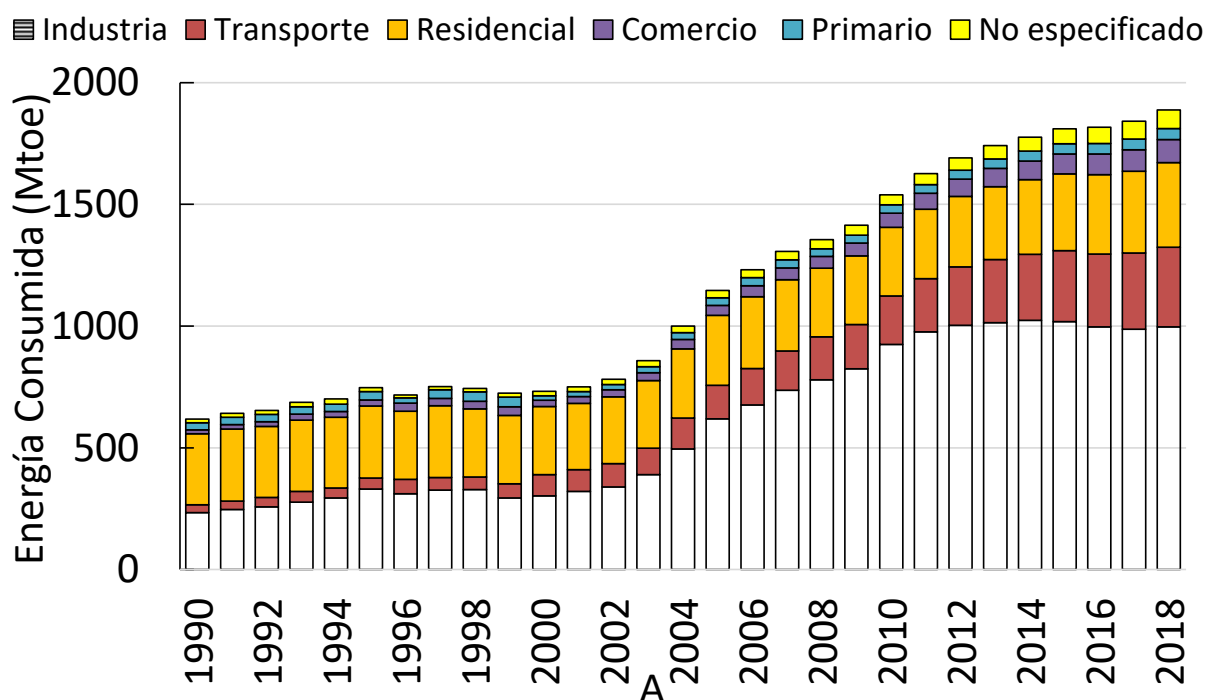


Figura 2.1.1: Evolución de la demanda energética por sectores en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.1 La demanda energética en los 6 países con mayor emisión de GEI

Las subidas en el resto de sectores estudiados están encabezadas por el comercio, que precisa un 463,6 % más de energía que al principio de la serie temporal, alcanzando un consumo de 94,9 Mtoe (2018). El sector primario ha subido un 55,1 % alcanzando 45,2 Mtoe (2018) [8].

De esta manera, el país asiático ha pasado de un consumo total de energía de 618,2 Mtoe (1990) a 1887,4 Mtoe (2018), haciendo patente la extraordinaria evolución del país.

En relación a las proporciones en los sectores estudiados para el año 2018, se aprecia un mayor requerimiento energético en el sector industrial, que consume un 52,82 % de la energía total del país. El sector residencial se sitúa en segunda posición con un consumo de un 18,37 % del total.

El sector transporte precisa de un 17,34 % de la energía total. El sector comercio representa un 5,03 % situándose en cuarto lugar. El sector primario es el de menos representación precisando únicamente un 2,39 % de la energía total del país.

La energía no especificada por el país ascendía a 76,24 Mtoe (2018). Esta energía no especificada, ha venido creciendo hasta precisar más energía que el sector primario, siendo en 2018 un 4,04% del requerimiento total de energía del país.

2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India

EEUU

Estados Unidos ha mantenido prácticamente estables sus consumos por sector, mostrando la tendencia de consumo energético que se verá para el resto de países desarrollados, en los que el consumo energético se ha mantenido prácticamente estable a lo largo de la serie temporal.

La *Figura 2.1.2* muestra la evolución de cada sector estudiado, pudiéndose apreciar la tendencia del sector industria, que ha decrecido un 2,5 % a lo largo de la serie temporal, situando su consumo en 276,6 Mtoe (2018). El sector transporte es el único que registra una clara subida, alcanzando un consumo total de 638,1 Mtoe (2018), aumentando de esta manera sus necesidades en un 30,9 %, lo que lo hace el sector económico que más demanda genera de EEUU [5].

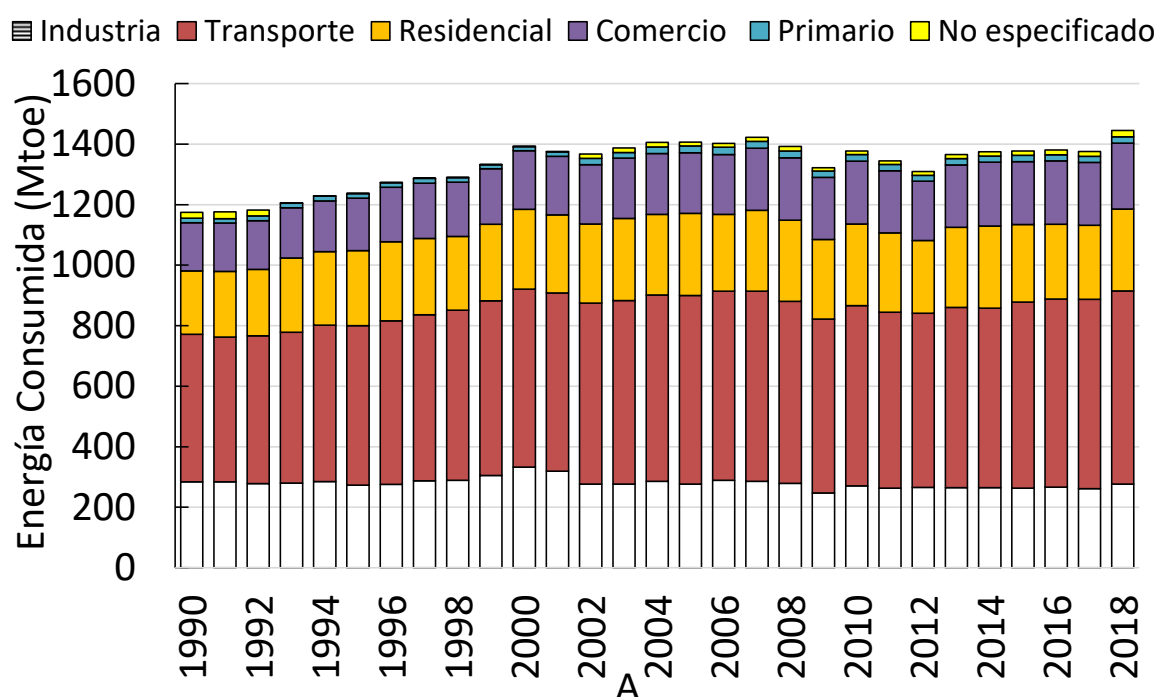


Figura 2.1.2: Evolución de la demanda energética por sectores en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector residencial también registra una subida a lo largo de la serie histórica, reconociendo un incremento del 29,1 %, alcanzando una necesidad energética de 270,9 Mtoe (2018). Esta subida se manifiesta similar a la subida experimentada por la población

2.1.1 Tendencia energética en EEUU

del país, que crece en el mismo intervalo un 30,9%. El sector comercio crece un 36,6%, alcanzando los 217,6 Mtoe (2018). El sector primario será el que crecerá en mayor proporción en el país, alcanzando un incremento en su proporción del 46,8 %, por lo que precisa 21,3 Mtoe de energía para permitir la operación del mismo. Así, la economía americana precisa de 1444,7 Mtoe (2018) para la operación de sus sectores económicos, en contraposición de los 1174,5 Mtoe que precisaba al comienzo de la serie histórica [5].

La proporción de los sectores en el año 2018 era encabezada por el sector transportes, donde se localiza el mayor consumo energético del país, situándose en un 44,17 % de las necesidades energéticas de la economía americana. El sector industrial precisa un 19,14 % de la energía empleada por los americanos, lo que otorga al sector industrial el segundo puesto entre sectores, en lo que a consumo energético se refiere.

El sector residencial consume un 18,75 % de la energía total. El sector comercio representa un 15,06 %, situándose en cuarto lugar. El sector primario es el de menor representación, precisando únicamente un 1,46 % de la energía total del país.

La energía no especificada por EEUU ascendía a 20,34 Mtoe (2018). Esta energía consumida por el país se ha mantenido estable a lo largo de la serie histórica, representando un 1,41 % (2018) de la energía total.

2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India

UNIÓN EUROPEA

La Unión de los 28 ha bajado tímidamente sus necesidades energéticas por sectores. Como se puede apreciar en la *Figura 2.1.3*, el sector industrial ha bajado sus necesidades energéticas, reduciendo su consumo en un 3,0%, para únicamente precisar 265,7 Mtoe (2018). Esta situación es similar a la mostrada por EEUU, que presenta una similar reducción en este sector. El sector transporte crece claramente alcanzando un consumo total de 328,4 Mtoe (2018), aumentando de esta manera sus necesidades en un 26,8 % [5].

El sector residencial mantiene un consumo estable a lo largo de la serie histórica, situándose en 278,2 Mtoe (2018), con lo que ha registrado un aumento del 1,7 %. Este incremento no está en consonancia con la subida experimentada por la población, que ha crecido en el periodo estudiado un 6,3 %. El sector comercio crece un 32,5%, alcanzando una necesidad anual de 146,3 Mtoe (2018) [5].

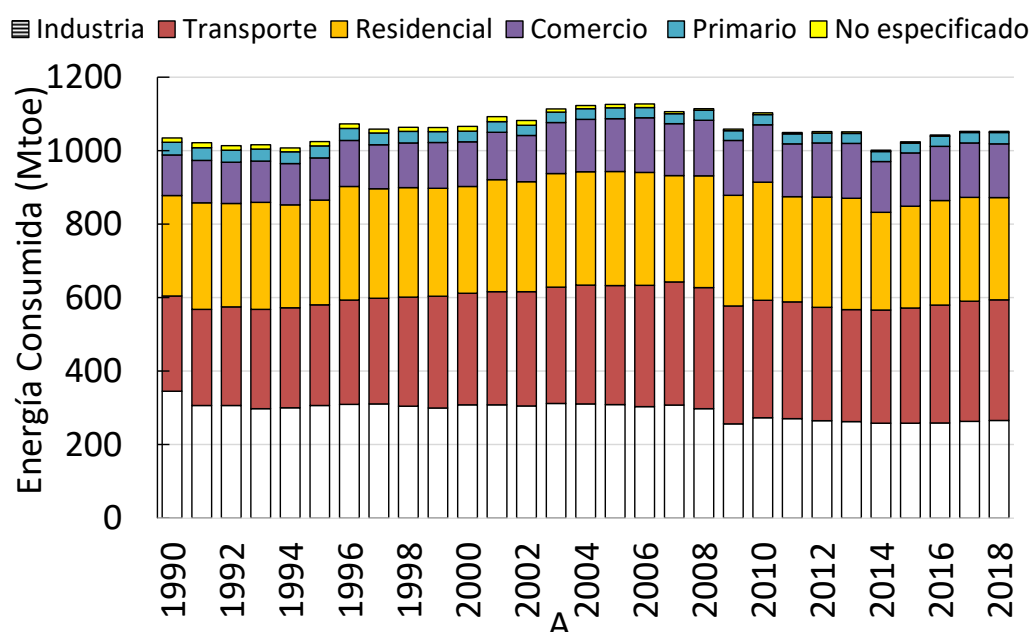


Figura 2.1.3: Evolución de la demanda energética por sectores en la Unión Europea. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector primario ha decrecido a lo largo de la serie histórica, reduciendo su necesidad energética hasta los 30,3 Mtoe (2018), lo que supone una reducción del 12,1 %. De esta manera, la economía de la Unión Europea reduce sus necesidades energéticas, que marcaron un máximo de 1126,8 Mtoe (2006), abreviando sus necesidades hasta precisar

2.1.1 Tendencia energética en la Unión Europea.

una energía equivalente a 1052,1 Mtoe (2018), precisando de este modo una energía similar a la que demandada en 1990 donde se registraba una necesidad de 1034,5 Mtoe. [5].

La proporción de los sectores para el caso de la Unión Europea es similar a la de EEUU, estando para el año 2018 encabezada por el sector transportes, donde se alcanza el mayor consumo energético, situándose en un 31,21 % de las necesidades energéticas de la Unión. El sector residencial ocupa el segundo puesto del requerimiento, precisando un 26,44 % de energía empleada por el país, lo que la sitúa por encima del sector industrial, que venía de ocupar el primer puesto a lo largo de la primera mitad de la serie histórica. De esta manera, el sector industrial ha pasado de representar el 33,36 % (1990), a representar un 25,25 % (2018).

El sector comercio significaba un 13,90 % (2018), situando de esta manera al sector en cuarto lugar. El sector primario, como en el resto de las sociedades estudiadas, es el de menor representación, precisando únicamente un 2,87 % de la energía total de la Unión (2018).

La energía tipificada como no especificada por la Unión, ascendía a 3,18 Mtoe (2018). Esta identificación de la energía consumida por el país, ha venido reduciéndose a lo largo de la serie histórica hasta representar únicamente el 0,3 % (2018) de la energía consumida por la Unión.

2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India

RUSIA

La evolución del consumo energético de la Federación Rusa se presenta en la *Figura 2.1.4*, donde se puede apreciar el consumo energético total, que para este país se sitúa en 434,83 Mtoe (2018). En la figura se aprecia igualmente la crisis acontecida en el país tras la desintegración de la antigua Unión Soviética, que originó una bajada en el requerimiento de energético de la Federación hasta 1998. En esta sociedad, la necesidad energética en el sector industrial se ha visto reducida un 33,4%, situándose el requerimiento energético a cubrir en 138,94 Mtoe (2018). De la misma manera, el sector transportes ha experimentado un decremento, precisando un aporte energético total de 101,01 Mtoe (2018), lo que supone una reducción en el sector del 12,8 %. El sector residencial, por el contrario, ha registrado un incremento en sus requerimientos energéticos, precisando un total de 148,25 Mtoe (2018), lo que representa una subida del 77,7%. Este aumento no resulta proporcional al poblacional, que a lo largo de la serie histórica ha permanecido prácticamente estable, registrando únicamente una reducción del 2,3% [8].

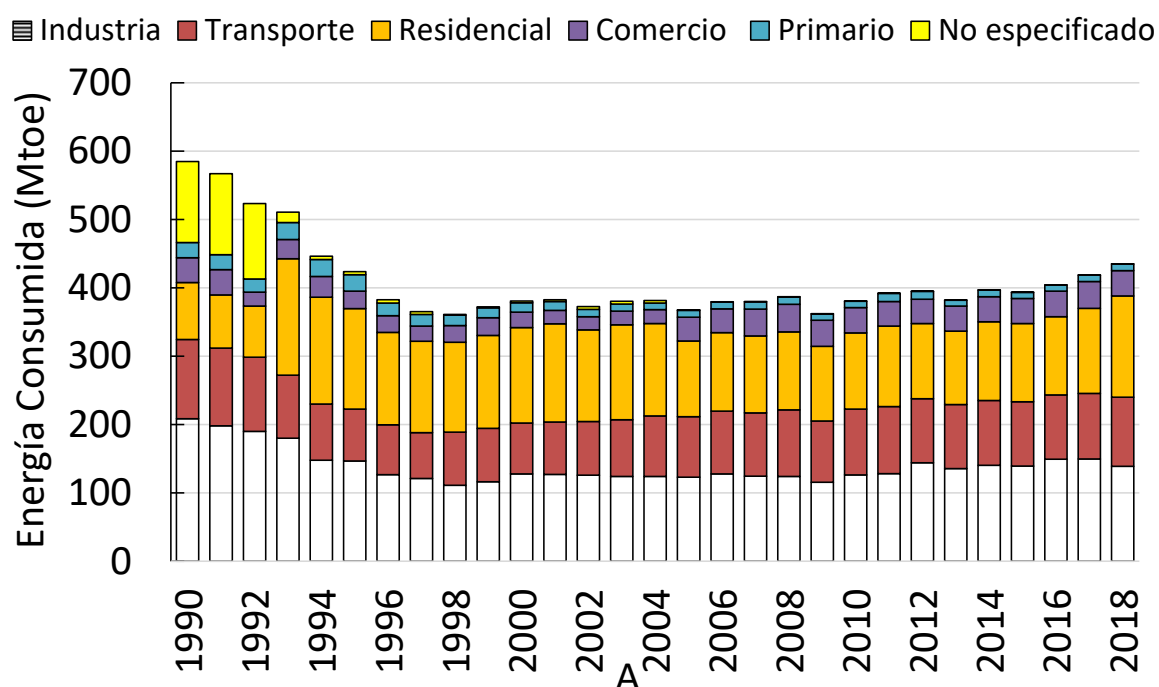


Figura 2.1.4: Evolución de la demanda energética por sectores en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Las subidas en el resto de sectores estudiados están encabezadas por el comercio, que precisa un 2,22 % más de energía que al principio de la serie temporal, alcanzando un

2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India

consumo de 37,0 Mtoe (2018). El sector primario, por el contrario, ha registrado un decremento considerable en sus requerimientos energéticos, precisando únicamente 9,57 Mtoe (2018), lo que supone una disminución del 56,7% a lo largo del periodo temporal estudiado por este trabajo [8].

En relación a las proporciones en los sectores estudiados para el año 2018, se aprecia un mayor requerimiento energético en el sector industrial, que consume un 31,95 % de la energía total del país. El sector residencial se sitúa en segunda posición con un consumo de un 28,35 % del total.

El sector transporte precisa de un 23,23 % de la energía total. El sector comercio representa un 8,52 % situándose en cuarto lugar. El sector primario es el de menor representación, precisando únicamente un 2,22 % de la energía total del país.

La energía no especificada resulta muy baja, representando únicamente 0,01 Mtoe (2018). Al comienzo de la serie histórica esta tipificación de energía no especificada, representaba una notable proporción del requerimiento energético del país, siendo los tres primeros años de la serie temporal los que más energía demandaban, registrándose un máximo en 1990, donde se consumían 118,39 Mtoe. La reducción en este apartado se hizo notable en 1993, donde el requerimiento energético no especificado se situó en tan solo 15,43 Mtoe, para caer posteriormente a 4,91 Mtoe (1994). Tras aquel momento, la energía no declarada se ha visto reducida hasta situarse en las cifras anteriormente expuestas.

2. ENERGÍA

JAPÓN

La evolución del país nipón está marcada por dos temporadas diferenciadas, la primera, donde se registraban subidas en el requerimiento energético, hasta alcanzar un máximo en 2002, para pasar a una segunda etapa, donde los registros han descendido, marcando una reducción de los mismos, al final de la serie temporal. Como se puede apreciar en la *Figura 2.1.5*, el sector industrial ha descendido en sus necesidades energéticas a lo largo de la serie histórica, reduciendo un 24,1 % para precisar únicamente 82,18 Mtoe (2018). El sector transporte ha venido creciendo a lo largo de la serie, registrando un máximo de crecimiento en 2001, donde se registró una subida del 27,3 %, con respecto al año base. Desde ese momento, el sector ha venido reduciendo su consumo hasta situarse en un requerimiento total de 70,55 Mtoe (2018), lo que representa un incremento sobre el año base de un 3,2 % [5]. El sector residencial evidencia igualmente dos tramos diferenciados, lo que ha supuesto subidas en la primera mitad de la serie temporal, donde se situó en un consumo de 49,3 Mtoe (2002), para reducir el requerimiento en los años sucesivos hasta precisar únicamente 42,4 Mtoe (2018), lo que ha limitado la subida total con respecto al año base en un 11,4 %. Esta subida no está en consonancia con la subida experimentada por la población, que ha crecido en el periodo estudiado un 2,4 %. El sector comercio crece un 46,6%, alcanzando una necesidad de 48,56 Mtoe (2018) [5].

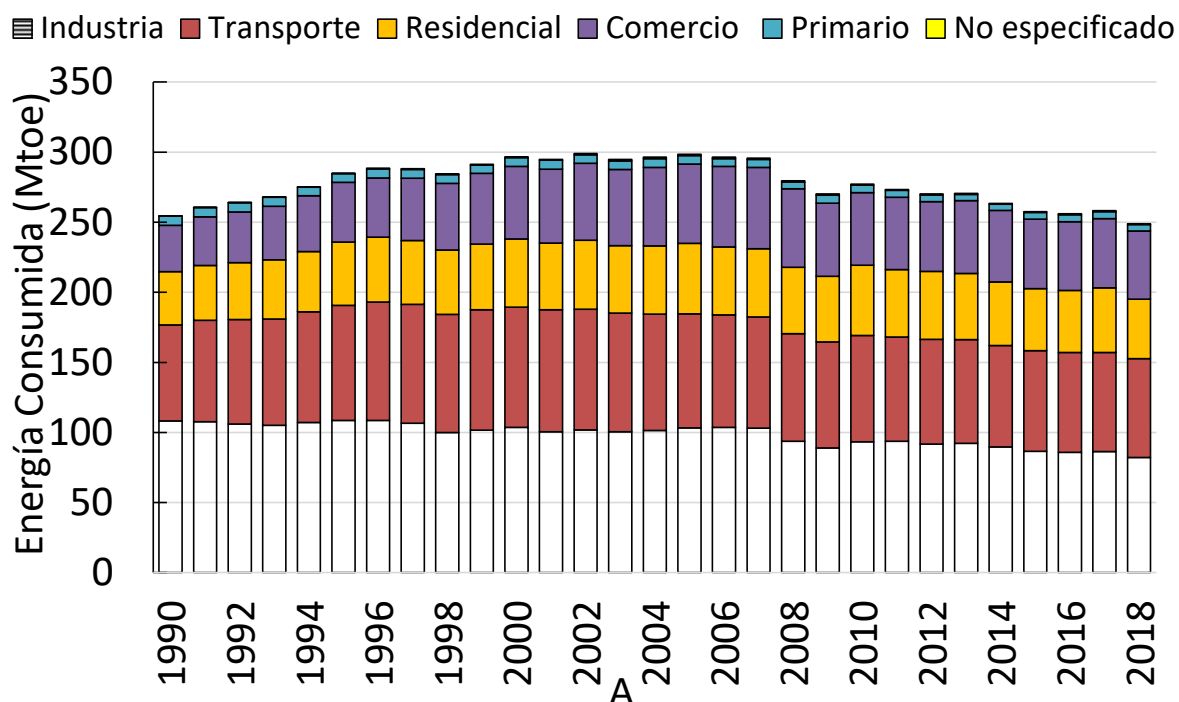


Figura 2.1.5: Evolución de la demanda energética por sectores en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India

El sector primario ha venido decreciendo a lo largo de la serie histórica, reduciendo su necesidad energética hasta los 4,64 Mtoe (2018), lo que supone una reducción del 29,4 %. De esta manera, la economía japonesa ha reducido sus necesidades energéticas, precisando una energía de 248,86 Mtoe (2018) para la operación de sus sectores económicos, en contraposición de los 254.38 Mtoe que eran necesarios al comienzo de la serie histórica [5].

Analizado las proporciones entre los sectores estudiados para el año 2018, se puede apreciar que el mayor requerimiento energético se encuentra localizado en el sector industrial, donde se consume un 33,01 % de la energía total. El sector transporte se sitúa en segunda posición en la importancia de consumo, precisando un aporte energético del 28,35 % del total.

El sector comercio precisa de un 19,51 % de la energía, ligeramente por encima del requerimiento del sector residencial que se sitúa en cuarto lugar con una necesidad del 17,02%. El sector primario es el de menor demanda, precisando únicamente un 1,86 % de la energía total del país.

La energía no especificada por el país es únicamente 0,542 Mtoe (2018), representando muy baja proporción sobre el total.

2.1.2 Tendencia energética en India

La evolución de este país presenta similares características al caso chino, puesto que, en todo el periodo histórico las necesidades energéticas han experimentado una tremenda alza, no siendo este crecimiento proporcional para cada sector, dado que cada uno de ellos ha evolucionado de manera diferente a lo largo de la serie histórica. De esta manera, y como se puede apreciar en la *Figura 2.1.6*, el sector industrial ha evolucionado en sus necesidades energéticas con respecto al año base, alcanzando un incremento del 208 %, lo que le confiere una necesidad energética que alcanza los 206,1 Mtoe (2018). El sector transporte, ha venido creciendo desmesuradamente a lo largo de la serie temporal, registrando una subida del 397,7 % con respecto al año base, lo que representa un consumo de 103,77 Mtoe (2018) [5]. El sector residencial por el contrario no presenta el mismo incremento en la progresión descrita para los otros sectores, subiendo únicamente un 45,76 %, lo que supone un consumo final en el sector de 174,5 Mtoe (2018). Esta subida está por debajo del incremento experimentado por la población, que partía en el año base con 873,3 millones (1990), pasando a superar los 1352,6 millones (2018), lo que representa un 54,9 % de incremento [5].

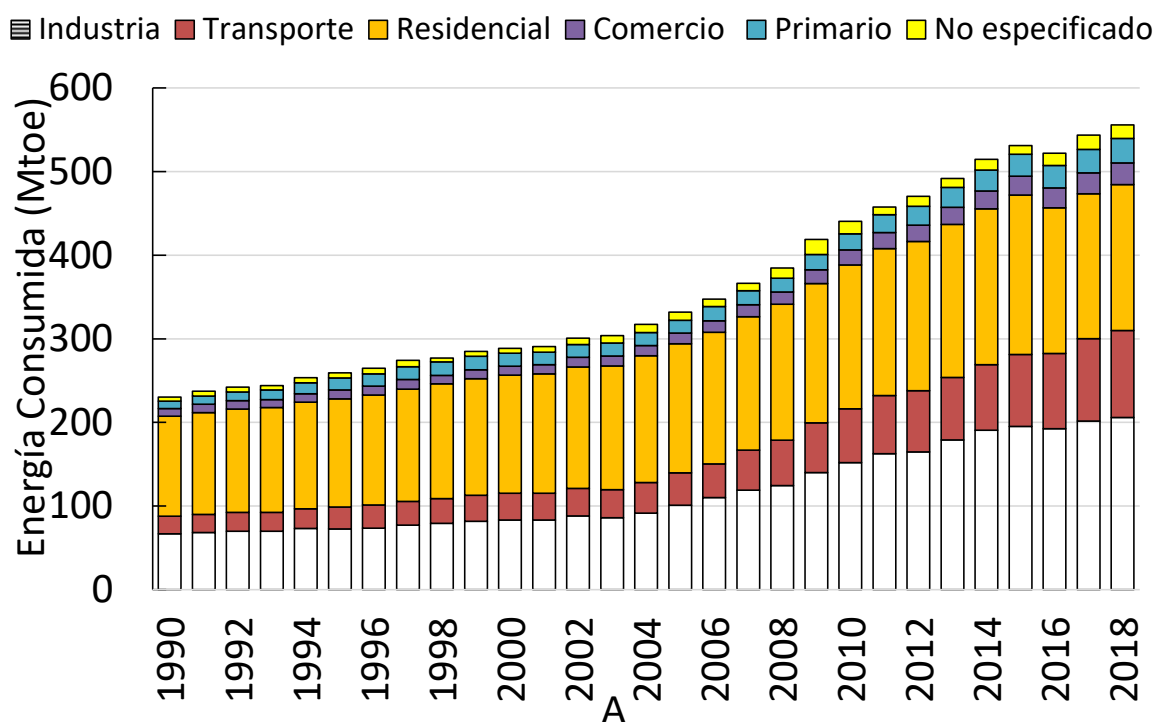


Figura 2.1.6: Evolución de la demanda energética por sectores en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.1.1 Tendencia energética de los estados a comparar con India

El sector primario, ha crecido alcanzando un consumo de 29,31 Mtoe (2018), lo que ha supuesto una subida del 239,9 %. El sector comercio crece igualmente representando una evolución del 181,1 %, lo que ha supuesto una necesidad energética de 26,0 Mtoe (2018).

La suma total de la energía precisada por el país asciende hasta los 555,77 Mtoe (2018), lo que supone una subida considerable, dado que la cantidad de energía consumida por el conjunto de los sectores al comienzo de la serie histórica estudiada era de tan solo 230,20 Mtoe (1990).

Entre los diferentes sectores estudiados se han producido leves diferencias en la proporción que del total de energía ocupaban, así pues, para 2018 se puede apreciar que el mayor requerimiento energético es precisado por el sector industrial, con un 37,08 % del total de la energía consumida. El sector residencial se sitúa en segunda posición en la importancia de su consumo, precisando un aporte energético del 31,40 % del total.

El sector transporte representa un 18,67 % de la energía, lo que confiere a este sector la tercera posición en importancia, por encima del sector primario, que representa tan solo un 5,27 % de la energía consumida por el país. El sector comercio es el de menor representación, demandando únicamente un 4,68 % de la energía total del país. Es destacable que, mientras en las sociedades tomadas para comparar con India, la evolución del sector primario ha sido descendente en el empleo de energía, para el país que centra este estudio, este indicador ha subido en energía total empleada. Esto refleja el marcado carácter agrario que aún permanece en India.

La energía no especificada por el país ha venido creciendo a lo largo de la serie histórica y se sitúa en un total de 16,05 Mtoe (2018), representando por tanto 2,89 % de la energía total.

2.2 Fuentes que cubren la demanda energética

Para cubrir su demanda energética cada país ha incorporado a su sistema energético diversas fuentes de energía primaria. Estas fuentes energéticas están encaminadas a cubrir una demanda que varía entre otros en función del día y la noche, las estaciones, el clima, la eficiencia de los sistemas, el progreso económico, la apertura a nuevos mercados y la población. Para cubrirla, se han empleado los recursos más favorables de cada sociedad. De esta manera, se establecen diferencias en cada país a la hora de incorporar fuentes de energía, dado que cada economía dispone de diferentes recursos para abastecer su mercado energético. De esta manera, sociedades con grandes recursos naturales como puede ser el petróleo, los recursos geotérmicos o la capacidad hidroeléctrica, cubren en primera instancia su demanda empleando estas fuentes. La adaptación de cada economía, por crecimiento de esta, a cubrir una demanda superior a su capacidad, estará detrás de la necesidad de contar con fuentes de energía menos propicias, dado que presentarán mayor coste económico o generarán mayor impacto ambiental.

En este apartado se estudiarán las principales fuentes de energía primaria, que abastecen cada una de las sociedades a comparar con India, estudiando de esta manera, aquellas que respetan al medio ambiente, dado que presentan bajas o nulas emisiones y aquellas que, por el contrario, provocan emisiones contaminantes. Para ello se enumerarán, en los siguientes apartados, cada una de las principales tecnologías y la energía que aportan a cada sector económico dentro de un País.

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

El carbón es el recurso energético más accesible, no solo porque es un recurso abundante en el planeta, sino también por el bajo coste de la instalación de plantas de generación que emplean este combustible, así, estuvo presente mayoritariamente en la generación de electricidad, principal empleo que se le ha dado a esta tecnología. Desgraciadamente, el bajo coste económico está en oposición al medioambiente, dado que el proceso de quemar carbón para la obtención de energía, conlleva una fuerte emisión de GEI, entre los que predomina el CO₂, pero también presenta fuerte emisión de dióxido de azufre (SO₂), que provoca lluvia ácida. Otros de los elementos emitidos por estas plantas son, los óxidos nitrosos (NO_x), partículas, mercurio y otros metales pesados, todos ellos agentes que provocan numerosos problemas de salud, entre los que destacan las enfermedades pulmonares y neurológicas en humanos y animales. [65].

Para realizar un análisis más detallado, en este trabajo se estudiará el carbón como elemento desagregado en los tipos más representativos empleados por cada país. Así, solo

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

se empleará su coeficiente de emisión medio, típicamente empleado para referirse al carbón en la literatura científica, para designar a aquellos empleados de manera residual, aplicando para los más destacados tipos de carbón, su coeficiente individual publicado por la EPA [66]. Esta diferenciación de combustibles atiende a las profundas diferencias en su uso y al diferente coeficiente de emisión de CO₂. Así pues, el carbón se ha desagregado en los siguientes combustibles:

Antracita, tipo de carbón de gran dureza, con gran contenido en carbono fijo, próximo al 95%. Este elemento dispone de un gran poder calorífico (32-33 MJ/kg), siendo el contenido de materias volátiles bajo. Debido a esta baja concentración de materiales poco pesados, este combustible es de difícil ignición. El coeficiente de emisión de la antracita es de 4,116 kgCO₂/koe [66].

Carbón de coque, es un tipo de carbón que dispone de calidad suficiente para permitir la fabricación de coque, dado que aporta suficiente poder calorífico para soportar la carga de un alto horno (23, 8 MJ/kg). Este producto es también conocido como carbón metalúrgico. El coeficiente de emisión del carbón de coque es de 3,742 KgCO₂/koe [66].

Bituminoso, es un carbón de alta calidad normalmente empleado en la generación de electricidad. Presenta mejores prestaciones que el lignito, pero no llega a las de la antracita, que presenta mayor poder calorífico. Contiene entre un 60 y un 80% de carbono, siendo el resto de su composición agua, aire, hidrógeno y azufre. Su contenido calorífico es elevado (24 a 35 MJ/kg). Existen carbones bituminosos conocidos con diferentes nombres, siendo su concentración en volátiles un elemento diferenciador. Entre los carbones bituminosos destaca la hulla por su alto contenido en carbono (entre el 75% y el 90%), bastantes volátiles y alto poder calorífico. El coeficiente de emisión del carbón bituminoso es de 3,702 KgCO₂/koe [66].

Lignito, material muy abundante con estructura fibrosa. Tiene una elevada relación de agua y presenta gran cantidad de materia volátil. Es de formación más reciente que el bituminoso y la antracita y su poder calorífico es mucho menor (17 a 18 MJ/kg). El coeficiente de emisión del lignito es 3,989 kgCO₂/koe [66].

Gas de coque, es una mezcla de gases procedentes de la carbonización del carbón en un horno de coque a temperaturas superiores a los 1.000 °C. Presenta una baja emisión de CO₂ con respecto a los otros derivados de carbón, alcanzando esta únicamente 1,86 KgCO₂/koe [66].

Gas de alto horno, es un gas subproducto en la producción de hierro. En este proceso metalúrgico, se calientan hasta fundir mineral de hierro, coque o arrabio metálico, resultando un gas del proceso siderúrgico [67]. El gas de alto horno tiene un alto contenido de monóxido de carbono (CO) y un poder calorífico bajo, siendo su valor típico 3900 MJ/m³ [8]. Los cinco componentes principales del gas de alto horno son N₂, CO, CO₂, H₂O y H₂. Este

2. ENERGÍA

gas a menudo se emplea en los molinos de los hornos, en motores que emplean como combustible gas y para la generación de electricidad y vapor. De esta manera el empleo de este gas se circunscribe a la industria siderúrgica, empleándose como complemento del gas natural [68].

Para completar los numerosos tipos de carbón con bajo impacto en la producción energética de cada estado estudiado, se ha incluido como combustible un carbón genérico, dándole a este combustible el valor medio del normalmente empleado para dimensionar las emisiones de este combustible de manera estándar. Así, se ha tipificado como carbón a los combustibles de tipo sub-bituminoso, *coke oven coke*, *coal tar*, *BKB* y *gas work gas*. Todos ellos empleados de manera minoritaria.

CHINA

Como principal emisor de CO₂, este estudio comenzará revisando los datos del consumo de carbón en China, mayor productor y consumidor del mundo de este combustible, haciendo que las cifras de producción alcanzasen en 2006 un total de $2,37 \cdot 10^9$ Tm y las de consumo alcanzaron las $23,9 \cdot 10^9$ Tm [69]. El principal uso de esta energía es la generación de electricidad, una de cada cuatro toneladas de carbón que se usa en el mundo se quema para producir electricidad en China [8]. La subida de la demanda energética, gracias a los espectaculares avances en la economía del país, está también detrás del aumento en el empleo de dicho combustible.

Además de la generación eléctrica y la industria, el carbón se emplea residualmente en casi todos los sectores chinos, incluso se hacía un empleo residual de carbón de tipo bituminoso en el transporte hasta 2003. Otros sectores como el residencial continúan empleando grandes cantidades de carbón, especialmente de tipo bituminoso, aunque este consumo se viene reduciendo a lo largo de la serie estudiada, sin embargo, aún aporta una cantidad equivalente de energía de 42,3 Mtoe (2018), por lo que no se puede despreciar su empleo. Son residuales los empleos en el sector residencial de carbón de tipo *coke oven coke*, con un aporte de 0,13 Mtoe (2018) o el *gas work gas* con un aporte de 0,82 Mtoe (2018). En el sector comercio, el aporte energético del carbón de tipo bituminoso alcanzó los 16,5 Mtoe (2018), ampliándose su empleo en toda la serie temporal.

Incluso en el sector primario se mantiene el empleo de carbón de tipo bituminoso, donde su aporte ha crecido tímidamente a lo largo de la serie estudiada, alcanzando 13,6 Mtoe (2018). A este aporte se le debe sumar una cantidad residual de *coke oven coke* mínimamente empleado en el sector, aportando 0,23 Mtoe (2018) [8].

Debido al rápido crecimiento de su economía desde 2003, se ha reforzado el consumo de carbón, así, grandes minas de carbón han expandido su capacidad más allá de sus capacidades de diseño. Ante esta situación el gobierno chino canceló las ayudas a la

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

exportación de carbón en 2004, como intento para reforzar el consumo interior de un combustible clave como principal fuente energética según el gobierno chino [69].

En la *Figura 2.2.1.1* se puede apreciar la escalada registrada en el empleo del carbón de tipo bituminoso para la producción eléctrica, que ha crecido en un 342% entre los años 2018-1990, representando un aporte de 619 Mtoe (2018) [8]. A la energía aportada por el carbón bituminoso en la producción eléctrica se ha de añadir 8,2 Mtoe de energía aportada por gas de coque, siendo para 2018 los únicos elementos de tipo carbón presentes en la producción de electricidad en China. A lo largo de la serie histórica estudiada, han estado presentes pequeñas cantidades de energía proveniente de carbón de coque, no representadas en la gráfica por la imposibilidad de ser apreciadas, dado que la punta de utilización de este elemento representó un aporte de 1 Mtoe (2004), para paulatinamente abandonar por completo su empleo.

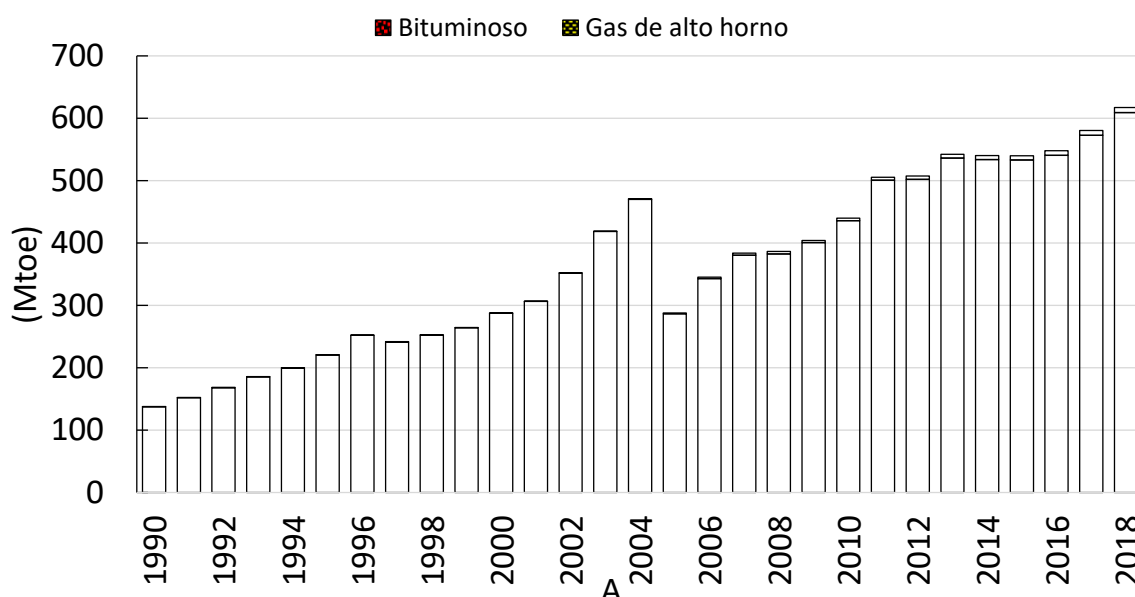


Figura 2.2.1.1: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

En cuanto al sistema energético que aporta capacidad a la industria de China, el carbón aporta una cantidad de energía determinante, aumentando su aportación desde los 170,5 Mtoe (1990), a registrar un aporte de energía al sector de 484,18 Mtoe (2018). La *Figura 2.2.1.2* muestra los consumos, destacando el empleo mayoritario del bituminoso, con un aporte que se ha venido aumentando hasta aportar 318,5 Mtoe (2018).

A esta contribución se ha de añadir la que representa el *coke oven coke*, que aportó 77,4 Mtoe (2018), siendo el segundo tipo de carbón en lo que se refiere a empleo en el sector

2. ENERGÍA

industrial. El gas de alto horno también presenta una alta participación con un aporte energético que representaba 56,4 Mtoe (2018).

El sistema industrial chino también emplea cantidades menores de antracita, que después de tener un pico de consumo en 2013 (17,9 Mtoe), ha reducido su participación hasta aportar 4,0 Mtoe (2018).

El carbón de coque, a pesar de ser ampliamente empleado en el periodo 2000-2015, donde se registró su máximo nivel de aporte energético con 29,5 Mtoe (2014), redujo drásticamente su aportación en 2016, para terminar la serie temporal sin aporte alguno al sistema industrial chino.

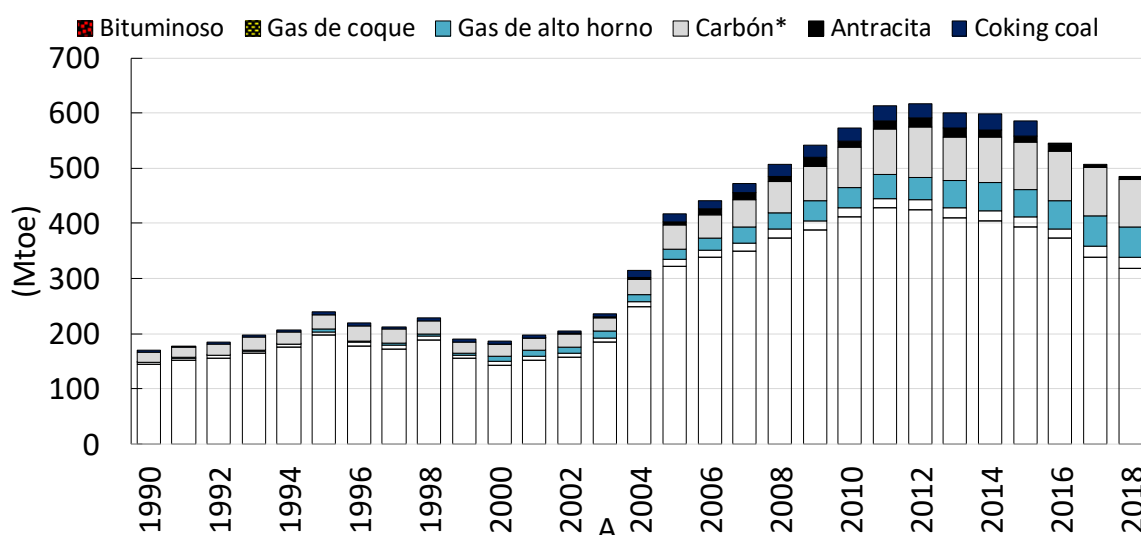


Figura 2.2.1.2: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

La preocupación creciente respecto a la calidad del aire, está haciendo cambiar la política del gobierno chino, que impulsa nuevas políticas encaminadas a la reducción de emisiones. Este nuevo plan promulga suplir en el sector industrial y residencial la energía aportada por el carbón, por nuevos sistemas impulsados por gas [69].

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

EEUU

El carbón se empleó en EEUU hasta 2001 en el sector residencial, en donde fue reemplazado por otros combustibles hasta su total eliminación. Del mismo modo, presenta un consumo residual en el sector comercio con un aporte de 0,22 Mtoe (2018) de carbón bituminoso y 0,20 Mtoe (2018) de carbón sub-bituminoso. En el resto de sectores no se registra su uso excepto en el de la generación eléctrica y el sector industrial, donde su empleo aporta una importante cuota de la energía final.

El consumo de carbón para la generación eléctrica en Estados Unidos se muestra en la *Figura 2.2.1.3*. Este consumo es comparable al que desarrolla China, aunque para el caso de EEUU su empleo se va reduciendo en los últimos años, donde este tipo de energía primaria aporta al sistema eléctrico 288,5 Mtoe (2018), muy por debajo de los 388,4 Mtoe que aportaba al comienzo de la serie histórica. La gran diferencia que presenta el sistema americano respecto al chino está en el empleo de unas fuentes de carbón más variadas. Así, para la generación eléctrica en EEUU incorpora lignito, sub-bituminoso y antracita, minerales con menor poder calorífico que el bituminoso, dado que el empleo de la antracita es residual. El carbón de tipo bituminoso es en EEUU también el que aporta la base de la energía primaria para la generación eléctrica mediante plantas de carbón [8].

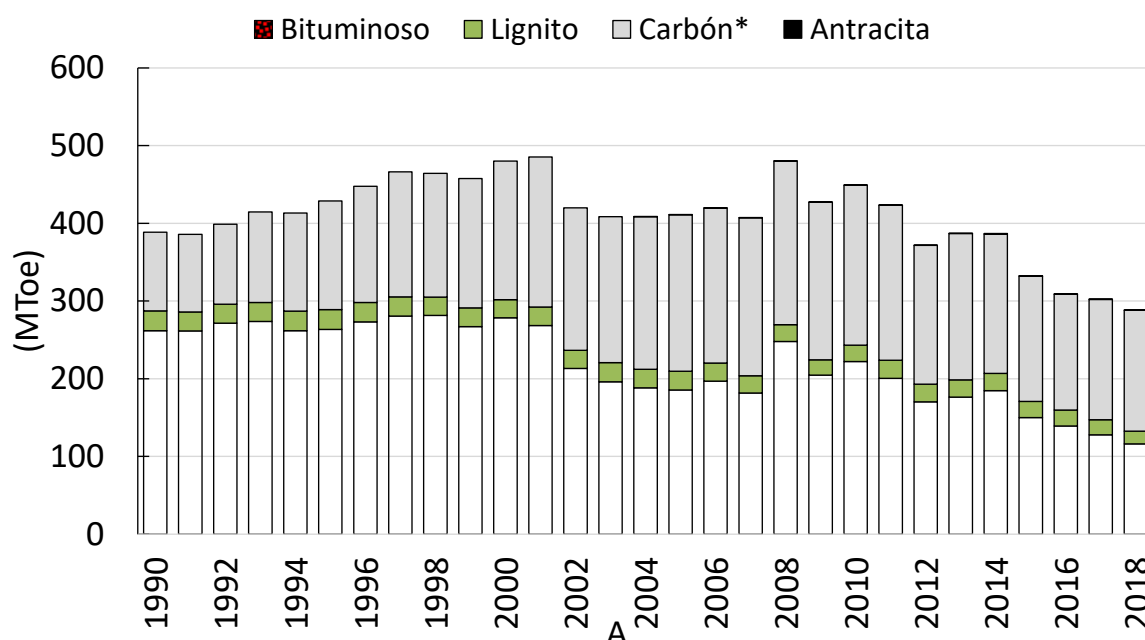


Figura 2.2.1.3: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2. ENERGÍA

Así, el empleo de carbón bituminoso aporta un total de 116,1 Mtoe (2018) en contraposición con los 261,8 Mtoe que aportaba al comienzo de la serie temporal. El lignito aportaba una cantidad equivalente a 16,44 Mtoe (2018), mostrando igualmente una tendencia a la baja en su utilización.

El carbón de tipo sub-bituminoso, incorporado en este trabajo con factor de emisión carbón genérico, ha evolucionado en su empleo hasta llegar a aportar más energía que el bituminoso, siendo en el sistema actual de EEUU el tipo de carbón que más energía aporta. Este tipo de combustible, presenta su máximo nivel de empleo en 2008, donde aportaba 210,5 Mtoe. El uso de sub-bituminoso, como el resto de tipos de carbón ha reducido su aportación reduciéndose hasta alcanzar un total de 155,5 Mtoe (2018) [8].

La antracita tiene un aporte de energía minoritario. En el sistema energético para la generación eléctrica, este combustible fue incorporado en 2004, aportando 0,26 Mtoe. En la actualidad su aportación ha crecido, hasta situarse en 0,44 Mtoe (2018) [8].

En cuanto al sistema energético que aporta capacidad a la industria de EEUU, el carbón ha sido paulatinamente reemplazado por otros combustibles, disminuyendo su aportación desde los 46,0 Mtoe (1990) a registrar un aporte de energía al sector de 16,41 Mtoe (2018). El tipo de carbón empleado mayoritariamente es el bituminoso, con un aporte que se ha venido reduciendo hasta aportar 8,9 Mtoe (2018).

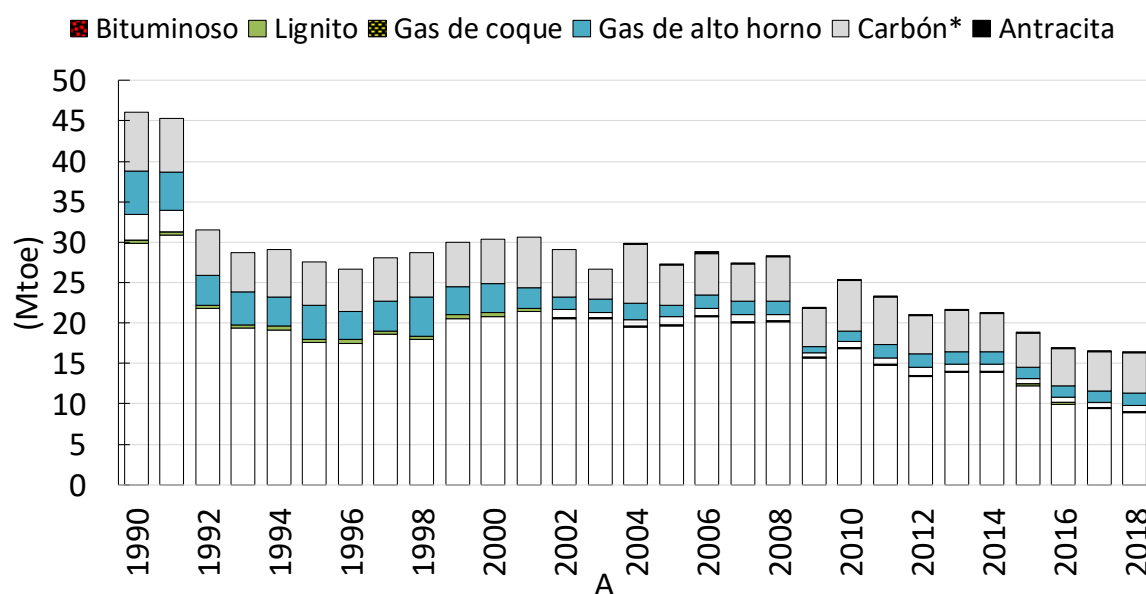


Figura 2.2.1.4: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

El sistema igualmente es alimentado con pequeñas cantidades de energía procedentes de combustibles como la antracita, con un aporte de 0,05 Mtoe (2018) y una aportación también residual de gas de coque que aportó para el mismo año 0,67 Mtoe.

El aporte de gas de alto horno es representativo, añadiendo 1,6 Mtoe (2018) al sistema energético, aunque se registra una evolución a la baja de su empleo. El carbón de tipo genérico empleado, para el caso del sistema industrial de EEUU está compuesto por sub-bituminoso, con un aporte de 2,67 Mtoe (2018) y coke ven coke que aportó para el mismo año 2,32 Mtoe.

2. ENERGÍA

UNIÓN EUROPEA

El sistema energético de la Unión, presenta incorporaciones de energía procedente del carbón en casi todos los sectores estudiados, observándose en cada uno de los sectores una importante tendencia a la baja en su aporte energético al sistema. Así, la energía aportada por carbón de tipo bituminoso está presente en el sector primario, donde aporta aún 0,93 Mtoe (2018), presentándose leves incorporaciones de antracita y lignito. En el sistema que abastece de energía al comercio, igualmente se registra una disminución en los últimos años, pero todavía se registraba un aporte de energía equivalente de 0,77 Mtoe (2018), obtenida mediante el empleo del carbón de tipo bituminoso.

El sector residencial es uno de los que presenta mayor aporte de energía procedente del carbón, precisando aún en 2018 una cantidad de 7,21 Mtoe, siendo aportada por carbón de tipo bituminoso, más aportes minoritarios de BKB (0,45 Mtoe), antracita (0,20 Mtoe), *coke oven coke* (0,11 Mtoe) y lignito (0,65 Mtoe). Aun así, la energía aportada por este combustible al sector residencial se ha visto reducida en toda la serie temporal, bajando desde un aporte anual de 30,7 Mtoe (1990).

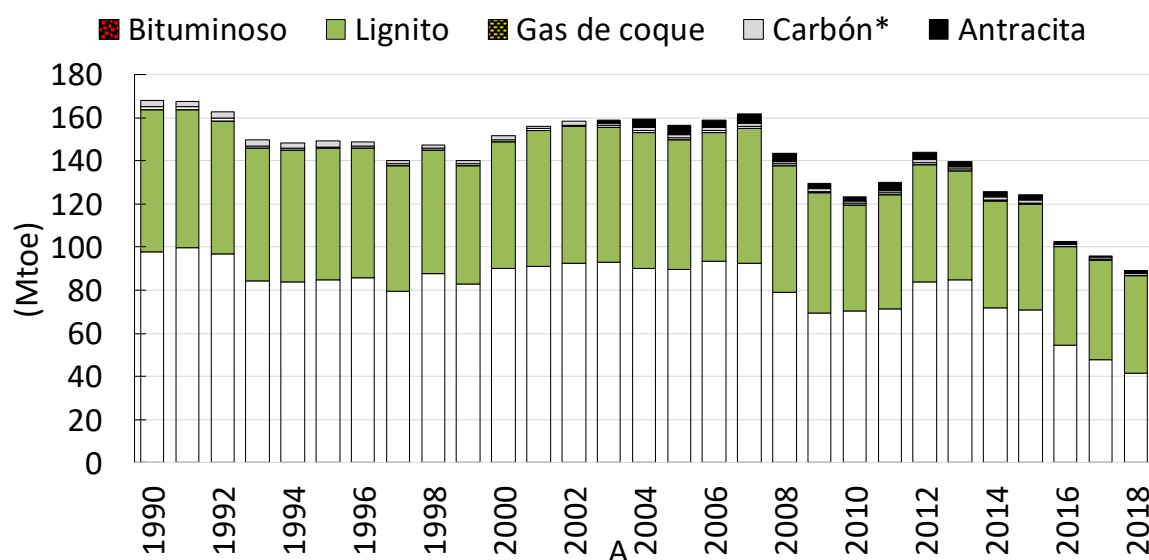


Figura 2.2.1.5: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector transporte presenta un minúsculo aporte de carbón de tipo bituminoso, donde aún se precisan 0,01 Mtoe (2018). Son los sectores de la generación eléctrica y el sector industrial, los que mantienen un aporte importante de este tipo de combustible.

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

La *Figura 2.2.1.5* muestra el sector de generación de energía eléctrica, el cual, precisa aún un aporte de 90,4 Mtoe (2018), lo que representa una reducción importante si se compara con los 179,1 Mtoe necesarios al comienzo de la serie histórica. Esta energía es abastecida mediante lignito, con un aporte de 45,3 Mtoe (2018), que en los últimos años ha reemplazado al bituminoso como principal fuente de energía de tipo carbón, lo que hace único el caso de la Unión Europea en el contexto de los países objeto de estudio. El bituminoso aporta 41,4 Mtoe (2018), completando la aportación a excepción de pequeñas cantidades de antracita (0,73 Mtoe), carbón de coque (1,52 Mtoe), sub-bituminoso (0,40 Mtoe), BKB (0,20 Mtoe) y gas de coque (0,95 Mtoe).

La *Figura 2.2.1.6* muestra el mix que abastece las necesidades energéticas de la industria mediante carbón, la Unión descende en sus necesidades iniciales fijadas en 66,95 Mtoe (1990), precisando en el último año estudiado 20,3 Mtoe (2018). En cuanto a la composición del carbón empleado, el bituminoso es el más presente, con una participación en 2018 del 38,7%, aunque su empleo se ha venido reduciendo hasta las 7,8 Mtoe (2018). El carbón genérico representa un 26,2% en 2018 de todo el empleado, estando compuesto por *coke oven coke* (3,2 Mtoe), BKB (1,8 Mtoe), sub-bituminoso (0,3 Mtoe). La antracita ha aumentado su empleo, hasta alcanzar una participación en el mix de carbón del 6,6 %, lo que supone 1,3 Mtoe (2018).

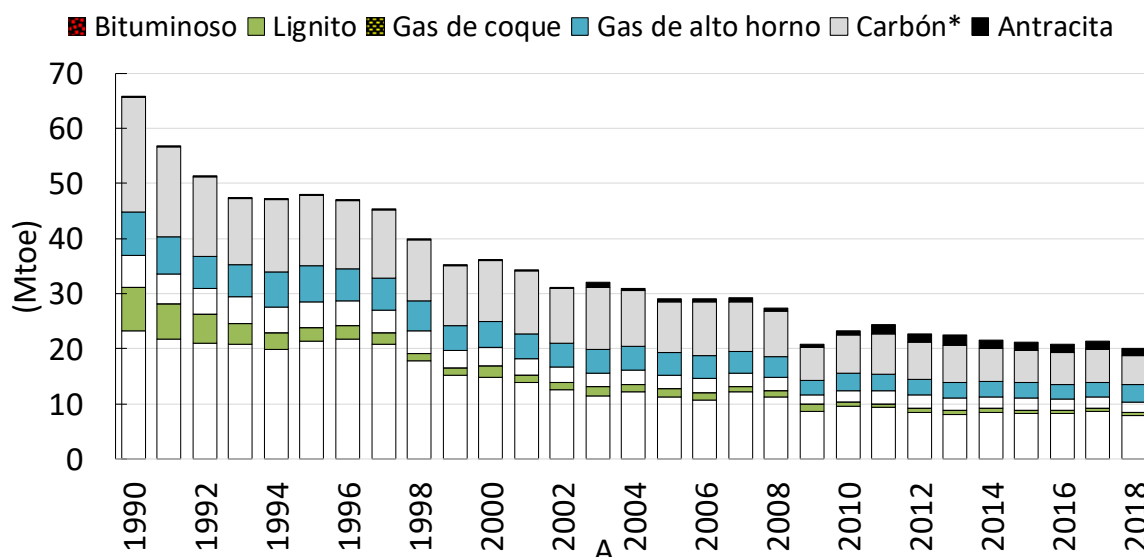


Figura 2.2.1.7: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción Industrial en UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2. ENERGÍA

El lignito se está dejando de emplear de manera paulatina, aunque aún represente un 3,2 %, con una aportación de 0,6 Mtoe (2018). El gas de coque ha reducido su participación igualmente, aportando un 9,2 % de la energía final por carbón, lo que supuso una contribución de 1,9 Mtoe (2018). El sistema se completa con gas de alto horno, que aportó 3,0 Mtoe (2018), suponiendo un 15,0 % de la energía final empleada entre las de tipo carbón.

RUSIA

El sistema energético cubierto mediante carbón en Rusia presenta notables diferencias respecto al resto de países, dado que este combustible no se consume en el sector eléctrico en ningún momento de la serie histórica, estando su empleo circunscrito a los sectores industrial, comercio, residencial y primario. Entre los citados sectores destaca el industrial, donde se hace más presente, pero también es notable en el residencial, donde el carbón de tipo bituminoso aportó 1,4 Mtoe (2018) y el lignito 0,29 Mtoe (2018). Estas cantidades suponen una notable reducción de las registradas en 1990, donde se consumieron 9,9 Mtoe de bituminoso, 1,0 Mtoe de lignito, más una aportación de 0,58 Mtoe de *BKB*, combustible este, cuyo empleo fue abandonando a lo largo de la serie histórica hasta que dejó de aportar energía en 2001 [8].

El sector comercio, ha visto reducida su necesidad de energía procedente del carbón, bajando de los 20,58 Mtoe (1990), aportados de manera exclusiva por carbón de tipo bituminoso, hasta 0,54 Mtoe (2018) obtenidos mediante bituminoso (0,48 Mtoe) y lignito (0,06 Mtoe).

El sector primario, ha reducido su pequeño consumo de carbón a lo largo de la serie histórica, hasta consumir en 2018 una cantidad de 0,03 Mtoe de carbón bituminoso más 0,01 Mtoe de lignito.

Es el sector industrial el que presenta una participación considerable de carbón, donde su uso se ha ampliado desde los 14,56 Mtoe (1990), hasta los 24,96 Mtoe (2018), sobre todo en lo que se refiere al *coke oven coke*, combustible que pasó de aportar 0,29 Mtoe (2011) a 12,0 Mtoe (2012), lo que representa ampliar su entrega energética a lo largo de la serie histórica en un 177,7%.

La *Figura 2.2.1.8* muestra la evolución del consumo de combustibles de tipo carbón, donde destaca el aumento en el empleo del carbón genérico a partir de 2012, compuesto para el caso de Rusia por *coke oven coke* exclusivamente. Este combustible representa el 61,5 % del aporte energético mediante carbón al sistema energético industrial ruso.

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

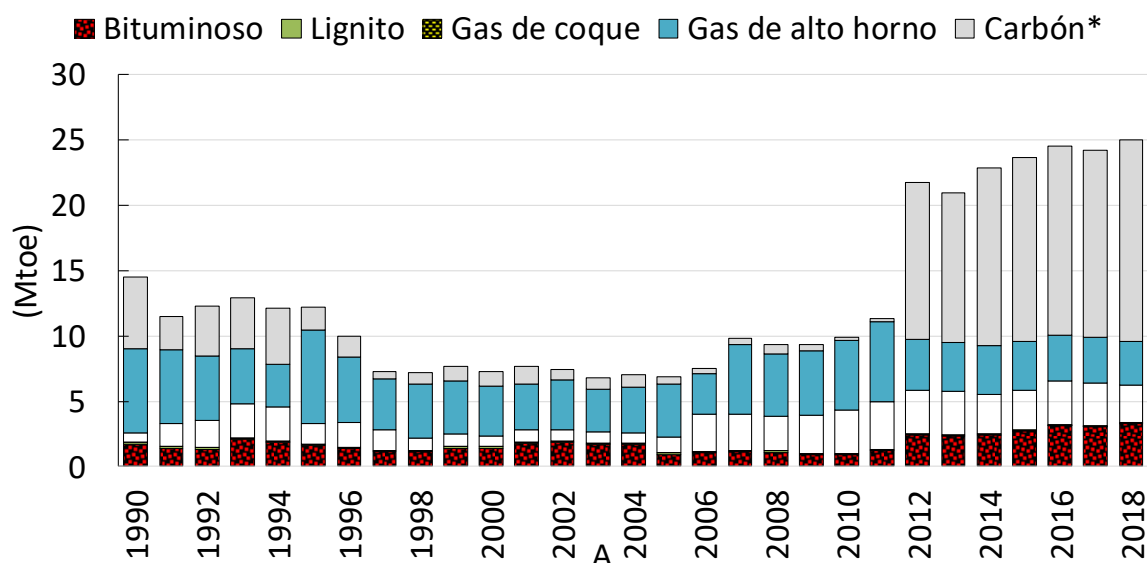


Figura 2.2.1.8: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El resto de elementos de tipo carbón no alcanzan esta representación, destacando el de tipo bituminoso con una aportación de 3,27 Mtoe (2018), lo que supone un 89,4 % de aumento en su empleo a lo largo de la serie histórica. El gas de alto horno, que ha venido reduciendo su empleo hasta aportar 3,39 Mtoe (2018), lo que ha supuesto una reducción en su empleo de 46,8%. El gas de coque ha crecido también de manera notable, alcanzando un aumento en su aporte energético del 282,3 % a lo largo de la serie histórica, creciendo especialmente en el año 2006. Este combustible aportó 2,9 Mtoe (2018) y representa el 11,6 % de la aportación energética mediante carbón en 2018.

El lignito no alcanza a poder apreciarse en la gráfica al aportar una cantidad muy baja de energía, cifrada en 0,04 Mtoe (2018).

2. ENERGÍA

JAPÓN

En Japón no se registran consumos de carbón a lo largo de la serie histórica estudiada en los sectores primario, residencial o transporte, siendo la única aportación al margen de la generación eléctrica y el sector industrial, una escueta participación en el abastecimiento de energía al sector comercio, donde carbón de tipo *coke oven coke* es quemado para la generación de energía desde 2007. Aun registrándose un pequeño aumento en el consumo, la cantidad de energía aportada en el sector comercio, mediante carbón, se concentra en 2018 en carbón bituminoso (0,07 Mtoe) y *coke oven coke* (0,10 Mtoe).

El sistema eléctrico japonés se nutre de carbón como fuente de energía, que aportó en 2018 una cantidad de 65,2 Mtoe, donde ha llegado después de una evolución al alza desde los 26,4 Mtoe que precisaba el sector en 1990. El principal tipo de carbón empleado en su mix es el bituminoso, con una cuota de participación entre los tipos de carbón cifrada en el 98 % (2018). Completan el mix un 1,9 % de gas de coque más una leve participación de *coke oven coke* del 0,1%. En la primera etapa de la serie histórica estudiada, se registraba consumo de elementos de tipo carbón como el gas de alto horno, el *coal tar*, pero su empleo finalizó en 1991 en el caso del gas de alto horno, siendo el año 2002 el último del empleo para el caso del *coal tar*.

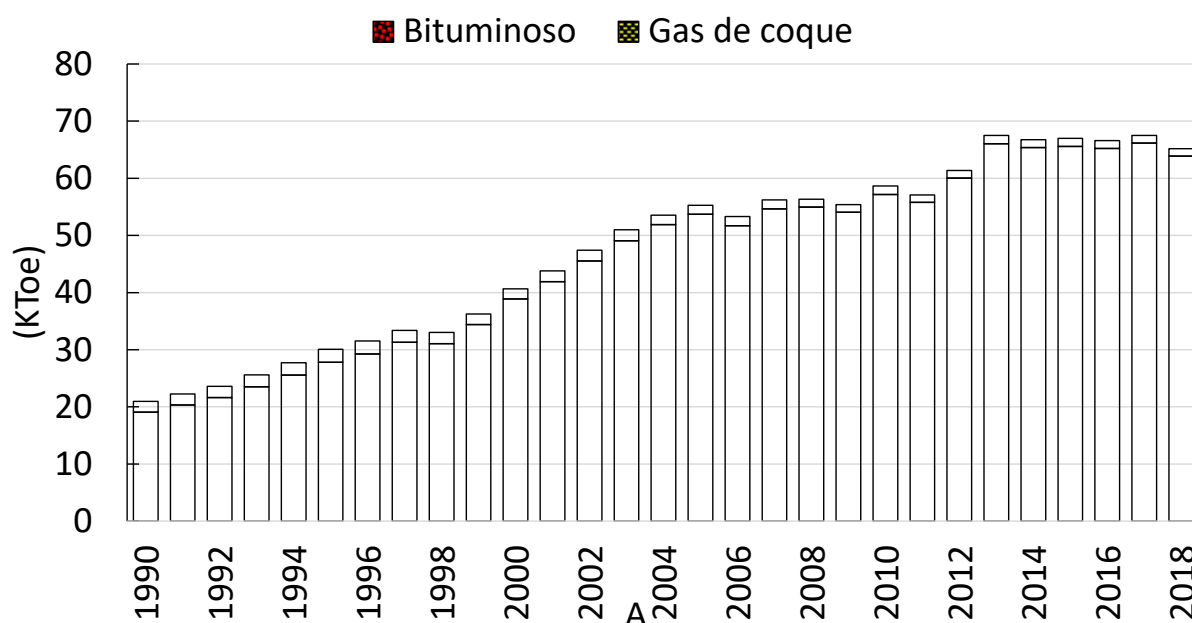


Figura 2.2.1.9: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

La *Figura 2.2.1.9* muestra la evolución del empleo de cada tipo de carbón, destacando la participación casi exclusiva del carbón de tipo bituminoso.

El sector industrial precisa igualmente de una participación de energía procedente de la combustión de elementos de tipo carbón. La *Figura 2.2.1.10* muestra la evolución de su empleo, pudiéndose apreciar el descenso acaecido a lo largo de la serie histórica, donde su participación ha descendido hasta aportar 19,4 Mtoe (2018), partiendo de un aporte energético en 1990 de 24,7 Mtoe. En cuanto a la participación de los diferentes tipos de carbón, es el bituminoso el más empleado, registrándose una participación de este elemento del 50,1 % (2018). El resto de elementos que completan el aporte para el citado año son, el gas de alto horno con un 21,0 %, el gas de coque con un 20,0% y el *coke oven coke* con un 8,9 %.

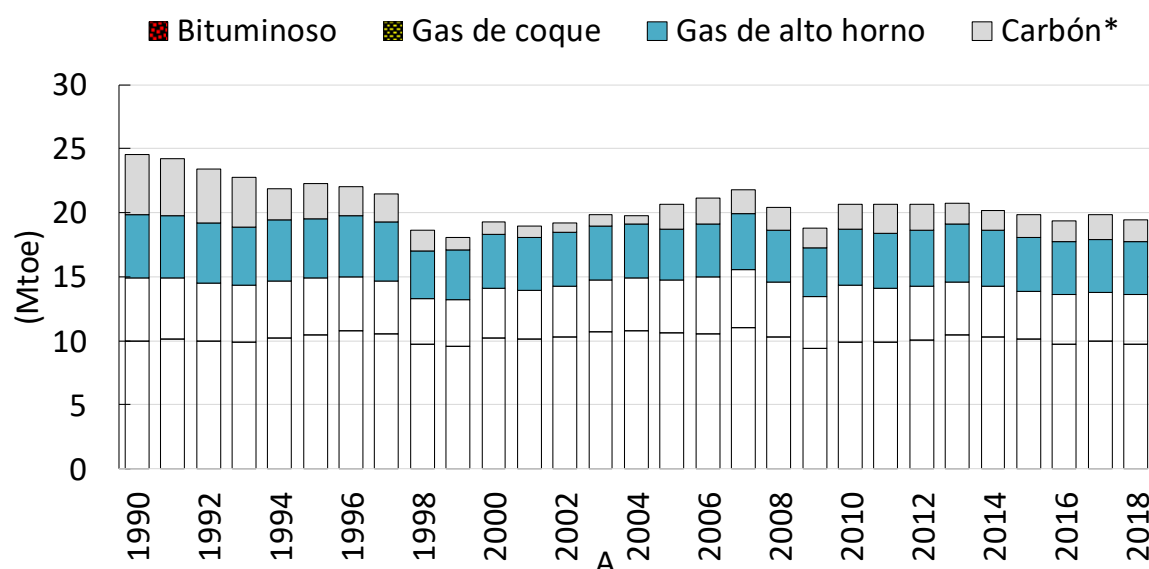


Figura 2.2.1.10: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2. ENERGÍA

INDIA

Para abastecer su demanda, India extrae y procesa en su territorio el equivalente a 287,5 Mtoe (2019), siendo precisa la importación desde el exterior de 132,1 Mtoe (2019) para completar el requerimiento energético [8].

Aun siendo un combustible muy empleado por el país asiático, no se ha empleado carbón en la serie temporal estudiada en el sector primario, siendo el consumo en el sector servicios acotado entre los primeros datos de este estudio y 1997, donde se terminó con el empleo de este combustible en forma de bituminoso, descendiendo su empleo desde los 2,19 Mtoe (1990). Caso contrario es el sector comercio, donde se continúa quemando carbón de tipo bituminoso, aportando 4,63 Mtoe (2018), presentando un consumo regular a lo largo de toda la serie histórica.

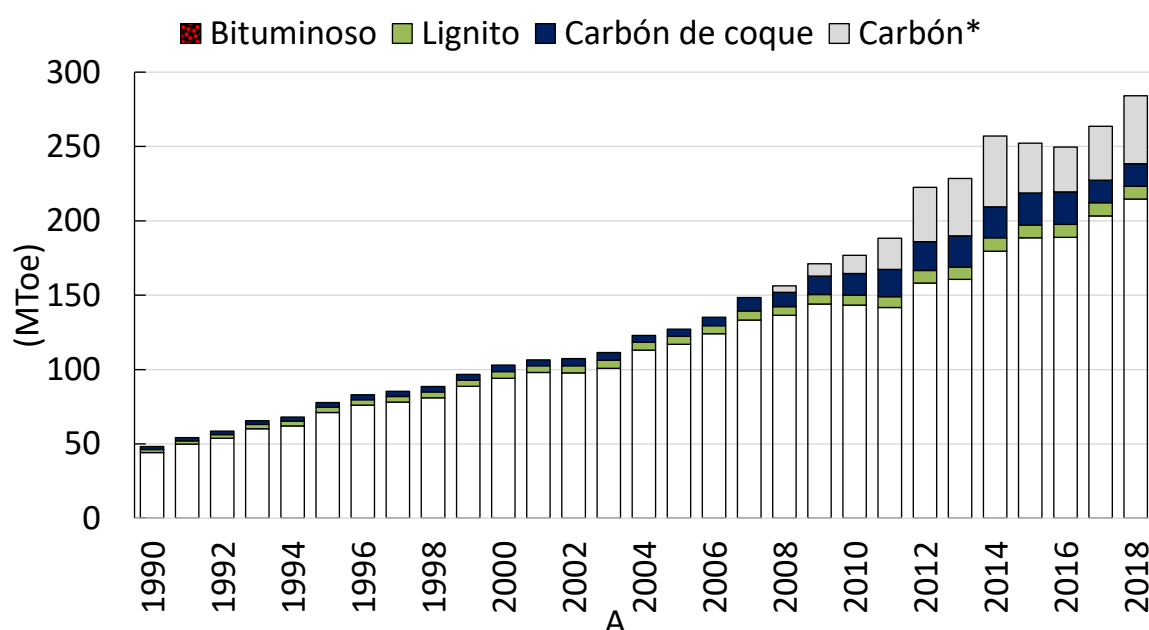


Figura 2.2.1.11: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción eléctrica en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector residencial, consume igualmente una importante cantidad de carbón de tipo bituminoso. El carbón, aportó una energía primaria equivalente de 2,70 Mtoe (2018), casi en su totalidad contribuida mediante la energía aportada por carbón de tipo bituminoso, más una leve aportación de BKB con un aporte equivalente de 0,22 Mtoe (2018). Igual que

2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón

el caso del comercio, el sector residencial ha mantenido un consumo estable en lo que a la energía aportada por el carbón se refiere, dado que registraba 2,74 Mtoe (1990).

El sistema que genera energía para el sector eléctrico se muestra en la *Figura 2.2.1.11*, pudiéndose apreciar el gran aporte energético que este combustible aporta al sistema indio. Como se puede apreciar en la figura, la base del aporte la realiza el carbón de tipo bituminoso, con una cuota de participación entre los elementos de tipo carbón del 75,3 % (2018), siendo el resto de elementos participantes, el lignito con un 3,0 % (2018), el carbón de coque con un 5,3 % (2018) y el de tipo sub-bituminoso, introducido en el mix en 2008, tipificado en este estudio como carbón genérico, que cuenta con una participación del 16,0 % (2018). Existe una pequeña participación de carbón de tipo gas de coque que completa el mix empleado en el sector eléctrico.

El sistema de generación energética en la industria precisa la energía del carbón igualmente, registrándose un fuerte aumento en su empleo a partir de 2003. Esta creciente aportación ha evolucionado desde los 24,4 Mtoe (1990), hasta aportar 94,2 Mtoe (2018).

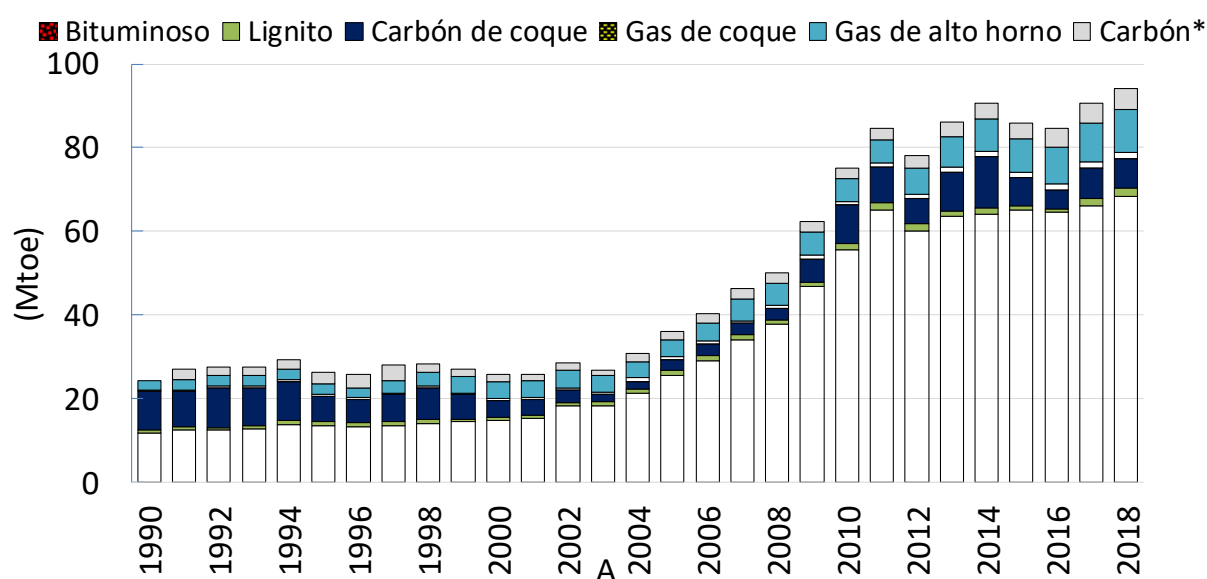


Figura 2.2.1.12: Evolución de la energía primaria obtenida mediante carbón para la producción industrial en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

La *Figura 2.2.1.12* muestra la evolución a lo largo de la serie histórica del empleo de este combustible y en ella se puede apreciar la importante participación del carbón bituminoso, que ha escalado de una participación en el mix de carbón del 48,3% (1990), a participar en un 73,7 % (2018), lo que le confiere un papel clave en el sector industrial.

2. ENERGÍA

El resto de elementos empleados en el sector industrial indio lo componen el lignito, el carbón de coque, el gas de coque, el gas de alto horno y el carbón genérico, compuesto para el caso de India por *coke oven coke* y *gas work gas*.

Entre los elementos más empleados se encuentra el gas de alto horno, que participó en un 10,8 % (2018), el carbón de coque, que contribuyó con un 7,3 % (2018). A estos elementos se debe sumar la energía aportada por el *coke oven coke* con un 5,3 % (2018), lignito con un 2,1 % (2018), más una leve cantidad de *gas work gas* que completa el mix.

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

Para atender a la demanda energética cubierta mediante derivados del petróleo, este trabajo mostrará únicamente las figuras de consumos más relevantes por país, centrados, en los sectores residencial y transporte, sectores que presentan un mayor consumo en todos los países estudiados. Aun así, se describirán cada uno de los consumos registrados en los distintos sectores productivos estudiados. Para mejor descripción visual de la información a mostrar se ha optado por el uso de dos tipos de figuras. Por un lado, para representar el consumo energético en los hogares, más estable a lo largo del tiempo, he optado por la representación de modo columnas apiladas, dado que el consumo total de energía es uno de los indicadores que ayudan a la comprensión y a la comparación de las distintas economías, percibiendo con facilidad la tendencia y el valor del consumo total de energía aportada por el conjunto de los derivados analizados. Por otro lado, para la representación del consumo en el sector transportes, donde se registran entre países diversas preferencias en el empleo de combustibles y se reconocen cambios en dichas tendencias, he optado por la representación desagregada de cada uno de los combustibles, para de esta manera facilitar la visualización de las variaciones en el consumo individual, atendiendo de un modo más preciso al dato que considero más relevante para el presente estudio.

Al igual que el apartado anterior, para realizar un análisis más detallado, se estudiará a los derivados del petróleo como elementos desagregados en los tipos más representativos empleados por cada país. Así, se empleará un coeficiente de emisión medio para designar a aquellos empleados de manera residual, aplicando para los más destacados su coeficiente individual publicado por la EPA [66]. Esta diferenciación de combustibles atiende a las profundas diferencias en su uso y al diferente coeficiente de emisión de CO₂. Los combustibles analizados son:

Gasoil, combustible líquido refinado empleado mayoritariamente en motores diésel y calefacción. Compuesto principalmente por parafinas, presenta una densidad media de 850 kg/m³. Su poder calorífico es de 43,1 MJ/kg, presentado un nivel de emisión de CO₂ de 2,973 kgCO₂/koe [66].

Gasolina, destilado del petróleo, empleado principalmente en motores de combustión interna con encendido por chispa. Compuesto por hidrocarburos individuales, este combustible presenta una densidad media de 720 kg/ m³, muy inferior a la del gasóleo, pero con un poder calorífico de 48,31 MJ/kg. El factor de emisión de este combustible es inferior al diésel, situándose en los 2,789 kgCO₂/koe [66].

Nafta, es una destilación directa del petróleo utilizada como materia prima en la industria petroquímica, donde se emplea fundamentalmente como disolvente, pero también para producir derivados de la gasolina con gran octanaje. Elemento altamente volátil, presenta

2. ENERGÍA

un poder calorífico de 44.4 MJ/kg. Este elemento presenta un nivel de emisión de 2,871 kgCO₂/koe [66].

Queroseno, elemento transparente compuesto por mezcla de hidrocarburos, empleado como combustible y en la fabricación de insecticidas. Este elemento presenta una densidad de 820 kg/m³, lo que lo hace más ligero que el gasoil. El poder calorífico de este compuesto es de 45 MJ/kg, siendo su nivel de emisión típico de 2,984 kgCO₂/koe [66].

Jet queroseno, también denominado combustible de aviación o ATF. Dada su baja temperatura de congelación y su excelente ignición, es el elemento apropiado para el empleo en aeronaves. Su densidad oscila entre 775 a 840 kg/m³, dependiendo del tipo de combustible que puede variar desde los Jet A y Jet A-1 a los de empleo militar. La energía de este compuesto es de 43,02 MJ/kg, presentando un nivel de emisión de 2,866 kgCO₂/koe [66].

Gas licuado del petróleo, también conocido por GLP, es una mezcla de gases licuados que pueden provenir del gas natural o de los procesos del refinado del petróleo, siendo sus compuestos principales el propano y el butano. Este producto es fácilmente licuable, presentando una densidad de 584 kg/m³. El poder calorífico de este combustible es de 48 MJ/kg, siendo su emisión resultante de 2,449 kgCO₂/koe [66].

CHINA

Para cubrir su demanda energética, el gigante asiático precisa de numerosas fuentes derivadas del petróleo, esto le obliga a importar una cantidad de crudo equivalente a 505,7 Mtoe (2019), dado que su producción interna para el citado año solo alcanzaba los 191,3 Mtoe [8]. Aun así, el país consume una ingente cantidad de derivados de petróleo a lo largo de los sectores económicos que componen su economía, destacando el consumo en el transporte y el realizado en el sector residencial.

El sector residencial, dada la necesidad energética que presenta, es mostrado en la *Figura.2.2.2.1*, donde se muestra la evolución del sector a lo largo de la serie estudiada. Con un aporte energético inicial de 2,28 Mtoe (1990), el sector ha crecido hasta alcanzar una demanda de 37,13 Mtoe (2018), lo que le lleva a posicionarse como segundo demandante en consumo de derivados del petróleo por sectores. El aporte energético a este sector es realizado únicamente por tres combustibles, gas licuado del petróleo (GLP), queroseno y gasoil, aunque se registró un pequeño aporte en el año 1990 de fueloil (0,16

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

Mtoe), no apreciándose un nuevo consumo a lo largo de la serie histórica de este combustible. Los combustibles más demandados han ido evolucionando, así, el queroseno ha ido perdiendo representación, hasta solo aportar en 2018 un 0,77 % de la energía del petróleo en el sector.

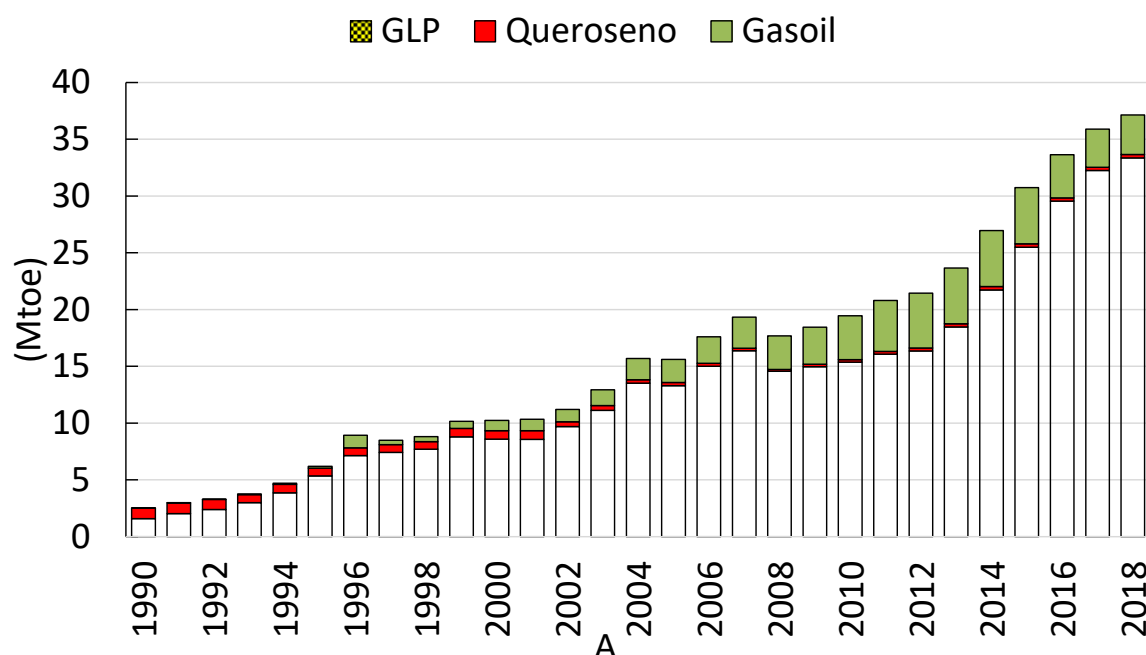


Figura.2.2.2.1: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en China en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector transporte con una necesidad energética de 283,18 Mtoe (2018), es el principal sector por consumo de combustibles derivados del petróleo. En la serie estudiada, estos consumos se han disparado presentando una demanda similar tanto en gasoil como en gasolina, combustible este último que en los últimos años estudiados ha reemplazado al diésel como principal derivado del petróleo.

Por combustibles, el sistema chino, precisa una cantidad equivalente de gasolina de 126,40 Mtoe (2018), seguida por la aportación realizada por el gasoil de 124,69 Mtoe (2018). El consumo para la aviación hace que el Jet queroseno deba cubrir una demanda de 23,22 Mtoe (2018), así como el fueloil que presenta una subida en la primera mitad de la serie histórica, para registrar un máximo de 8,88 Mtoe (2006). Alcanzado este máximo, la aportación de este combustible ha ido reduciéndose, aunque aún contribuía con 7,36 Mtoe (2018).

2. ENERGÍA

El GLP se está introduciendo en el mercado chino en los últimos años, creciendo tenuemente en su participación, aunque su consumo aún es muy bajo en comparación con los otros derivados del sector, estando su necesidad cifrada en 1,51 Mtoe (2018).

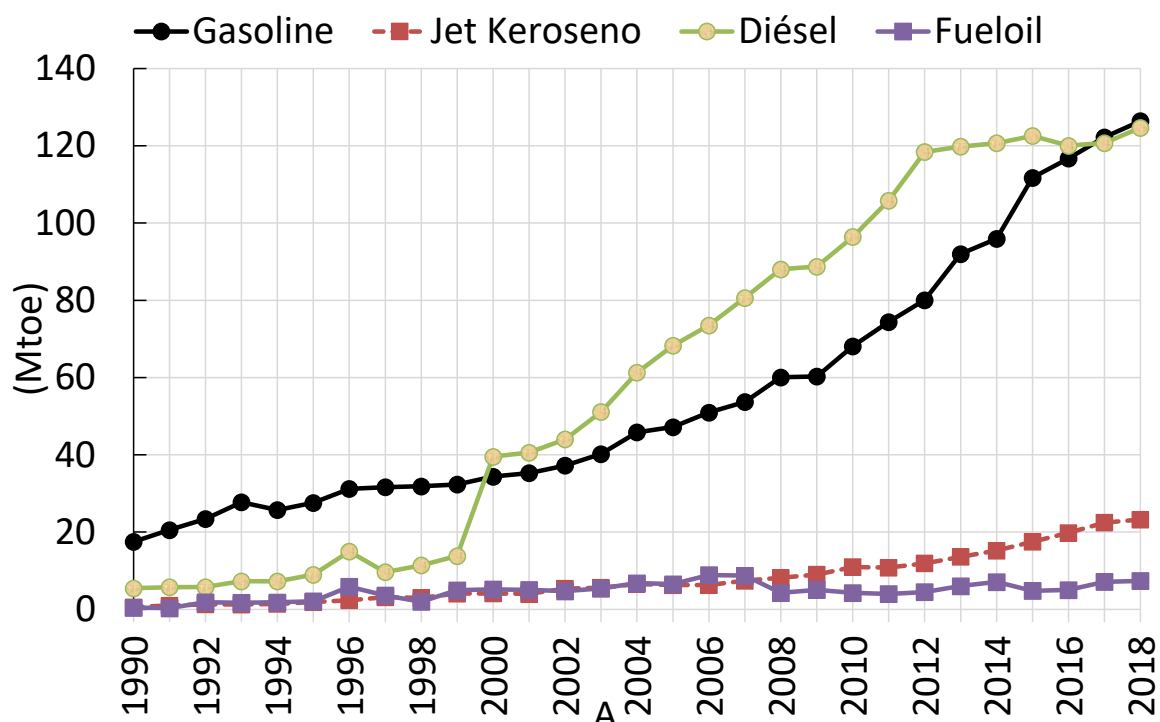


Figura.2.2.2 2: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en China en el sector transporte. IEA (International Energy Agency) [8].

El consumo en el resto de sectores está encabezado por el circunscrito en la industria, donde el empleo de derivados de petróleo ha crecido a lo largo de la primera mitad de la serie histórica estudiada, partiendo con una contribución de 18,76 Mtoe (1990), registrándose el máximo en 2008, donde la necesidad energética de derivados del petróleo era cubierta con 35,4 Mtoe. La necesidad energética en la segunda mitad ha registrado una bajada lo que la ha llevado a alcanzar un aporte de 24,44 Mtoe (2018). En este sector los principales derivados empleados en 2018 fueron, el gasoil, con una participación del 64,4 %, el gas licuado del petróleo (GLP) con un 23,1 %, el fueloil con una participación del 11,7 %, más una pequeña participación de queroseno, que completa el mix de los refinados del petróleo.

El sector primario precisó en 2018 de una energía procedentes de derivados del petróleo equivalente a 18,5 Mtoe, siendo el combustible más demandado el gasoil, con un 86,6 %

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

del total. A este combustible le sigue la gasolina con un aporte de energía del 12,8 %. Es destacable la introducción paulatina del GLP, presente en el sector primario desde 2004. Este combustible ha subido su participación hasta representar el 0,4 %. El sector recibe pequeñas cantidades de energía aportada por queroseno y fueloil que completan el mix.

El sector comercio ha precisado de una cantidad de energía en ascenso, lo que lo ha llevado a pasar de los 4,42 Mtoe (1990), alcanzando una demanda de 15,7 Mtoe (2018). Los principales subproductos que abastecían la demanda en 2018 fueron el gasoil con una aportación de 11,4 Mtoe, el GLP con 2,1 Mtoe, el fueloil con un aporte de 1,26 Mtoe y el queroseno que cierra los integrantes del mix de los derivados del petróleo para este sector, con un aporte de 1,04 Mtoe.

2. ENERGÍA

EEUU

El mercado americano precisaba en 2019 de una cantidad anual de crudo de 981,61 Mtoe, con lo que se cubría la demanda de sus refinerías, que abastecen la totalidad de derivados consumidos en el país y el de sus reservas estratégicas. Esta necesidad se materializaba mediante la extracción en su territorio de 762,87 Mtoe, más la importación de 383,89 Mtoe [8].

Entre sectores, es el residencial el tercero en consumo, registrando una disminución en sus necesidades de derivados del petróleo a partir de 2002. La *Figura 2.2.2.3* muestra la evolución de este sector, pudiéndose apreciar el gran aporte que realiza el diésel, cifrado para el final de la serie en un 67,0% (2018). Igualmente, el sector precisa de GLP para abastecer su demanda, aportando este combustible una energía equivalente a 4,3 Mtoe (2018). El queroseno es un derivado que está dejando de aportar energía en el sector, aun así, un 1,04% de la energía necesaria para el citado año se obtenía mediante el citado combustible.

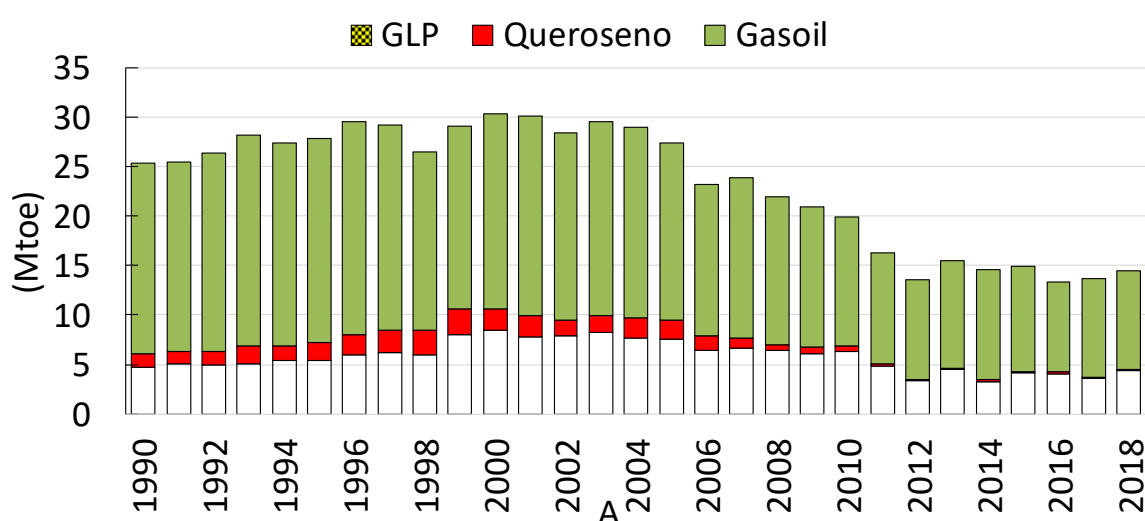


Figura 2.2.2.3: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en EEUU en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector comercio es el que presenta menor consumo, precisando 10,71 Mtoe (2018), lo que supone una reducción frente a los primeros años de la serie estudiada, donde era necesaria una cantidad de energía de 21,06 Mtoe (1990). Entre los combustibles de mayor desempeño se encuentra el gasoil, que aporta un 66,1 % de la energía que precisa el sector

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

en 2018, seguido por la gasolina con un 16,0%, el GLP con un 12,8 %, el fueloil con un 4,8 % y el queroseno con una pequeña aportación del 0,3% hasta completar la totalidad del mix en el sector.

Es el sector transporte el de mayor demanda en EEUU, habiendo registrado esta demanda un periodo en el que ha estado en constante crecimiento, entre los años 1990 a 2005, donde se originó el máximo nivel de consumo alcanzando los 567,7 Mtoe (2005). Desde este momento la demanda ha ido bajando ligeramente hasta alcanzar los 547,5 Mtoe (2018). A diferencia de Europa, el combustible base en el sector transportes es la gasolina, que suple el 64,1 % de la demanda del transporte, seguido por un aporte de 140,2 Mtoe de diésel, que ocupa el 25,6 % del sector. A diferencia del consumo de gasolina, el diésel ha incrementado tímidamente su aportación en los últimos años. El jet queroseno ha ampliado su aportación al mix, situándose en una cantidad equivalente de 55,2 Mtoe (2018), lo que representa un 10,0 % del sector. Curiosamente el fueloil se ha incrementado en los últimos años, aportando 0,83 Mtoe (2018), partiendo de una cifra inicial de 0,34 Mtoe (1990). La introducción del GLP en el transporte es prácticamente nula en EEUU, con una aportación que se ha visto reducida desde los 0,36 Mtoe (1990), hasta los 0,06 Mtoe (2018).

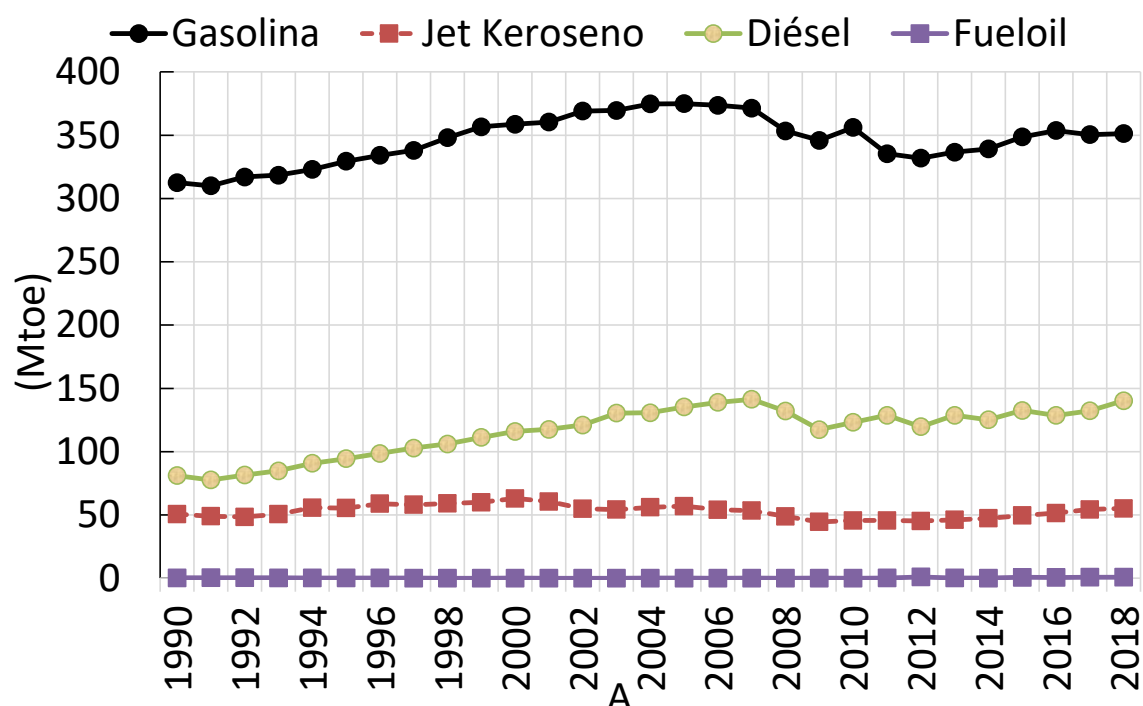


Figura 2.2.2.4: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en EEUU en el sector transportes. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2. ENERGÍA

El sector industrial ha evolucionado reduciendo el consumo de derivados de petróleo, siendo el consumo de 17,8 Mtoe (2018). Para este sector, el consumo inicial era de 42,6 Mtoe (1990). Entre los derivados destaca el consumo del diésel, con un aporte al mix de 14,2 Mtoe (2018), consumo que se ha mantenido constante a lo largo de la serie histórica. La verdadera bajada en el consumo la ha supuesto la reducción en el empleo de fueloil, GLP y gasolina. El fueloil ha reducido su uso desde los 19,6 Mtoe (1990) hasta los 0,6 Mtoe (2018). De manera similar, se han reducido el empleo del GLP con un aporte de 2,7 Mtoe (2018), cuando se consumían 12,6 Mtoe (1990) y de la gasolina con un aporte inicial de 2,5 Mtoe (1990), viéndose reducida su aportación hasta los 0,3 Mtoe (2018). El queroseno, aunque no se emplea al final de la serie histórica, se ha venido empleando hasta 2011. Este combustible ha registrado una mínima aportación al sistema, con un máximo aportado de 0,7 Mtoe (2007).

El sector primario ha mantenido un consumo constante a lo largo de la serie estudiada, comenzando la serie con un consumo de 13,9 Mtoe (1990), para alcanzar un consumo de 13,7 Mtoe (2018). El principal derivado empleado es el diésel, con una aportación al sector entre los derivados del petróleo del 57,6% (2018). A este combustible principal hay que sumar la aportación igualmente estable de la gasolina, que aporta al sector un 29,1 % (2018), el GLP con un consumo para el mismo año del 13,3 %. El fueloil está presente en el mix, pero su participación es muy escasa, llegando a participar con un 0,01 % (2018), completando el mix en lo que se refiere al sector.

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

UNIÓN EUROPEA

La Unión producía en 2019 únicamente el equivalente a 76,6 Mtoe de crudo, por lo que debido a su amplia demanda debe importar 590,2 Mtoe (2019). Lo que genera una fuerte dependencia en lo referente a este sector energético [8].

Entre sectores son claramente el sector transportes y el residencial los que precisan de mayor cantidad de refinados de petróleo. En concreto, el sector residencial precisó de 29,5 Mtoe (2018), lo que representa una importante caída en el consumo, dado que al comienzo de la serie temporal eran precisas 58,5 Mtoe (1990). El consumo está encabezado por el diésel, que es el combustible que cubre un 76,1 % (2018) de la demanda en lo que se refiere al consumo residencial.

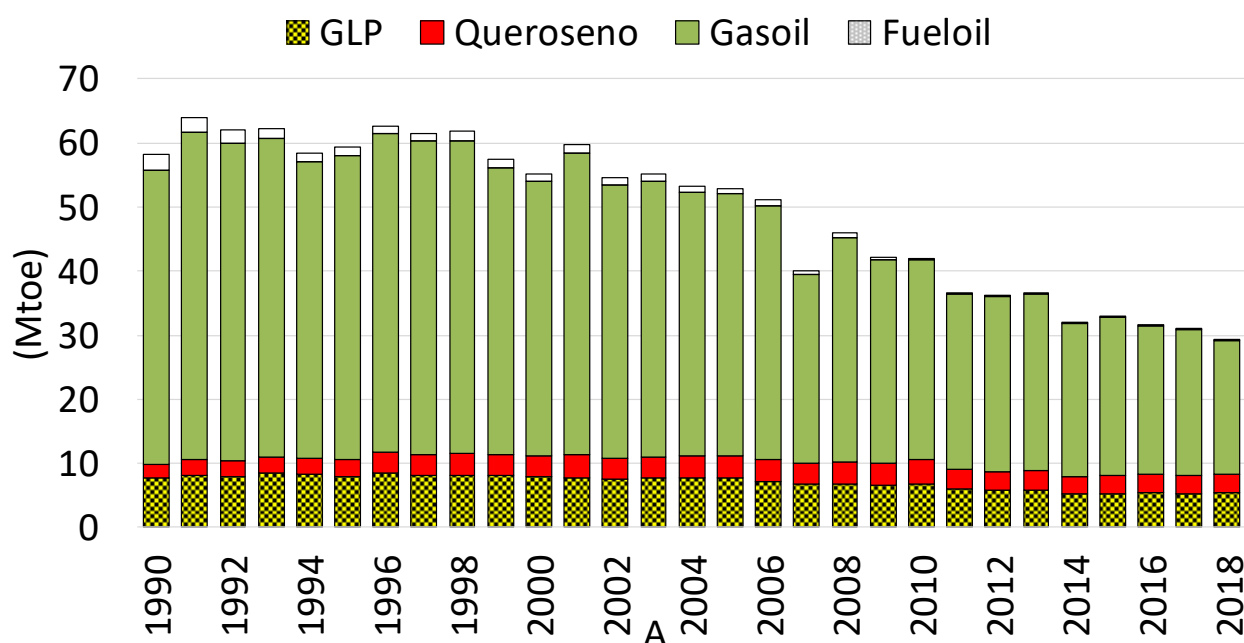


Figura.2.2.2.5: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en la Unión Europea en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Como se aprecia en la *Figura 2.2.2.5* el consumo dentro del sector residencial de queroseno, ha permanecido estable, registrándose una demanda de 2,89 Mtoe (2018), similar a la consumida en años anteriores. El fueloil ha caído en su demanda hasta ser prácticamente retirado del mix, cayendo desde un consumo de 2,46 Mtoe (1990), hasta escuetamente contribuir con 0,008 Mtoe (2018). El consumo en GLP no ha sufrido el mismo

2. ENERGÍA

nivel de descenso que el descrito para el diésel, pero su aportación también ha disminuido hasta aportar 5,5 Mtoe (2018). El consumo de gasolina en el sector residencial ha permanecido estable, con una aportación residual de 0,3 Mtoe (2018).

En cuanto al sector transportes, el consumo energético ha evolucionado al alza a lo largo de la serie temporal, encabezado de nuevo por el gasoil, que desbancó a la gasolina en 1997 como principal fuente de energía en el sector transportes, aportando 205,8 Mtoe (2018), lo que supone un 70,0 % del sector. Como se aprecia en la *Figura 2.2.2.6* el siguiente combustible en importancia es la gasolina, que aportó 74,7 Mtoe (2018), lo que suponía un 25,4 % del sector. El fueloil ha caído en su empleo hasta el año 2014, desde donde se han registrado tímidas subidas en su empleo, que registró un consumo equivalente de 1,4 Mtoe (2018). El jet queroseno mantiene una leve tendencia alcista, posicionándose en un consumo equivalente para el citado año de 6,9 Mtoe. El GLP ha escalado introduciéndose en el mercado, alcanzando un consumo de 5,5 Mtoe (2018).

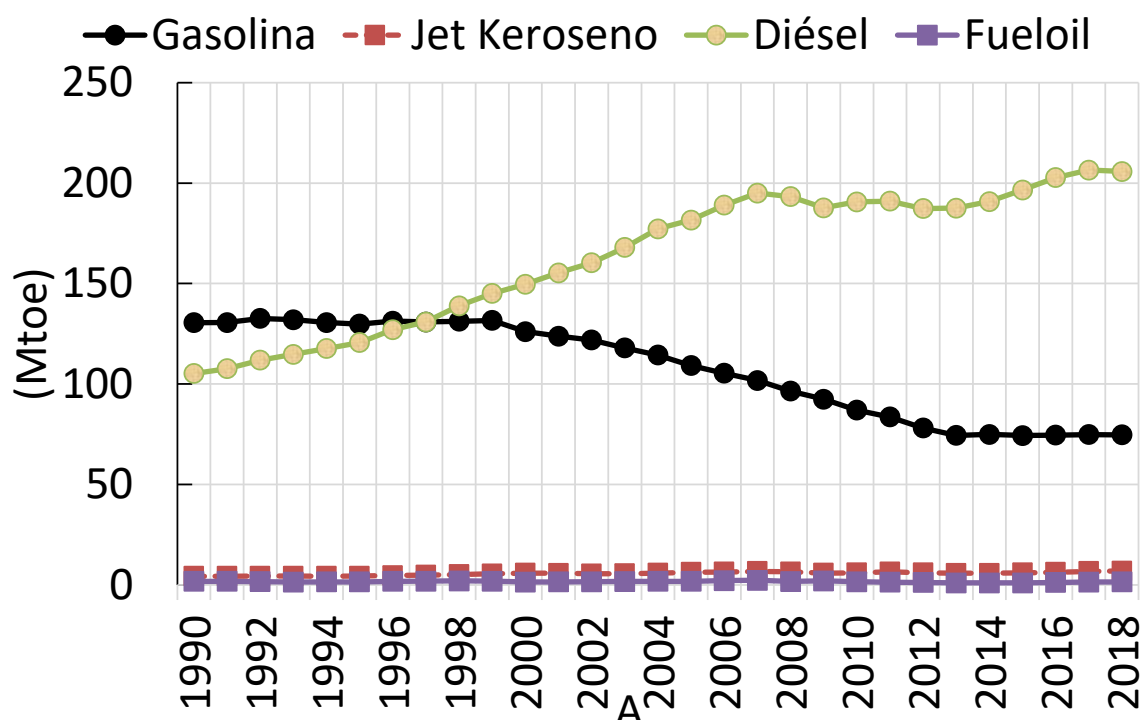


Figura.2.2.2.6: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en la Unión Europea en el sector transportes. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El industrial es el tercer sector en importancia, teniendo como elemento base de nuevo al gasoil. Este derivado aporta la demanda del 57,0 % del sector industrial, aportando 10,1

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

Mtoe (2018). El fueloil es el segundo elemento en importancia con un aporte de 3,3 Mtoe (2018), aunque su consumo se ha visto reducido notablemente desde su aportación al comienzo de la serie histórica de 32,6 Mtoe (1990), donde era la base del sector con un 62,0 % de la demanda.

El sector comercio precisa de 12,7 Mtoe (2018), lo que supone una reducción con respecto a los 58,5 Mtoe (1990), que precisaba el sector. De igual manera el combustible base es el diésel con un 76,1 % de la demanda del comercio.

El sector primario consume 17,1 Mtoe (2018), que aporta principalmente el gasoil, con un 92,0 % de la demanda del sector. Este sector ha permanecido estable en cuanto a sus requerimientos de derivados del petróleo, bajando ligeramente su demanda desde los 20,7 Mtoe (1990).

2. ENERGÍA

RUSIA

La situación de la Federación Rusa en lo referente al consumo de combustibles a partir del petróleo es distinta al resto de países evaluados por este documento, ya que Rusia extrae y produce la totalidad del crudo que abastece sus sectores económicos, permitiéndose además exportar una gran cantidad de crudo al exterior. De esta manera para el año 2019 se extrajeron y procesaron el equivalente a 563,68 Mtoe, de los cuales se exportaron 270,51 Mtoe a terceros países, destinando para consumo de su propia economía 294,74 Mtoe [8].

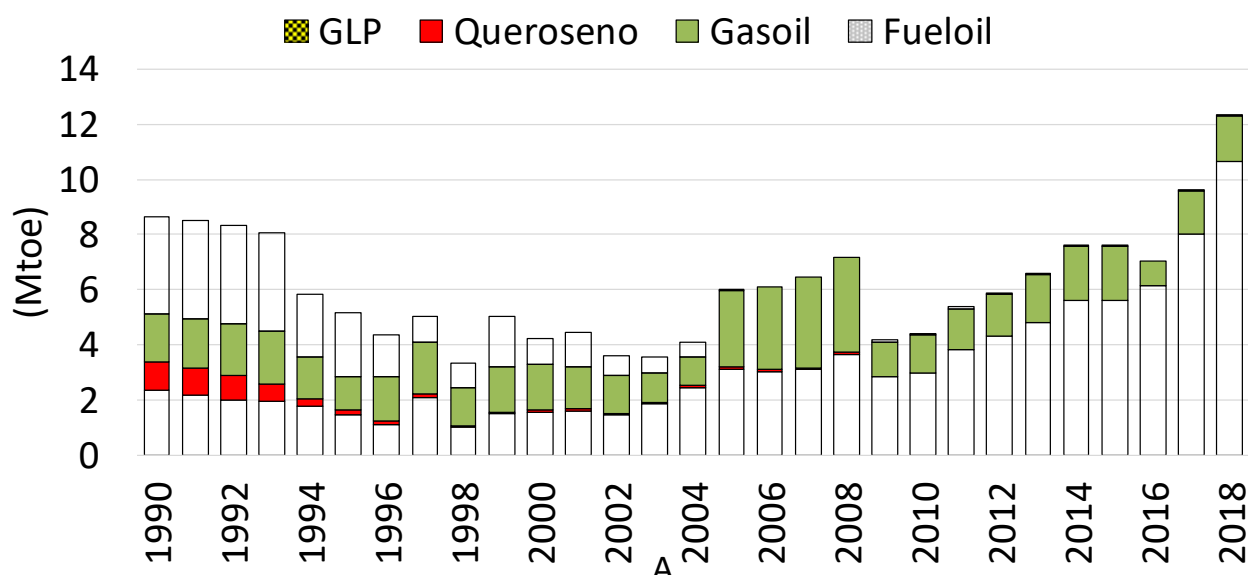


Figura.2.2.2.7: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Rusia en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Esta situación permite a la Federación obtener una energía barata a partir de crudo, extendiéndose su empleo a todos los sectores económicos estudiados, destacando como en el resto de países analizados las demandas en los sectores transporte y residencial. Es el consumo en el ámbito residencial el mostrado por la *Figura.2.2.2.7*, que permite apreciar la evolución del empleo de los combustibles en el sector. El fueloil, que fue el más empleado al comienzo de la serie histórica donde aportaba 3,52 Mtoe (1990), ha sido relevado por otros combustibles hasta participar de una manera insignificante, dado que simplemente aportó 0,01 Mtoe (2018). El queroseno, que participaba ampliamente en el mix del sector, aportando 1,06 Mtoe (1990), fue bajando su aporte hasta quedar eliminado

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

en 2009, donde dejó de contribuir en el aporte energético al sector servicios. El diésel, ampliamente empleado por todas las economías, ha presentado un comportamiento en dos fases, la primera experimentando un aumento en su demanda, hasta 2008, para después reducir su participación hasta ocupar el 13,3 % (2018). El avance ha sido realizado mediante la energía obtenida por el GLP, derivado que ocupa el 86,6 % del sector al final de la serie histórica.

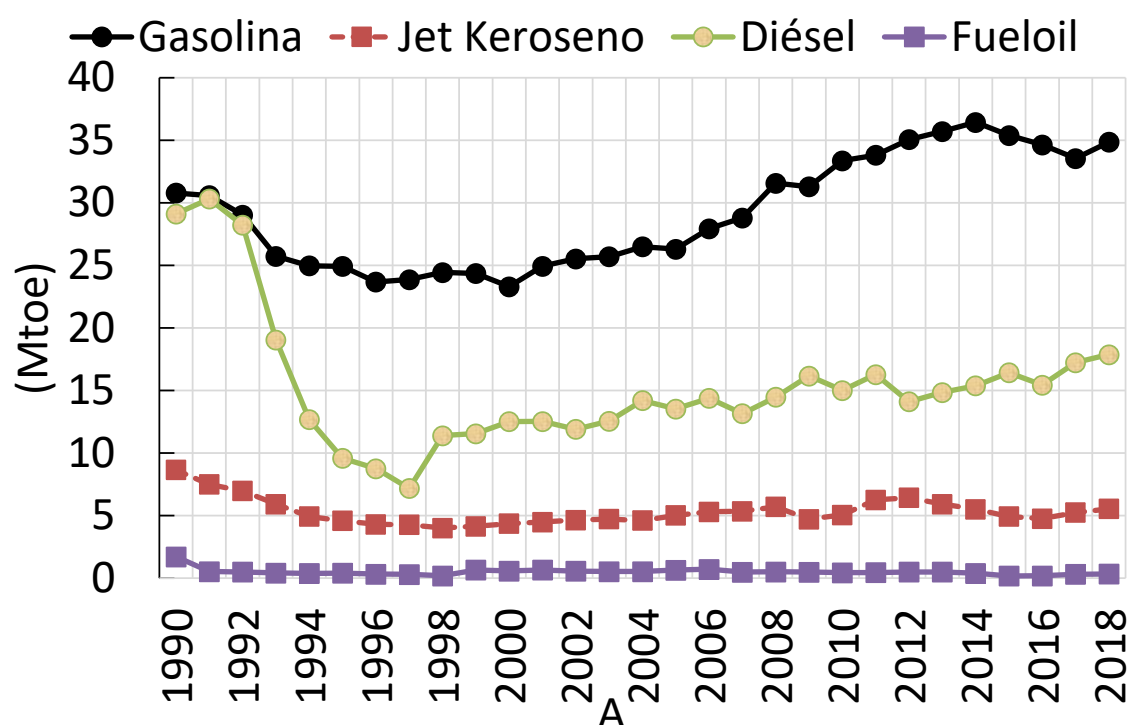


Figura.2.2.2 8: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Rusia en el sector transporte. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El transporte ocupa el primer lugar en lo que a consumo se refiere. Este sector precisaba para atender a la demanda una totalidad de 59,3 Mtoe (2018). Esta energía es aportada principalmente por gasolina, mostrando una tendencia distinta a la Unión Europea y similar a la americana donde se ha apostado por este combustible para cubrir la demanda energética del sector de la automoción. La cantidad de energía entregada por la gasolina asciende a 34,8 Mtoe (2018), lo que supone un 58,6 % del total del sector. El gasoil aportaba para el citado año una cantidad de 17,9 Mtoe, lo que representaba una participación del 30,0 %, seguido por el jet queroseno con una aportación de 5,5 Mtoe. El sector aun precisa de fueloil, aunque la tendencia en el empleo de este combustible es negativa, por lo que

2. ENERGÍA

su aporte energético es de 0,3 Mtoe. Cabe destacar la introducción del GLP, que asciende en su participación proporcionando 0,79 Mtoe (2018).

El sector industrial precisa de un aporte equivalente a 5,5 Mtoe (2018), aportados principalmente por el diésel que para el citado año contribuía con 4,5 Mtoe. Este combustible es la base del aporte energético en el sector, aunque al final de la serie temporal, se dan consumos residuales de GLP y fueloil, únicos combustibles empleados significativamente, siendo sus aportaciones para el citado año de 0,34 y 0,70 Mtoe respectivamente.

El diésel, fueloil y GLP son los únicos combustibles empleados en los sectores comercio y primario, aportando una totalidad de 2,2 y 3,5 Mtoe (2018) respectivamente, participados mayoritariamente en ambos casos por el diésel.

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

JAPÓN

El Estado del Japón extrajo únicamente para 2019 una cantidad de crudo equivalente a 0,43 Mtoe, de manera que, para abastecer su demanda para el citado año debió importar 148,5 Mtoe. Esta situación hace del Estado del Japón una economía con fuerte dependencia en lo referente al petróleo, dada la extendida presencia de este combustible en la totalidad de sectores [8].

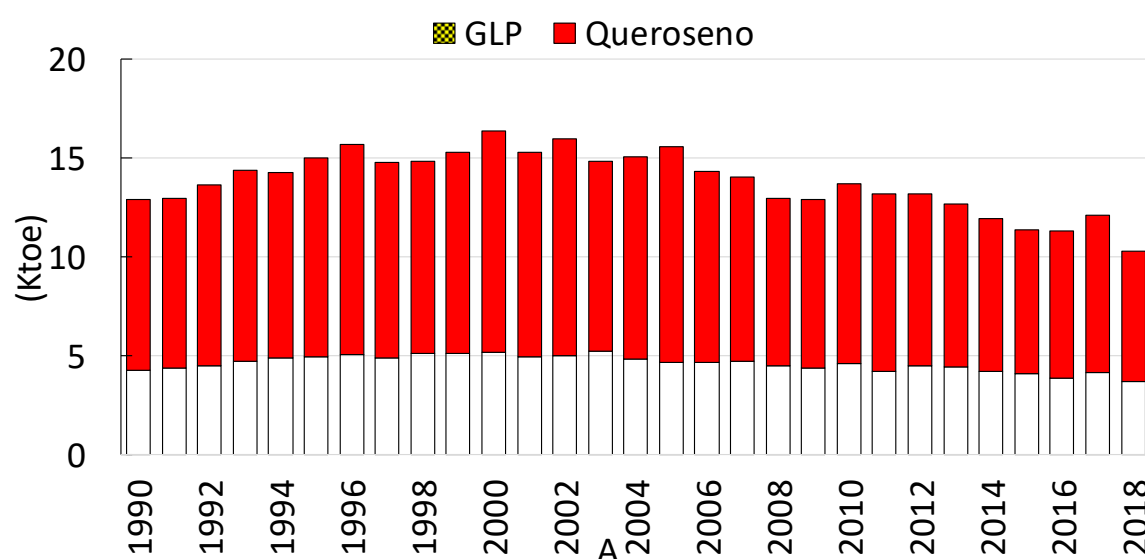


Figura.2.2.2.9: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Japón en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector residencial es mostrado en la *Figura.2.2.2.9*, donde se puede apreciar la caída en la demanda de los dos únicos destilados de petróleo empleados en el sector. Así, el consumo original de 12,9 Mtoe (1990), se vio en un principio ampliado hasta el máximo registrado de 16,4 Mtoe (2000), para caer posteriormente hasta los 10,3 Mtoe (2018). Como se aprecia en la figura, el queroseno es el principal combustible, aportando 6,6 Mtoe (2018), mientras que el resto era cubierto por GLP.

Es el sector transporte el que al igual que el resto de economías muestra mayor consumo, dividido este en dos partes diferenciadas, la primera con una tendencia al alza en el consumo, lo que le permitió escalar desde el aporte de 67,4 Mtoe (1990), hasta el máximo nivel de consumo de 84,2 Mtoe (2001). Desde ese momento, el consumo se ha moderado hasta caer a cifras inferiores a las iniciales, alcanzando los 65,4 Mtoe (2018). Como en la economía americana y rusa, el mayor consumo se registra en la gasolina, siendo este

2. ENERGÍA

combustible la base del transporte en el país asiático. En la *Figura 2.2.2.10* se puede apreciar la tendencia en el consumo de combustibles derivados del petróleo. En ella no consta, por su escasa relevancia, la contribución al sector del GLP, que participa de manera ascendente en el sector, aportando 0,72 Mtoe (2018). Para ese año, la gasolina con tendencia descendente, aporta 36,6 Mtoe, mientras que el consumo de gasoil permanece estable en los últimos años de la serie, manteniendo una aportación de 22,7 Mtoe. El jet queroseno aporta 3,3 Mtoe (2018), mostrando una tendencia estable, mientras que el fueloil denota una ligera caída en su demanda, contribuyendo al sector para el citado año con 2,1 Mtoe.

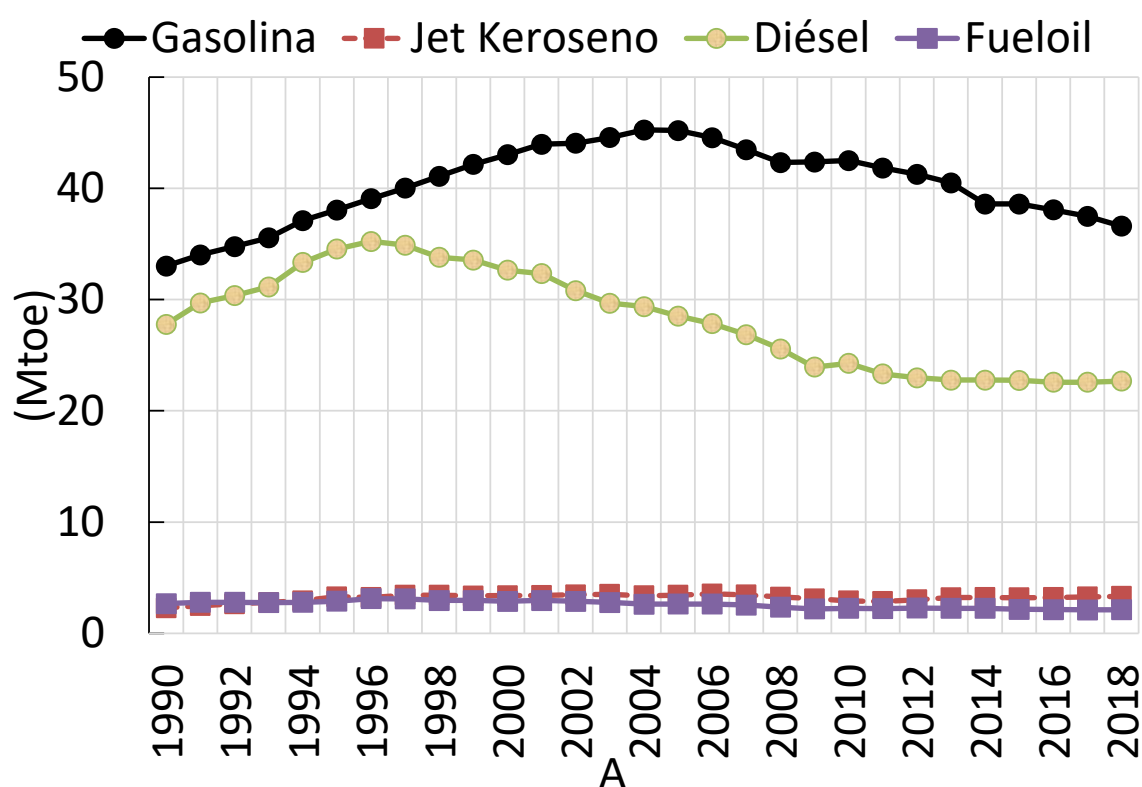


Figura 2.2.2.10: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en Japón en el sector transporte. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector industrial ha caído fuertemente en su demanda, reduciéndose desde los 35,6 Mtoe (1990) a los 14,1 Mtoe (2018). Entre combustibles destaca la nafta, curiosamente la base en lo que a derivados del petróleo se refiere. Este combustible aporta 5,9 Mtoe (2018), lo que le hace superar al diésel que aporta 4,7 Mtoe, para el mismo año. El fueloil continúa aportando 1,6 Mtoe (2018), muy por debajo de los 11,1 Mtoe (1990), siendo

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

paulatinamente reemplazado en el mix. Se reduce igualmente el consumo en GLP y queroseno, que aportan 0,73 y 1,1 Mtoe (2018) respectivamente.

Los sectores primario y comercio, presentan descensos en su consumo similares, reduciéndose hasta 4,2 y 9,9 Mtoe (2018), respectivamente, lo que los hace los sectores con menor demanda. Entre los combustibles con mayor participación el diésel vuelve a ser la base de ambos sectores. El queroseno es empleado de manera notable, aportando 2,8 y 0,5 Mtoe (2018) entre los sectores comercio y primario respectivamente.

2. ENERGÍA

INDIA

India produce una pequeña parte del crudo que precisa, en concreto, la producción equivalente de India fue de 37,7 Mtoe (2019), mientras que, para abastecer su consumo, el país asiático tuvo que importar 231,9 Mtoe (2019), lo que supone como en otros casos estudiados, una sociedad con fuerte dependencia exterior en cuanto a cubrir su demanda de petróleo [8].

La demanda de productos derivados del petróleo está presente a lo largo de los sectores económicos del país, habiéndose ampliado su requerimiento en la totalidad. Este consumo es especialmente importante, como en el resto de los casos estudiados con la excepción del presentado por EEUU, en el sector transporte y el sector residencial. El sector residencial en este país ha experimentado un enorme auge en su consumo, subiendo este desde los 10,3 Mtoe (1990) a los 25,0 Mtoe (2018). La *Figura 2.2.2.11* muestra la evolución del sector, donde se tasan los dos únicos destilados de petróleo empleados, el GLP, que paulatinamente ha reemplazado al queroseno. El GLP, muestra una evolución ascendente y aporta 21,7 Mtoe (2018), lo que supone un 87,0 % de la energía del sector.

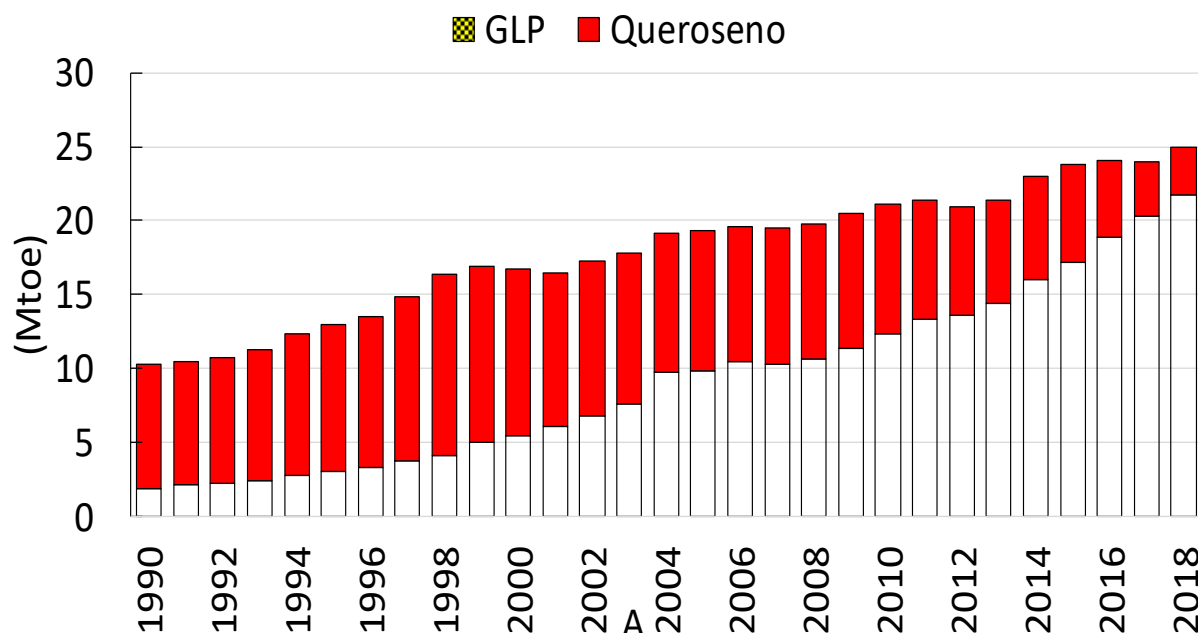


Figura 2.2.2.11: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en India en el sector residencial. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.2.2 Demanda cubierta mediante derivados del petróleo

El consumo de GLP es superior en zonas urbanas, donde se emplea en un 47,96 % de los hogares, destacando Delhi con un empleo de 68 % (2001). Este empleo se reduce en zonas rurales. Este combustible es preferido como medio para cocinar en los hogares indios, dados los beneficios que aporta su buena combustión, accesibilidad, buena relación entre su costo y la durabilidad de los equipos necesarios para su empleo [70].

El sector transporte presenta un consumo superior de diésel, asemejándose al consumo preferente registrado en la Unión Europea. La industria automotriz de la India es una de las más grandes del mundo, aportando el 7,1% al PIB [71]. Comprar un vehículo es una principal prioridad en India para las personas que aumentan sus ingresos, hasta ser una necesidad poseer un coche. Actualmente, se permite el 100% de Inversión Extranjera Directa (IED) en esta área, lo que implica que los inversores extranjeros no necesitan ningún permiso previo del gobierno de la India. Las ventas de los vehículos particulares crecieron un 9,17%, los vehículos comerciales 3,03% y los de 2 ruedas un 8,29% durante el periodo abril-enero 2017. India se ha convertido en el quinto mercado más grande de vehículos de pasajeros, después de China, Estados Unidos, Japón y Alemania, esto gracias a que la venta de vehículos de pasajeros creció un 9,24%, lo que supone 3,04 millones durante 2016-17, con la tasa de crecimiento más rápida vista desde 2010-11, cuando crecieron un 28,2% [71].

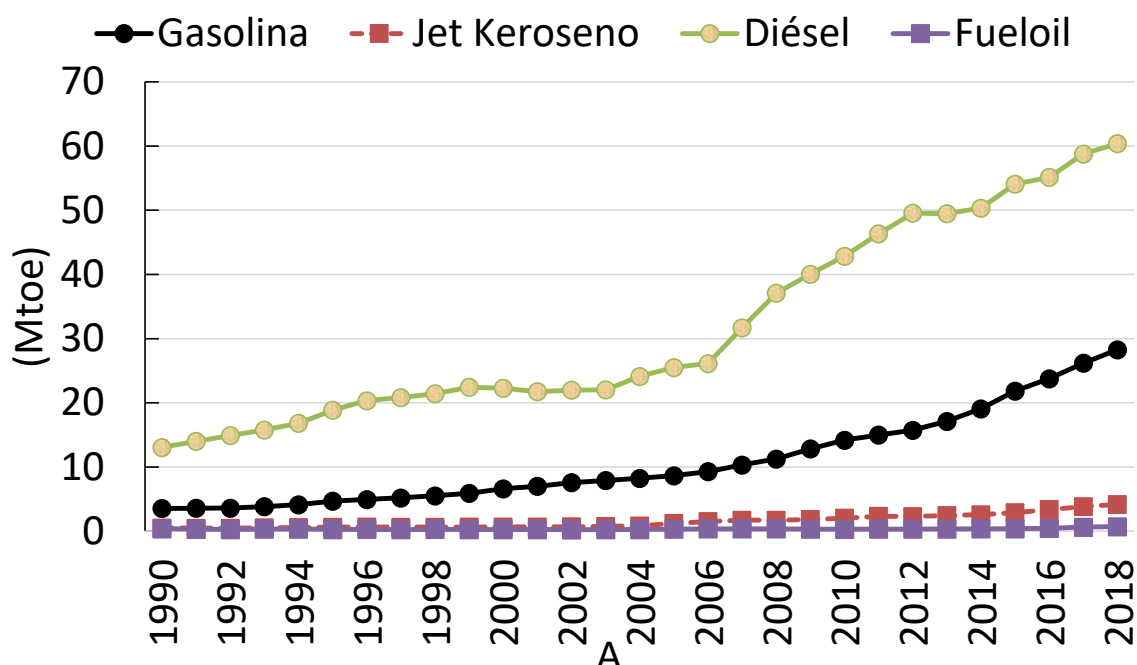


Figura.2.2.2 12: Evolución de la energía por derivados del petróleo consumida en India en el sector transporte. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2. ENERGÍA

Estos factores han propiciado el rápido crecimiento en la demanda del sector, que precisa del aporte de una energía equivalente de 60,4 Mtoe (2018), suministrada por el diésel, lo que lo hace representar un 64,4 % del sector. La demanda de gasolina también está en aumento, registrándose un consumo equivalente a 28,9 Mtoe (2018), lo que hace que este combustible cubra el 30,2 % de la demanda del sector. El jet queroseno, con demanda creciente, ha aportado 4,2 Mtoe para el citado año. El GLP en el sector transporte no se emplea significativamente hasta 2004, donde aportó 0,05 Mtoe. Su consumo ha ido aumentando en los últimos años, hasta posicionarse en 0,18 Mtoe (2018). Existe un pequeño consumo de fueloil que completa la totalidad del sector. Este consumo igualmente ha venido aumentando en los últimos años hasta aportar 0,7 Mtoe (2018).

En cuanto al resto de los sectores, es el industrial el que precede al de transporte y al residencial. El consumo anual se fijaba en 14,3 Mtoe (2018), después de un incremento acontecido a lo largo del periodo estudiado, dado que partía de 7,9 Mtoe (1990). Los principales derivados que componen el sector son la nafta, el GLP, el diésel y el fueloil. Este último combustible supuso la base de los empleados al comienzo de la serie temporal, pero su empleo ha sido sustituido por el diésel y la nafta, que aportan 6,0 y 4,7 Mtoe (2018), respectivamente. El GLP en el sector industrial muestra una pequeña participación, representando únicamente un 1,4 % del sector.

El sector primario ha aumentado sus necesidades desde los 4,1 Mtoe (1990) a los 10,6 Mtoe (2018). El consumo de GLP comenzó en 2009 y se muestra residual, alcanzando únicamente una aportación al mix de 0,02 Mtoe (2018). El principal combustible empleado es el diésel, con un aporte de 10,4 Mtoe (2018), propiciando un 98,0 % de la energía demandada por el sector. La demanda final queda cubierta con una escasa aportación mediante fueloil, que abastece hasta la totalidad de la energía demandada por el sector.

La demanda de derivados de petróleo en el sector comercio era inexistente hasta 2006, donde se empezó a emplear queroseno para suministrar energía al sector, que consumía únicamente 0,05 Mtoe. La incorporación en 2009 del GLP hizo que el sector demandara de manera casi exclusiva este combustible que aporta al final de la serie histórica un 96,0 % (2018) de la energía suministrada al sector por medio de destilados de petróleo. El crecimiento de este sector es notable, consumiendo 2,4 Mtoe (2018).

2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural

El gas natural es un componente vital del suministro mundial de energía. Es una de las fuentes de energía más limpias, seguras y útiles. Este abundante combustible que, en estado natural es incoloro e inodoro, emite una gran cantidad de energía mediante su combustión. En 2011 el Departamento de Energía de EEUU estimó que el gas natural era la fuente de energía de menor coste económico dentro del ámbito doméstico [72]. Todas estas cualidades, lo posicionan como un excelente combustible. Además, el gas natural presenta un bajo factor de emisión de CO₂, que se cuenta en 2,106 kgCO₂/ktoe [65].

La energía aportada por este combustible es cada vez más demandada, aportando además de lo expuesto, su versatilidad, pudiéndose emplear en numerosas aplicaciones, entre las que destaca el empleo doméstico para cocinar, dada la facilidad para controlar la temperatura, la fácil ignición y la fácil limpieza. Otros de sus empleos están asociados a la industria o a la generación de energía eléctrica [72].

El gas natural es una mezcla combustible de gases de hidrocarburos. Este combustible presenta una densidad de 0,657 kg/m³, siendo su poder calorífico de 52 MJ/kg. Si bien el gas natural está formado principalmente de metano, también puede incluir etano, propano, butano y pentano [72]. La composición del gas natural puede variar debido a su procedencia, siendo la típica la mostrada en la *Tabla 2.1*.

Tabla 2.1: Típica composición del gas natural. Fuente naturalgas.org [72].

Componente	Formulación	Porcentaje
Metano	CH ₄	70-90 %
Etano	C ₂ H ₆	0-20 %
Propano	C ₃ H ₈	
Butano	C ₄ H ₁₀	
Dióxido de Carbono	CO ₂	0-8 %
Oxígeno	O ₂	0-0,2 %
Nitrógeno	N ₂	0-5 %
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0-5 %
Gases Nobles	Ar, Xe, Ne, He	Trazas

El gas natural a menudo se asocia con depósitos de petróleo. Una vez extraído del subsuelo, el gas natural se debe refinar para eliminar algunas impurezas entre las que destacan el agua, otros gases, arena y otros compuestos. Algunos hidrocarburos se extraen y venden por separado, incluidos el propano y el butano. También se eliminan otras impurezas, como el sulfuro de hidrógeno. Después del refino, el gas natural limpio se puede licuar y transportar por barco, aunque se tiende a transportar a través de una red de tuberías. Desde estos gasoductos, el gas natural se entrega a su punto de uso, lo que minimiza el impacto ambiental y los costes de transporte [72].

2. ENERGÍA

CHINA

China posee yacimientos propios de gas natural, esto le permite producir 147,4 Mtoe (2019), cantidad que cubre parte de su demanda, haciendo necesaria la importación de 106,4 Mtoe (2019) para cubrir la totalidad, permitiendo incluso la exportación en momentos puntuales, que da como resultado una cantidad de gas natural exportado de 3,0 Mtoe (2019) [8].

En cuanto a la distribución por sectores del empleo de este combustible, la *Figura 2.2.3.1* muestra como es el sector industrial el que requiere mayor aporte, precisando un 38,77 % del gas consumido en el país, lo que supone una contribución final de 65,46 Mtoe (2018).

El sector transporte y la generación eléctrica son sectores que requieren cada vez más cantidad de energía aportada por medio de gas, creciendo en su contribución desde los 0,42 Mtoe (1990), hasta alcanzar los 22,3 Mtoe (2018) para el caso del transporte, que le impulsa a ser el sector que requiere el 13,2 % del gas que se consume en China.

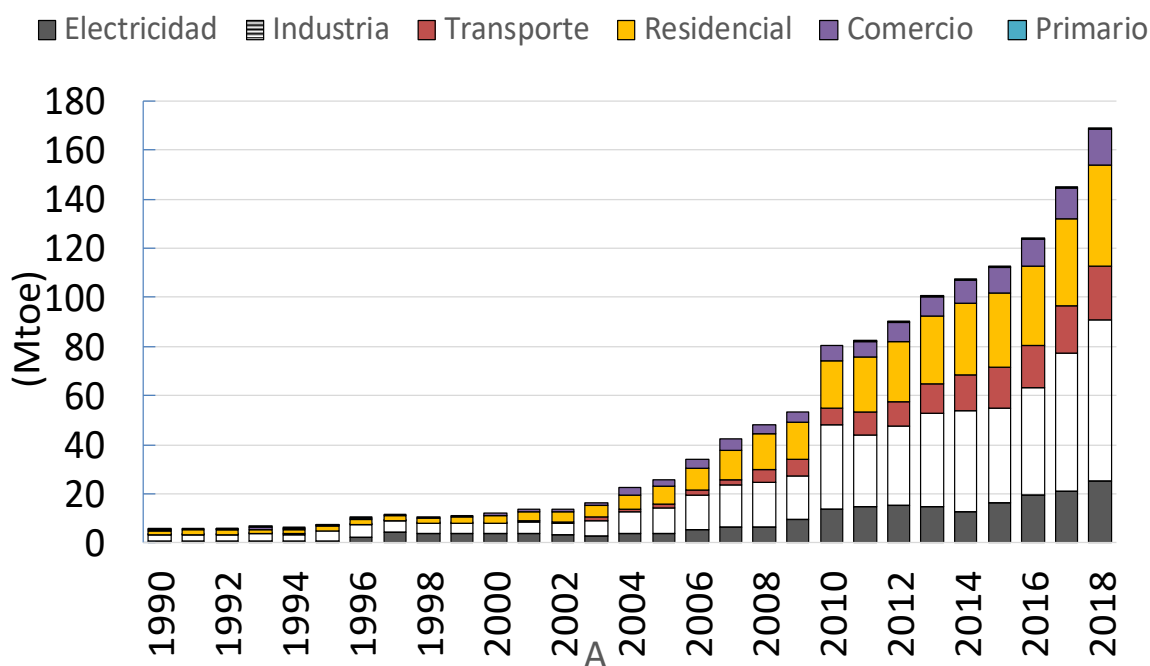


Figura 2.2.3.1: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en China por sectores.
Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural

El consumo de gas en el sector residencial crece igualmente, posicionándose como el segundo sector por demanda de este combustible, cubriendo una demanda de 41,3 Mtoe (2018), evolucionando desde un consumo inicial de 1,7 Mtoe (1990).

El comercio ha registrado un notable incremento en su demanda, pasando de demandar 0,2 Mtoe (1990) a consumir 14,6 Mtoe (2018).

El consumo de gas en el sector primario es muy bajo en China, alcanzando únicamente la energía equivalente de 0,1 Mtoe (2018), registrándose un empleo del combustible a lo largo de la serie histórica, pero con valores inferiores al citado valor.

2. ENERGÍA

EEUU

EEUU dispone de abundantes yacimientos de gas natural en su territorio. Esta razón permitió al país producir una cantidad equivalente a 799,9 Mtoe (2019), con lo que cubría la demanda nacional de este combustible, permitiéndole incluso exportar 109,6 Mtoe (2019) [8].

La evolución del abastecimiento de energía mediante gas natural a los diferentes sectores en EEUU se muestra en la *Figura 2.2.3.2*, en ella se puede apreciar el máximo de consumo registrado, alcanzado en 2018, donde el consumo ascendió en un 10,6 % con respecto al consumo del año anterior.

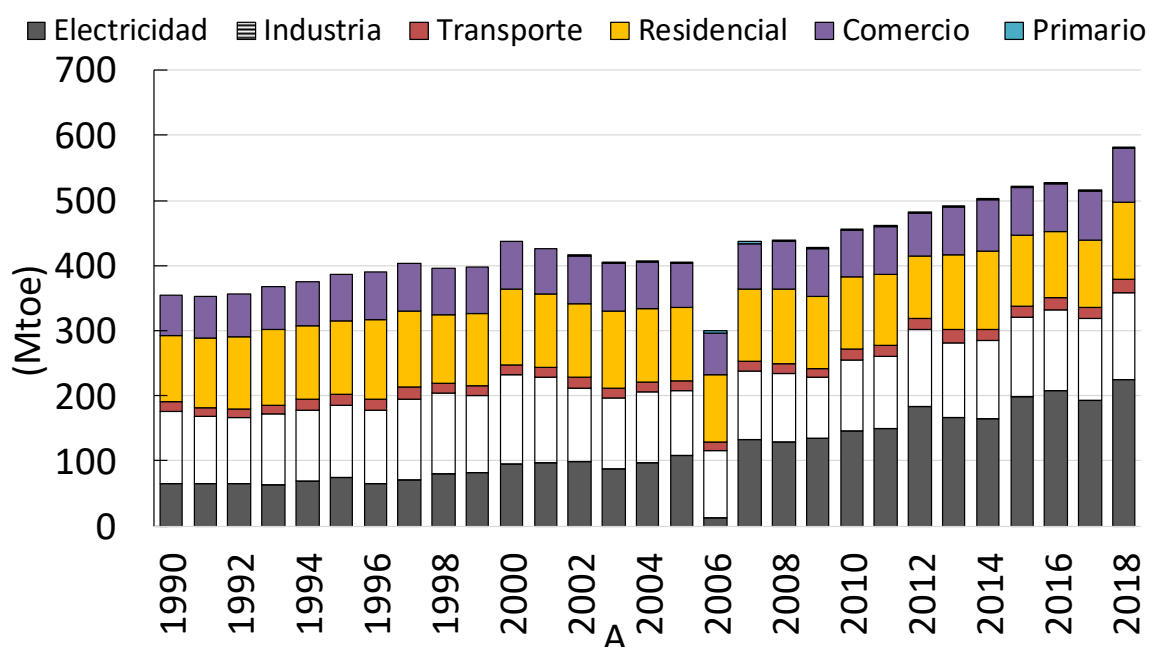


Figura 2.2.3.2: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en Estados Unidos por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Por sectores, es el industrial el segundo por demanda, precisando un 22,98 % del total, lo que supuso una aportación de 133,4 Mtoe (2018). El sector residencial es el tercer consumidor, precisando 117,4 Mtoe (2018), mostrando un consumo estable debido sobre todo a la gran difusión de calefacciones y cocinas que emplean este combustible en el sector residencial. Según la Oficina del Censo de EEUU en su informe Anual 2010

2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural

“Características de las Nuevas Viviendas”, el 54 por ciento de las nuevas viviendas familiares completadas en 2010, usaba gas natural para calefacción [72].

El empleo en el sector comercial y servicio público es también estable a lo largo de la serie histórica, precisando 82,6 Mtoe (2018). Esta circunstancia es debida a que los empleos comerciales del gas natural son muy similares a los usos residenciales. El sector comercial incluye empresas públicas y privadas, como edificios de oficinas, escuelas, hoteles, restaurantes y edificios gubernamentales. Los principales usos del gas natural en este sector incluyen la calefacción de espacios, el calentamiento de agua y la refrigeración. Para los restaurantes y otros establecimientos que requieren instalaciones para cocinar, el gas natural es una opción popular para satisfacer estas necesidades. A partir del año 2003, el sector comercial americano consumió alrededor de $8828,7 * 10^{12}$ Julios de energía al año por medio de gas natural, la mayoría de los cuales se precisó para la calefacción y refrigeración de espacios [72].

El consumo de gas natural en transporte fue de 21,45 Mtoe (2018), lo que equivale un incremento del 39,2 % a lo largo de la serie temporal. Este hecho es debido al consumo que representan los cerca de $150 * 10^3$ vehículos que emplean como combustible gas en EEUU, cantidad que aumenta gracias a los adelantos tecnológicos acontecidos en los últimos años en el rendimiento y eficiencia de los motores, siendo el sector más atraído a esta tecnología, como por ejemplo aquellas flotas de vehículos con grandes consumos de combustible, como pueden ser la de los taxis y la de los autobuses públicos. Por otro lado, existen algunos problemas que hacen que esta tecnología no prolifere, citándose entre los inconvenientes los que representan la limitada autonomía, el mayor coste de adquisición del vehículo, en comparación a los tradicionales y la falta de puntos de reabastecimiento de combustible [72].

El sector primario es el que menos energía demanda por medio de gas natural, precisando únicamente 1,5 Mtoe (2018). Este aporte energético comienza en EEUU a partir de 2002, donde se registró el primer consumo en el periodo estudiado, mostrando éste una tendencia al alza hasta 2008, donde se registró el máximo nivel de consumo con 3,1 Mtoe. Desde ese momento la tendencia del consumo ha mostrado un decremento.

2. ENERGÍA

UNIÓN EUROPEA

La Unión Europea no produce el suficiente gas natural para abastecer su demanda, así solo produjo una cantidad equivalente a 86,1 Mtoe (2019), precisando de importar de terceros países 400,5 Mtoe (2019) [8]. Los principales importadores de gas a la Unión en 2020 fueron Rusia, que representa un 46,8 %, Noruega que aporta un 20,5 %, Argelia con un 11,6 % y EEUU con un 6,3 % [73].

La *Figura 2.2.3.3* muestra la evolución del abastecimiento de energía mediante gas natural en Europa. En ella se puede apreciar el máximo de consumo registrado en 2005, donde el consumo de gas natural alcanzó una energía equivalente a 270,8 Mtoe. A diferencia de otras economías, es el sector residencial el que registra más demanda, alcanzando una cantidad demandada de 102,6 Mtoe (2018).

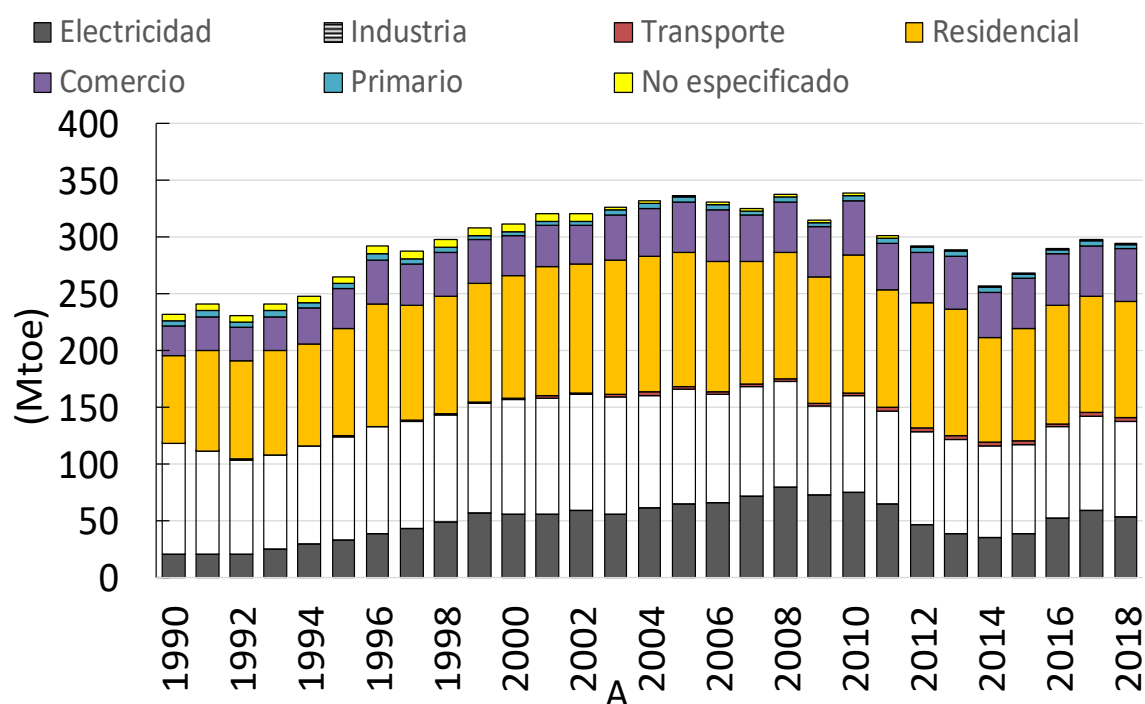


Figura 2.2.3.3: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en la Unión Europea por sectores. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector industrial con una demanda equivalente de 83,9 Mtoe (2018), precede al residencial, siendo el comercio y servicio público el tercer sector, que ha ido escalando de una necesidad de 26,2 Mtoe (1990) a precisar una cantidad equivalente a 46,3 Mtoe (2018).

2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural

Es el consumo en el sector primario el único que no ha registrado una subida, bajando su necesidad de este combustible desde los 5,0 Mtoe (1990), a los 3,6 Mtoe (2018). Caso opuesto es el del sector transporte, que amplía sus necesidades hasta alcanzar los 3,6 Mtoe (2018).

RUSIA

Rusia posee grandes recursos en lo concerniente a gas natural, de esta manera, no precisa importaciones de este combustible para abastecer su economía, mostrando una capacidad para producir 631,5 Mtoe (2019), de los cuales y después de abastecer sus sectores, se exportaron 213,5 Mtoe (2019). Serán las plantas de generación eléctrica y especialmente las plantas de cogeneración de energía las que demanden mayor cantidad de energía mediante gas, alcanzando 155.4 Mtoe (2019) [8].

La *Figura 2.2.3.4* muestra la evolución del consumo, en los distintos sectores económicos estudiados, pudiéndose apreciar en ella, la evolución en la demanda posterior a 2014, que le lleva a registrar un máximo nivel de consumo de 142,2 Mtoe (2018).

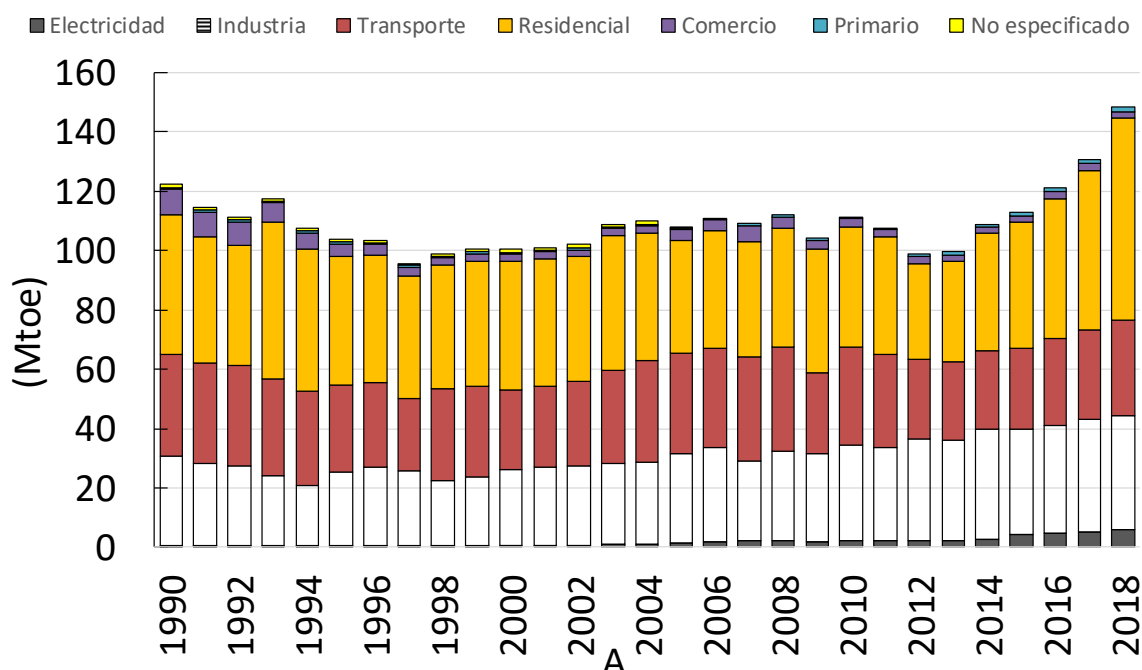


Figura 2.2.3.4: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en Rusia por sectores.
Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2. ENERGÍA

Entre los sectores destaca el consumo registrado en el sector residencial, que consumió una cantidad equivalente a 67,9 Mtoe (2018), lo que significa una demanda del 45,7 % del sector.

El sector industrial con una necesidad equivalente a 38,3 Mtoe (2018) es el segundo sector en importancia de la demanda, habiendo superado los niveles de demanda posteriores a la crisis generada por la desintegración de la antigua URSS.

Es en Rusia donde se registra un mayor abastecimiento mediante gas natural al sector transporte, a diferencia del resto de sociedades estudiadas. Esta demanda registra una tendencia plana a lo largo de la serie histórica, en la que se han precisado cantidades homogéneas equivalentes a 32,3 Mtoe (2018).

2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural

JAPÓN

Japón no posee grandes explotaciones que abastezcan su economía de gas natural, produciendo únicamente 2,09 Mtoe (2019). Esta circunstancia hace que el país asiático precise importar una cantidad de 90,0 Mtoe (2019) [8].

Como se muestra en la *Figura 2.2.3.5* el sector de la generación eléctrica es el de mayor consumo, precisando una cantidad de energía equivalente a 66,8 Mtoe (2018), lo que supone un 69,8 % del sector [8].

El sector industrial crece en su necesidad energética de gas, precisando un aporte equivalente a 11,4 Mtoe (2018), lo que supone un 11,9 % del sector.

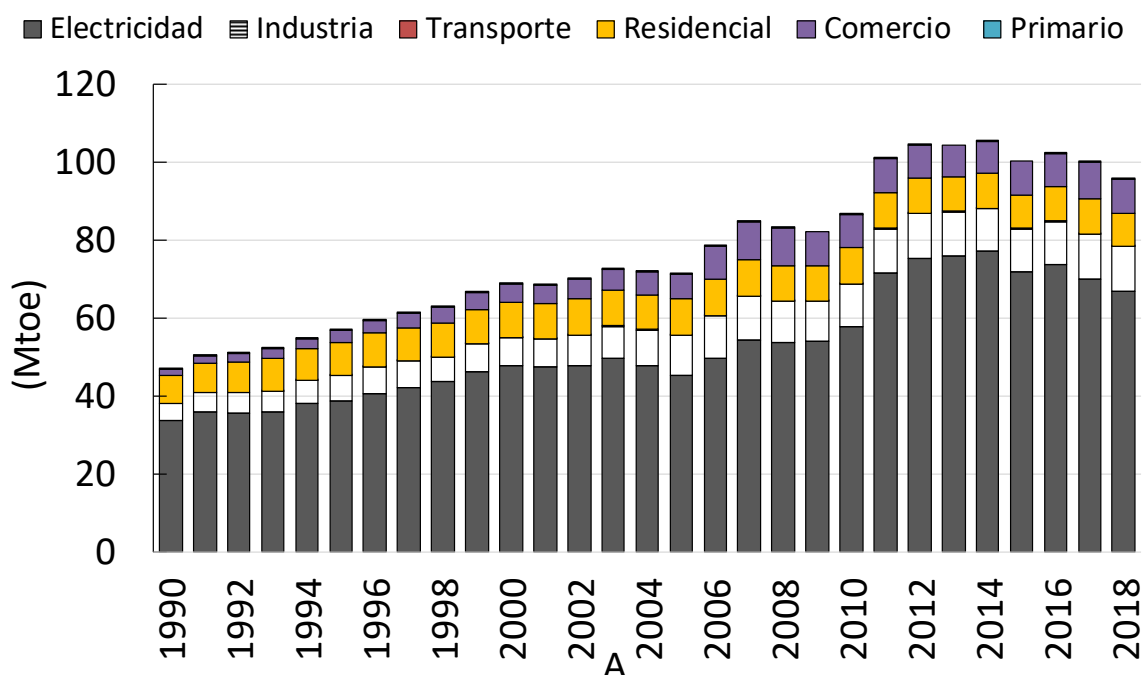


Figura 2.2.3.5: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en Japón por sectores.
Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector comercio y servicio público es el tercero por cantidad de energía demandada, alcanzando una necesidad energética equivalente a 8,7 Mtoe (2018), lo que supone un gran aumento en sus necesidades que se fijaban en 1,56 Mtoe (1990).

El sector residencial ha mostrado una tendencia estable en el consumo, precisando una cantidad homogénea a lo largo de la serie histórica analizada, contribuyendo a la demanda de gas natural en 8,6 Mtoe (2018). El sector primario y transporte no precisan grandes cantidades de energía mediante gas, de hecho, en el sector transportes se introdujo

2. ENERGÍA

levemente a partir de 1993, precisando una cantidad mínima de energía que ha evolucionado hasta los 0,04 Mtoe (2018). El sector primario no ha mostrado cambios en la tendencia del consumo precisando 0,002 Mtoe (2018).

2.2.3 Demanda cubierta mediante gas natural

INDIA

India posee 26 cuencas sedimentarias, de las cuales solo el 20 % han sido bien exploradas, mientras que el 14 % permanecen completamente inexploradas. La mayoría de las cuencas exploradas son prolíficas en gas. De los 20 nuevos emplazamientos descubiertos, se ha encontrado petróleo en 9, mientras que el resto o son de gas o albergan a los dos combustibles [74]. La política sobre el gas ha sido en gran medida reactiva y fragmentada en lugar de proactiva, impulsando políticas que no reconocieron el potencial que el gas puede aportar a la sociedad india [75]. De esta manera, India solo produce 25,4 Mtoe (2019), precisando importar para ese año una cantidad equivalente a 30,1 Mtoe [8].

A la vista de la *Figura 2.2.3.6* el mayor demandante de gas natural es el sector que genera energía eléctrica, que precisó una cantidad equivalente a 15,46 Mtoe (2018), lo que supone un 53,9 % del sector.

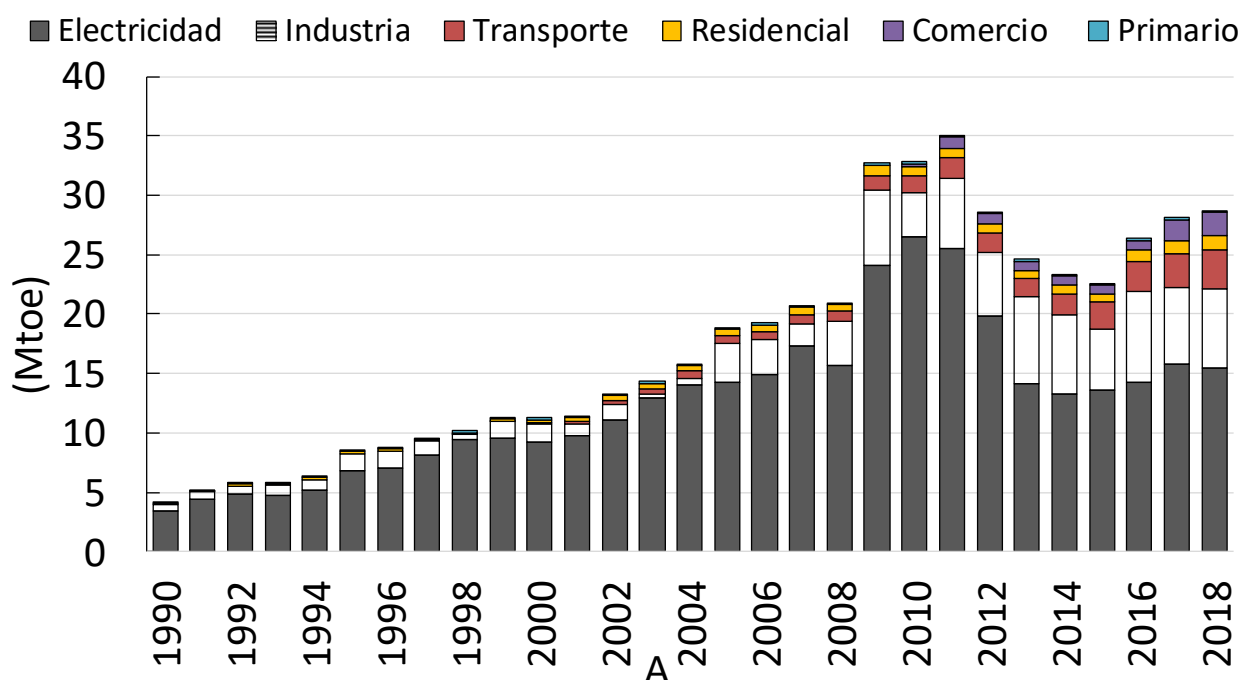


Figura 2.2.3.6: Evolución de la energía aportada mediante gas natural en India por sectores.
Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

El sector industrial precisó de 6,7 Mtoe (2018), lo que posiciona la demanda de este sector como el 23,2 % de la total demandada.

2. ENERGÍA

En cuanto al sector residencial, se ha registrado un tímido avance en las necesidades energéticas mediante gas, así, su necesidad ha alcanzado los 1,18 Mtoe (2018), lo que supone una participación en el sector del 4,1 %. Esta subida está condicionada por el paulatino crecimiento del gas ciudad. Este sistema de canalizaciones que transporta al gas hasta el punto de empleo en el hogar, avanza de manera lenta en el país, estando por debajo de las previsiones del gobierno indio. Así, la extensión de la red de distribución solo alcanzaba a 10 ciudades en 2007, ampliándose hasta alcanzar 40 ciudades en 2014 [75]. Es preciso recordar, que el consumo registrado para el sector residencial en la Unión Europea era de 102,6 Mtoe (2018). Salvando las profundas diferencias en población, desarrollo y temperaturas medias, el consumo de gas natural en el sector residencial en India se percibe aun en una temprana fase de introducción. Otro indicador de esta afirmación puede ser la comparación del consumo registrado en China, que alcanzaba los 41,3 Mtoe (2018), igualmente muy superior, pero con similar nivel de población que el caso indio.

El consumo de gas natural en el sector transportes ha crecido en la serie estudiada, pero es preciso indicar que no se registraron demandas de este combustible hasta 1998, en el que se consumieron únicamente 0,016 Mtoe. El consumo creciente de este tipo de combustible ha propiciado que su aportación al mix sea del 11,3 % (2018), lo que supone alcanzar una demanda equivalente para ese año de 3,26 Mtoe.

El sector comercial no registró consumo alguno hasta 2010, cuando se comenzó a emplear este tipo de combustible en el sector. De esta manera, del consumo inicial de 0,3 Mtoe (2010) se ha pasado a un consumo de 2,0 Mtoe (2018).

El sector primario precisa de un aporte muy bajo de gas natural, contribuyendo únicamente en 0,16 Mtoe (2018), sin registrarse cambios significativos en lo que se refiere al consumo de este sector mediante gas.

2.2.4 Energía eólica y solar

La energía eólica y solar han experimentado un fuerte impulso en las últimas décadas. Esta aseveración viene confirmada por los nuevos proyectos que cada año suman nueva potencia instalada. Esto es resultado no solo del abaratamiento de estas tecnologías, que las hacen competitivas con respecto a las tradicionales, sino también, por los beneficios que aportan a la sociedad, convirtiéndose en un nicho de mercado que genera anualmente multitud de empleos directos e indirectos [76]. Un parque eólico generará empleo a lo largo su vida útil, siendo desde la obra civil hasta la puesta en marcha del parque, el momento de mayor generación de empleo. Aun así, no se debe despreciar la generación de empleo que esta tecnología brinda en las fases de planificación, operación, que será el propio de la operación más el mantenimiento de los sistemas y equipos, así como el final con el desmantelamiento del parque. Durante el período 2009-19, el número de empleos en la industria mundial de la energía eólica se triplicó con $1,17 \times 10^6$ empleos en el sector en 2019 [77].

Tomando como referencia la UE, con costes en las energías tradicionales que oscilan entre 60 y 200 US\$/MW, el precio final en solar fotovoltaica se ha reducido de 360 US\$/MW en 2010, a 100 US\$/MW en 2017, mientras que el coste de los parques eólicos terrestres y marinos también se ha reducido a 60 y 140 US\$/MW, respectivamente, en 2017. Así mismo, la UE amplía su producción de energía solar y eólica, pasando esta de 2,9 Mtoe en 1990 a 50,7 Mtoe en 2018, convirtiendo las fuentes solar y eólica en las renovables más importantes en la UE. En 2018, la cuota de energías renovables de la UE alcanzó el 32 % de la producción de electricidad [8].

EEUU presenta un rápido aumento en la producción de energía solar y eólica, principalmente a partir del año 2002, pasando de 14,2 Mtoe (1990), hasta 38 Mtoe (2018). Uno de los principales contribuyentes a esta tendencia ha sido la expansión de la solar fotovoltaica, gracias a los incentivos fiscales federales y políticas estatales, así como a las nuevas plantas *onshore*, que sumaron 6,9 GW en 2018 a los ya instalados, alcanzando los 9,1 GW en 2019, una vez más, empujadas por la existencia de créditos fiscales con fecha límite en 2020.

China, donde numerosos proyectos nuevos han promovido la contribución de estas fuentes, ha crecido a un ritmo notable desde 2006. La capacidad eólica terrestre de China ha aumentado constantemente, alcanzando 19,0 GW en 2018 y creciendo a 23,8 GW en 2019. Este hito fue posible gracias al levantamiento de prohibiciones al desarrollo en ciertas regiones. Aunque de manera más moderada, Japón e India también muestran un aumento en el uso de energías renovables basadas en fuentes eólicas y solar. Finalmente, Rusia, es el único caso estudiado que presenta una evolución casi nula en el empleo de energía solar o eólica durante todo el período considerado.

2. ENERGÍA

Centrándonos en las tecnologías eólicas, la *Figura 2.2.4.1* muestra la evolución para el periodo 2018-2020 del incremento de potencia instalada. Destacándose que para el año 2020 asciende a 93 GW, conformando una nueva capacidad instalada mundial de 778 GW, lo que ha permitido generar 1590 TWh cubriendo el 6% del total de la demanda eléctrica mundial [76]. En la figura destaca el fuerte incremento de nuevos parques eólicos construidos por China, que alcanza a instalar más potencia eólica que la suma del resto de países estudiados por este trabajo.

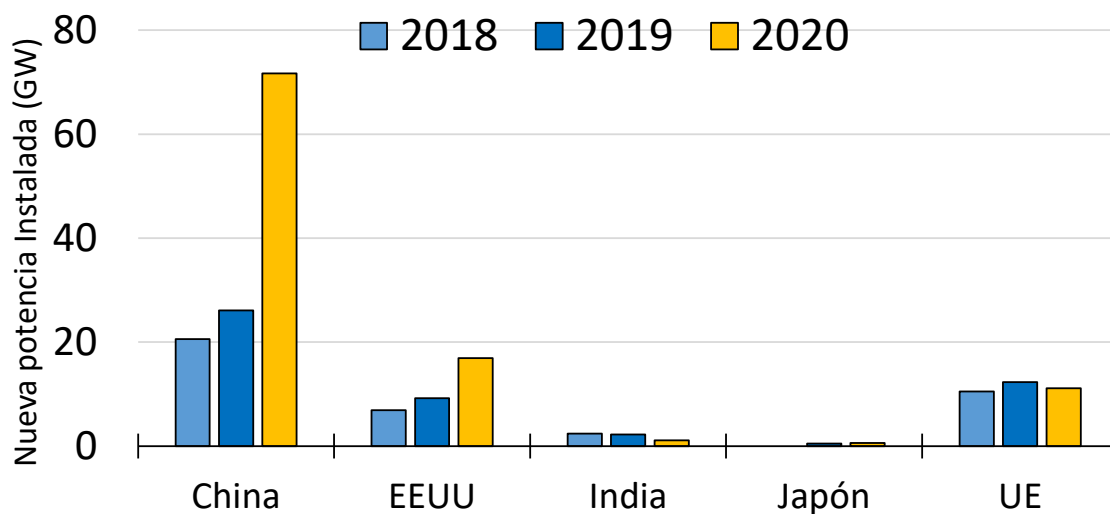


Figura 2.2.4.1: Evolución de la nueva potencia instalada eólica. Fuente IEA (International Energy Agency) [78].

La *offshore* en cuanto a tecnología eólica, se ha convertido a lo largo del periodo estudiado en una de las tecnologías más dinámicas del sistema energético. Por primera vez en 2010, el aporte a la capacidad instalada global mediante esta fuente, superó 1 GW, resultando sorprendente alcanzar solo 8 años después una cuota anual de energía nueva instalada mediante esta tecnología de 4,3 GW (2018). De 3 GW de energía eólica marina en operación en 2010, el incremento en este campo ha permitido alcanzar una capacidad instalada de 23 GW en 2018. De esta manera, este mercado muestra una tendencia de crecimiento a un ritmo aproximado del 30 % anual, más que cualquier otra fuente de electricidad excepto la energía solar fotovoltaica (PV). Gracias a apoyos a las políticas, que han incluido licitaciones de parques con capacidades específicas, el sector ha registrado un enorme crecimiento en los países europeos bañados por el Mar del Norte, donde los recursos eólicos de alta calidad, gracias a la carencia de obstáculos y aguas relativamente someras, lo que minimiza los costes de construcción, han proporcionado condiciones excepcionalmente favorables para desarrollar la energía eólica marina. De esta manera, se

impulsaron casi 17 GW adiciones de capacidad eólica *offshore* en Europa entre 2010 y 2018. Reino Unido, Alemania, Bélgica, Países Bajos y Dinamarca agregaron juntos 2,7 GW de capacidad solo en 2018. China ha avanzado en este periodo en lo concerniente a esta tecnología y ahora se encuentra entre los líderes del mercado. En 2018, China agregó 1,6 GW de capacidad eólica *offshore*, la mayor adición mundial por países. Este rápido crecimiento ha sido impulsado por el 13° Plan Quinquenal del Gobierno chino, que pidió que se completasen 5 GW de capacidad eólica marina para 2020, y al establecimiento de condiciones para el apoyo a una mayor expansión desde entonces [79].

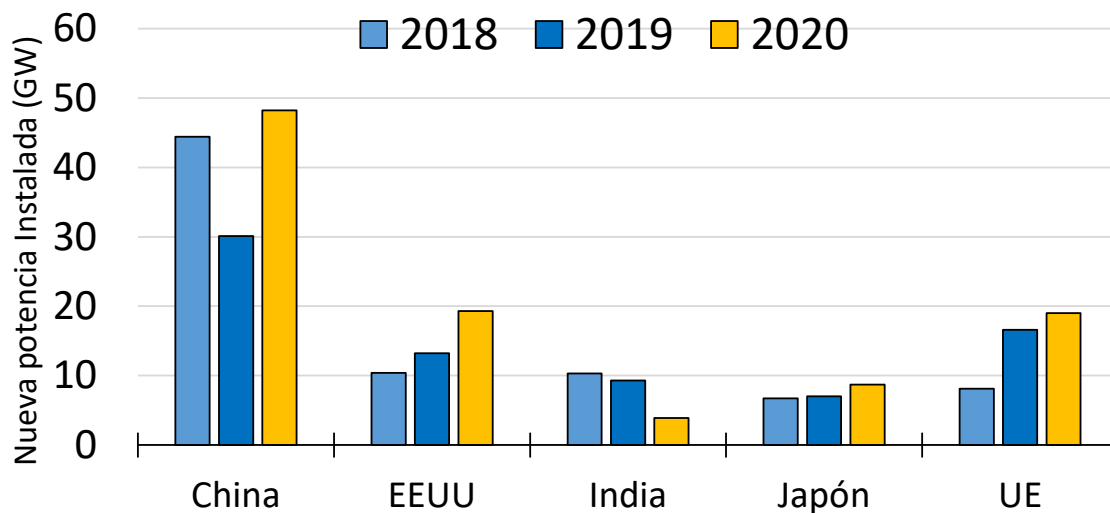


Figura 2.2.4.2: Evolución de la nueva potencia instalada solar fotovoltaica. Fuente IEA (International Energy Agency) [78].

En cuanto a la generación mediante energía solar, se ha registrado una importante evolución en los países estudiados con la excepción de Rusia. Esta evolución al alza mostrada por las sociedades estudiadas, ha ayudado a nivel mundial a alcanzar la cifra récord de generación global mediante esta tecnología de 156 TWh (2020), suponiendo este hito un crecimiento del 23 % con respecto al año anterior. Este importante aporte, supuso un 3,1 % de la generación eléctrica global, convirtiendo a la solar fotovoltaica en la tercera tecnología en lo que a generación concierne después de la hidroeléctrica y la eólica terrestre [80]. El auge de este sector se debe a la bajada en los precios de los componentes, lo que hace posible su montaje en el entorno residencial, unido a la inversión realizada por numerosas empresas, que han aprovechado los planes estatales que fomentaban esta

2. ENERGÍA

tecnología con ayudas financieras. Estos casos son especialmente importantes en China y Estados Unidos, donde las ayudas próximas a vencer al final de 2020 han sido aprovechadas por inversores [80].

La inversión en el capítulo de energía solar ha sido liderada por China en los últimos años, siendo el país asiático responsable del 75 % de las nuevas instalaciones realizadas entre 2019 y 2020.

Es destacable igualmente la política de la Unión Europea, que ha incrementado notablemente la capacidad instalada a lo largo de los últimos años, duplicando la instalación en 2019 con respecto al año anterior y un 15 % en 2020 con respecto a 2019. Los mercados con mayor crecimiento en 2020 fueron Alemania (+5 GW), España (+3 GW), Holanda (+3 GW) y Polonia (+2 GW). Estas nuevas incorporaciones son posibles gracias a las políticas encaminadas a alcanzar los compromisos adquiridos en el horizonte 2030 [80].

La nueva potencia instalada en EEUU ha alcanzado en 2022 un nuevo récord, desbancando a la registrada como máxima hasta ahora en 2015. Así, en el citado año se instalaron nuevas plantas fotovoltaicas que aportan en suma un total de 19 GW de potencia instalada, lo que supone un aumento del 45 % con respecto a lo instalado el año anterior. Este enorme incremento ha sido posible gracias entre otros al impulso de una mayor demanda corporativa a través de acuerdos de compra de energía, impulsada por la disminución de los costos referidos a este tipo de tecnología. Otro factor a tener en cuenta ha sido el crecimiento continuo en los mercados residenciales y comerciales [80].

La *Figura 2.2.4.3* muestra el aporte energético conjunto de las tecnologías eólica y solar para el periodo estudiado, en ella se puede apreciar la evolución del sector en los países objeto de estudio. En la figura se puede apreciar la destacada contribución de las tecnologías solar y eólica en Europa, que partiendo con una aportación energética de 2,89 Mtoe (1990) encabeza desde 2003 la contribución de energía mediante la citada fuente entre los países estudiados, alcanzando un aporte energético equivalente a 50,69 Mtoe (2018).

Estados Unidos, que se estancó, incluso reduciendo su aportación energética en el sector de energías eólica y solar en la etapa 1990-2006, experimenta igualmente un alza en su aportación en el último periodo estudiado, alcanzando una contribución de 38,00 Mtoe (2018). China por su parte, con una gran apuesta en su política por estas tecnologías se encuentra en segundo lugar, tras pasar en 2018 a EEUU. El país asiático gracias a las políticas descritas con anterioridad, ha alcanzado una aportación equivalente de 42,05 Mtoe (2018), lo que resulta sorprendente al presentar una aportación al mix casi inexistente a lo largo del periodo 1990-2007, donde la contribución solo participaba con 0,56 Mtoe (2007). Tras esta etapa se registran dos periodos claramente diferenciados, el que integran los años comprendidos entre 2007 al 2012, donde se registran menores tasas de crecimiento, y el último periodo que comprende los años 2012 al 2018, donde estas

tecnologías crecen a un ritmo muy superior, alcanzado una tasa de crecimiento en 2018 del 27,66% con respecto al año anterior.

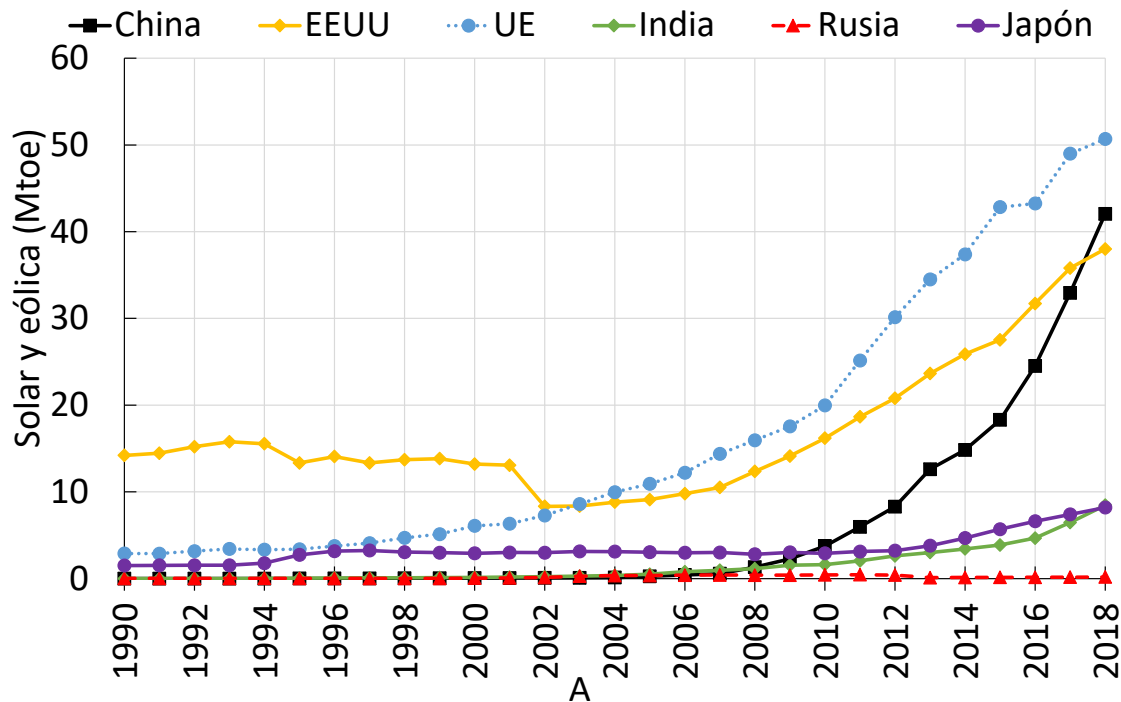


Figura 2.2.4.3: Evolución de la energía aportada mediante solar y eólica en los países objeto de estudio. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Es destacable el cambio de tendencia experimentado por India, que supera en 2018 la producción eólica y solar de Japón, registrando para ese año un incremento en su aportación del 30,7 % con respecto al anterior, lo que la lleva a producir 8,46 Mtoe (2018). Como en el caso de China, India no disponía de un aporte sustancial en lo que se refiere a esta tecnología previo a 2005, donde su aportación quedaba limitada a 0,50 Mtoe. Esta situación resulta sorprendente si se cuenta con la beneficiosa situación geográfica del país, que dispone de una latitud propicia para la implantación y aprovechamiento de tecnologías solares.

Japón por el contrario ha dispuesto de una aportación al mix mediante esta tecnología similar al de toda la Unión Europea en la primera etapa temporal estudiada. De esta manera, parte de un aporte equivalente a 1,50 Mtoe (1990), registrando crecimiento en el primer periodo, el correspondiente a los años 1990-1997, donde la aportación alcanzó los 3,24 Mtoe (1997). Posteriormente se entra en una etapa de estancamiento que perduró

2. ENERGÍA

hasta el año 2013, donde no se añade nueva potencia a la existente. Tras este periodo, se comienza de nuevo a apostar por estas tecnologías hasta registrar una aportación al mix de 8,20 Mtoe (2018).

La aportación mediante estas tecnologías en Rusia es prácticamente inexistente, presentando un máximo en 2011 con un aporte de 0,44 Mtoe, para nuevamente reducirse hasta los 0,18 Mtoe (2018).

2.2.5 Bioenergía

Esta fuente de energía sostenible está siendo implementada por todas las sociedades estudiadas, aprovechando las numerosas prestaciones que esta energía aporta a la generación de calor, energía mecánica o electricidad. La bioenergía, que debió ser la primera fuente energética presente en nuestros hogares, es una fuente de energía limpia, dado que sus emisiones han sido previamente adsorbidas de manera natural y el balance de emisiones de CO₂ permanecerá constante. De esta manera, esta energía de aprovechamiento está siendo fuertemente implementada por todas las sociedades.

Hablar de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos puede ser en primera instancia un modo de diferenciación de estos combustibles, siendo ejemplos claros de combustibles sólidos la leña o pellet empleados para el calentamiento doméstico de manera tradicional. El empleo industrial de este tipo de combustibles está en la generación eléctrica o la generación combinada de calor y electricidad en sistemas de cogeneración (CHP), ambas empleando como único combustible el de origen vegetal o combinando este en sistemas que emplean además carbón o gas natural.

Los biocombustibles líquidos, son sustancias derivadas de la biomasa y se utilizan como una alternativa a los combustibles tradicionales como el diésel y la gasolina. Así pues, nuevos combustibles de origen biológico como el etanol y biodiésel se introducen en el mercado del transporte. Estos productos provenientes en el caso del etanol, de la fermentación de los azúcares presentes en la caña de azúcar, o el almidón del maíz, o para el caso del biodiésel, proveniente de aceites vegetales, están entrando a formar parte de los combustibles empleados en el transporte, alcanzando en 2008 un aporte energético equivalente al 1,8% de los combustibles para el transporte en el mundo [78].

Los biocombustibles convencionales han alcanzado la madurez tecnológica y de mercado y están disponibles comercialmente; sin embargo, los avances en la generación y el procesamiento de materias primas pueden reducir aún más los costos y lograr un mejor desempeño ambiental. Esta alternativa está reñida en algunos casos con el empleo tradicional de esta materia biológica, usada como alimento humano o piensos para animales [78].

Es más común el empleo de este tipo de combustibles adicionado a los tradicionales, de este modo, y tomando como ejemplo la UE, se pueden encontrar distintos tipos de combustibles convencionales a los que se les ha añadido un porcentaje de biocombustible, etiquetando como B7 al combustible con un 7% de presencia vegetal, o al B10 con un 10% de presencia. Esta capacidad representa una enorme ventaja al aportar una reducción de emisiones derivadas del petróleo, unida al aprovechamiento de la distribución e infraestructura existentes, posibilitando que la amplia flota de vehículos existentes en el país pueda consumir una parte pequeña de biocombustible sin afectar sustancialmente a

2. ENERGÍA

sus prestaciones y nivel de durabilidad. Así mismo, existe una gama de motorizaciones que permiten el empleo exclusivo de combustibles de origen biológico.

Los combustibles gaseosos, como el biogás que se ha obtenido mediante el tratamiento anaeróbico del estiércol y otros materiales de biomasa, son empleados en la producción de energía eléctrica o como aporte en vehículos de combustión. Un ejemplo de este empleo se encuentra en los automóviles que emplean combustible convencional pero que permiten el empleo de metano u otros gases de origen biológico, aunque en la actualidad, este aporte empleado en el transporte es relativamente pequeño [78].

La generación eléctrica supone uno de los aprovechamientos de los biocombustibles. La *Figura 2.2.5.1* muestra la evolución del empleo de biocombustibles para la generación de electricidad, pudiéndose observar en ella el crecimiento llevado a cabo por China en el empleo de biocombustibles, produciendo más energía que el resto de economías estudiadas en 2018, con un aporte total de 32,11 Mtoe [8].

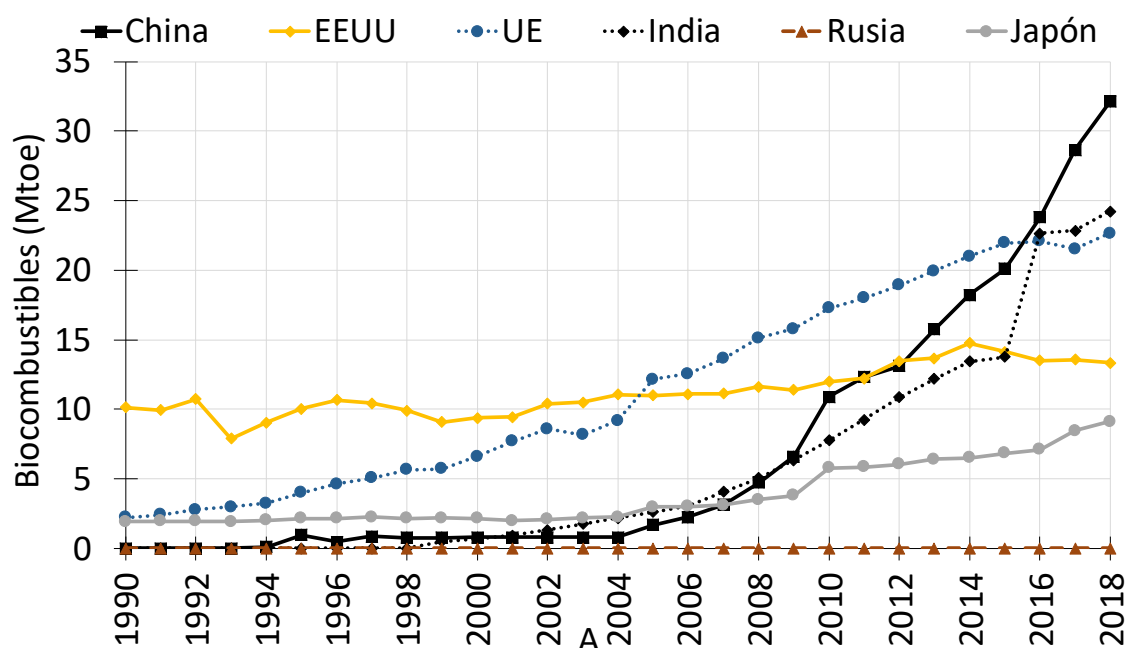


Figura 2.2.5.1: Evolución de la energía aportada mediante biocombustibles para la generación eléctrica en los países objeto de estudio. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Es destacable igualmente la contribución de biocombustibles en India, que alcanza en 2018 un aporte energético al mix de generación eléctrica de 24,24 Mtoe, partiendo de una situación de desventaja, dado que este tipo de tecnología no aporta energía alguna hasta 1990, en el que contribuye con una pequeña cantidad de 0,49 Mtoe. El ritmo de

crecimiento ha experimentado diferentes etapas, destacando la llevada a cabo en el año 2016 con un aumento porcentual del 64,5 % con respecto al año anterior.

La Unión Europea, con una tendencia que permanece prácticamente estable en toda la serie temporal, ha aportado a su mix de generación un total de 22,63 Mtoe (2018). Esta cantidad de energía lleva a la Unión por delante de Estados Unidos, que permanece prácticamente estable en su cantidad aportada al mix en la serie completa, terminando la serie histórica con un aporte de 13,33 Mtoe (2018).

Japón, con una tendencia estable en el periodo comprendido entre los años 1990 al 2004, donde el aporte subió tímidamente desde los 1,92 Mtoe (1990), hasta alcanzar los 2,26 Mtoe (2004), cambió de tendencia en la segunda mitad, registrando una subida estable que la ha llevado a aportar 9,10 Mtoe (2018). Rusia, no aporta ninguna energía empleando biocombustibles a su sistema de generación eléctrico.

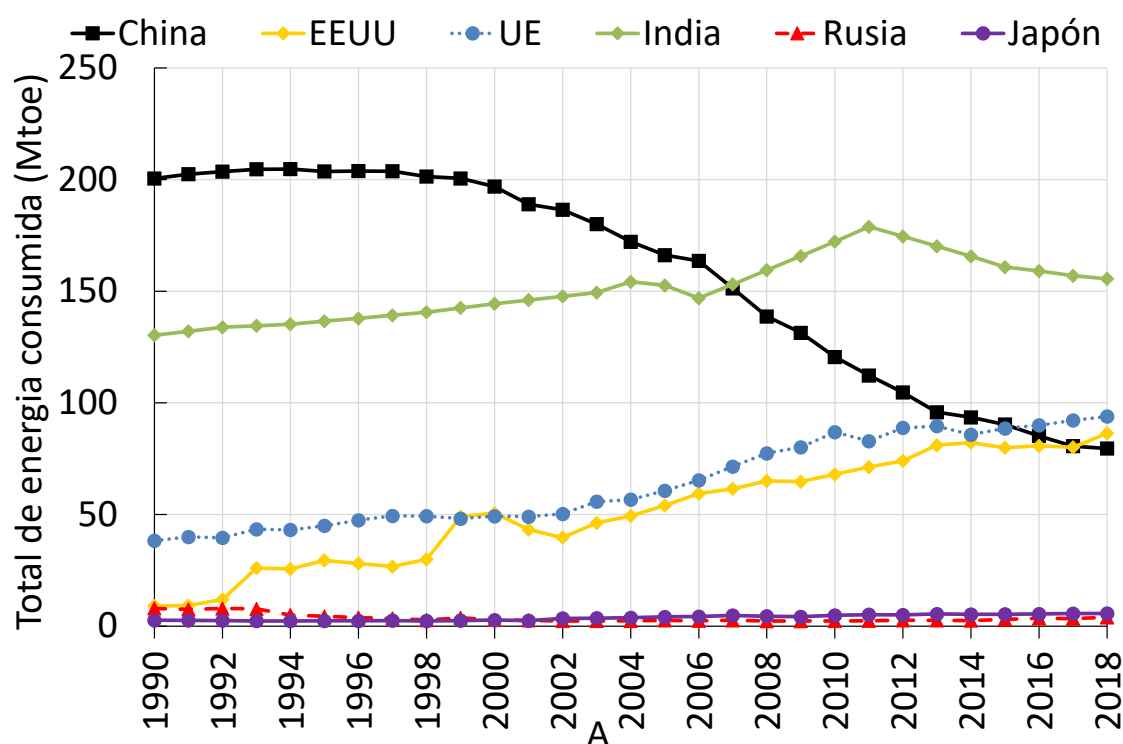


Figura 2.2.5.2: Evolución de la energía aportada mediante biocombustibles excluida la generación eléctrica en los países objeto de estudio. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

En cuanto al resto de sectores económicos, la *Figura 2.2.5.2* muestra la evolución del consumo de biocombustibles en todos los sectores estudiados a excepción del sistema de

2. ENERGÍA

generación eléctrica. En ella se puede apreciar como este recurso es ampliamente empleado en países como India, que ha mantenido una tendencia de incremento de esta energía hasta 2011, en la que se ha registrado un máximo de empleo de esta energía de 178,88 Mtoe, para registrar un descenso en el consumo hasta el final de la serie temporal, con un empleo equivalente a 155,56 Mtoe (2018). Este aporte energético se reparte entre los sectores comerciales del país, destacando el residencial donde se han empleado una cantidad de energía equivalente a 115,43 Mtoe (2018), lo que hace a este sector demandante de un 74,21 % de la energía total aportada mediante biocombustibles, esta aportación es seguida en importancia a la demandada en el sector industrial, que alcanzó los 32,17 Mtoe (2018) [8].

El caso de China es completamente distinto al indio, dado que el país registró una tímida subida en el primer periodo de la serie temporal, registrando un máximo nivel de consumo de 204,73 Mtoe (1994). A partir de ese momento, la tendencia registrada a lo largo del resto de la serie, es de clara disminución en la energía aportada mediante biocombustible. Esta sociedad parte con un consumo de 200,49 Mtoe (1990), para registrar un consumo al final de la serie de 79,6 Mtoe (2018), lo que la hace quedar por debajo en consumo a sociedades como la americana o la europea, que registran una tendencia creciente en el empleo de esta fuente energética. El consumo chino de energía mediante biocombustibles se centra en el sector residencial a lo largo de toda la serie temporal, siendo insignificantes el resto de consumos. El consumo de los hogares chinos alcanzó un gasto de 77,28 Mtoe (2018).

El caso de la Unión Europea y EEUU es claramente diferente al indio, dado que el objeto que se le asigna al consumo de biocombustibles en la UE y EEUU está distribuido entre el transporte, la industria y el residencial. Así pues, para EEUU el peso fundamental de la demanda se centra en el sector transporte, donde aporta parte de la ingente cantidad de energía demandada por el sector, contribuyendo con 37,43 Mtoe (2018). El resto de sectores está encabezado por el industrial 34,25 Mtoe (2018) y el residencial con 10,88 Mtoe (2018), siendo el resto de sectores poco representativos. En cuanto a la UE, se registra una máxima demanda en el sector residencial, con una necesidad anual de 42,58 Mtoe (2018), seguida para el año citado por los sectores industrial con una contribución de 27,47 Mtoe, el transporte con 16,81 Mtoe, el comercio y servicio público con 4,25 Mtoe y el primario con 2,81 Mtoe.

Para Japón y Rusia se presentan muy bajos aportes energéticos por medio de biocombustibles en el conjunto de sectores, excluyendo el empleo para la generación eléctrica. Esta tecnología aportó en Japón únicamente 5,7 Mtoe (2018), que concentra su empleo en el sector industrial y el transporte. Rusia por su parte, con una aportación aún menor, abasteció su demanda mediante biocombustibles con únicamente 3,98 Mtoe (2018), concentrando su empleo en los sectores industrial, comercio/servicios públicos y el residencial, donde se registran niveles similares de consumo. Es significativo el aporte nulo

de energía mediante biocombustibles al sector transportes, siendo el caso de Rusia el único que presenta un aporte nulo en biocombustibles en el citado sector.

2.2.6 Energía Hidroeléctrica

La energía aportada por las fuentes hidroeléctricas son una de las más baratas entre las energías libres de CO₂, dada su evolucionada tecnología. Un buen empleo de esta fuente energética además proveerá las necesidades de agua de consumo, posibilitando el riego en el sector primario y las necesidades de la industria, almacenando un recurso sostenible y controlando el aporte de este bien en épocas de sequía [81]. Esta fuente energética, representa uno de los mayores aportes energéticos entre las tecnologías libres de CO₂, por lo que supone una contribución significativa a la consecución de los objetivos del Acuerdo de París y las Metas de desarrollo sostenible. En cuanto a las políticas de prevención contra los efectos del Cambio Climático, esta tecnología ofrece protección a los entornos contra impactos exacerbados, como pueden ser inundaciones o sequías, aunque esta tecnología muestra una dependencia del clima, por su necesidad de contar con abundantes precipitaciones [82].

La energía hidroeléctrica presenta una rápida entrega de energía, siendo posible la entrada en operación y el paso de energía a la red eléctrica en pocos minutos, siendo inestimable a la hora de cubrir demandas en horas punta en los sistemas de generación y distribución eléctrica, posibilitando, debido a su flexibilidad, el aporte y almacenamiento de energía. Esta característica hace que esta fuente pueda dispensar energía en el momento que la demanda lo precisa. En plantas con sistema de bombeo, el agua se embalsa en dos presas con una diferencia de altura entre ellas. De esta manera se puede atender a una demanda puntual abriendo desde la parte superior a la inferior, generando energía, para volver a bombear el agua a su posición original, desde la presa inferior a la superior, en momentos de superávit de energía, sirviendo además de regulación en los sistemas energéticos. La energía hidroeléctrica ahora está ayudando a conseguir la transición energética, mediante el trabajo conjunto con otros aportes renovables como la energía eólica y la solar. Ningún país se ha acercado a alcanzar el 100% renovable de electricidad sin la energía hidroeléctrica en su mix energético [81].

Atendiendo a cada una de las sociedades estudiadas, la capacidad instalada en China alcanzó en 2018 la cantidad de 352,26 GW, gracias al nuevo aporte que entró en servicio con una potencia instalada de 8,54 GW, de las cuales 1,5 GW son mediante plantas con sistema de bombeo, posibilitando de esta manera, recuperar la energía potencial del agua en momentos de superávit de energía. Los nuevos proyectos se encuentran ubicados principalmente en el suroeste del país y parten de la necesidad de encontrar fuentes de energía libres de emisiones de GEI que la agenda del Gobierno chino impulsa. Este plan fue potenciado mediante el “Plan de Acción para el Consumo de Energía Limpia 2018-2020” [82].

El citado plan, se centra en la relevancia de mejorar el mercado eléctrico en el país, mejorando las interconexiones entre provincias. También se pretende desarrollar el

almacenamiento de energía, por lo que los sistemas que incorporan bombeo son parte fundamental de la estrategia marcada por el Gobierno chino, para mejorar el sistema y aportar flexibilidad [82].

Como medida para promover la inversión en energías limpias, China continúa promoviendo la financiación “verde” para sus grandes necesidades de inversión en energías libres de emisiones, que incluyen a la hidroeléctrica como una de las que más potencial pueden generar en el país. La emisión de los citados bonos verdes, distribuidos internacionalmente alcanzó los 31200×10^6 US\$ en 2018, siendo el mercado de bonos verdes en China el segundo más grande del mundo, representando el 18 % de la emisión mundial. Entre 2017 y 2018 se recaudó 2250×10^6 US\$ para financiar proyectos como la cascada del río Jinsha, incluidos los proyectos hidroeléctricos de Baihetan y Wudongde [82].

Estados Unidos disponía de una capacidad instalada de 102,74 GW en 2018, con una generación estimada de 311 TWh (2018). Esta cantidad de energía representaba el 8 % del total de energía eléctrica generada en el país, o el 42 % de la generada mediante fuentes renovables, lo que convierte a la hidroeléctrica en la fuente energética renovable que más aporta en Estados Unidos [82]. El país está llevando a cabo cambios en su política nacional, favoreciendo las energías libres de emisiones de GEI. De esta manera, se han negociado nuevos proyectos de ley presentados ante el Congreso de los EEUU. Estos cambios han promovido la inclusión de la energía hidroeléctrica en la definición de energía renovable, dado que curiosamente hasta ahora no se reconocía a esta energía de esta manera. El nuevo marco legal facilitará tanto el proceso para la aprobación de nuevos proyectos, como la renovación de licencias de los numerosos proyectos existentes. Durante 2018, el Congreso aprobó una Ley de Infraestructura Hídricas que incluye varias disposiciones para la promoción y el despliegue de energía hidroeléctrica [82].

Europa dispone de una potencia instalada total de 251,71 GW (2018), siendo los socios de la Unión con mayor representación, Francia (25519 MW), Italia (22926 MW) y España (20378 MW) [81]. Dentro de los miembros de la UE destacan tradicionalmente Austria e Italia, que aumentaron su potencia instalada en 2018 en 385 MW y 88 MW, respectivamente, con respecto al año anterior. De esta manera, se ha agregado un total de 225 MW incluyendo la cantidad agregada para el año 2017 en la totalidad de los socios de la Unión. Entre las renovables, la energía hidroeléctrica destaca en la Unión Europea, generando aproximadamente un total de 643 TWh (2018), a los que se deben sumar los generados por plantas de generación y almacenamiento por bombeo. Esta cantidad represente aproximadamente el 17 % de la total generada. El crecimiento sustancial de las energías renovables, junto con el desmantelamiento de generadores síncronos convencionales, ha aumentado la eficiencia y la capacidad instalada de la energía hidroeléctrica, para proporcionar flexibilidad a fin de mantener un suministro de energía seguro, asequible y sostenible, dentro de la Estrategia Marco para la Unión Europea. A finales de 2018, la Comisión Europea presentó su estrategia para alcanzar una economía

2. ENERGÍA

con un balance neutro en lo que se refiere a las emisiones de CO₂, con un horizonte fijado para 2050, y siguió tres meses después con el compromiso de invertir más de $10 \cdot 10^9$ EUR en tecnologías limpias e innovadoras, dentro de su Fondo de Innovación para la Acción Climática. Estas ayudas pretenden potenciar tecnologías y procesos innovadores con bajas emisiones de carbono, incluida la generación de energía renovable y el almacenamiento de energía [82].

Rusia disponía de una potencia instalada de 48,51 GW en 2018, lo que la posibilita a producir aproximadamente el 17 % de su electricidad de esta manera sostenible. El país considera la energía hidroeléctrica como una prioridad nacional, por lo que se han llevado a término diferentes actuaciones encaminadas a la eficiencia de sus plantas, entre las que destacan las realizadas en Siberia, con la reparación y modernización de diversas instalaciones, entre las que destacan las turbinas en las estaciones Ust-Ilimsk de 3840 MW, Irkutsk de 662 MW y Krasnoyarsk 6000 MW. En el extremo noroeste se han realizado actuaciones en Ust-Srednekans, mientras que en Rusia occidental las estaciones de Saratov de 1375 MW y Zaramagskaya-1 de 346 MW están en proceso de modernización [82].

Japón presenta una potencia instalada de 49,90 GW en 2018. El país asiático es el quinto mercado hidroeléctrico más grande del mundo, en términos de capacidad (≈ 50 GW). El desarrollo de políticas que han fomentado la I+D, han afectado de manera positiva a la energía hidroeléctrica, posibilitando diversos nuevos proyectos, entre los que destaca el desarrollo de la Okinawa Yanbaru PHS de 30 MW, una planta de demostración, que utilizaba agua de mar para el almacenamiento de energía, lo que la convierte en una planta pionera en el mundo [83]. Aunque la planta fuese una de las apuestas del país para conseguir una solución energética basada en fuentes libres de CO₂, tuvo que cerrar sus puertas debido a problemas en su operación.

India completó en 2018 una potencia instalada de 49,92 GW. A esta cuota de instalación se ha llegado después de instalar 535 MW (2017) de nuevas plantas. En India se ha registrado tradicionalmente un fuerte aporte de energía proveniente de las instalaciones hidroeléctricas, dadas las especiales características que ofrece el país, que favorecen su implantación [82].

El gobierno indio está impulsando nuevos proyectos hidroeléctricos, mediante su plan para energías renovables. De esta manera se está impulsando tanto plantas a pequeña escala, como grandes centrales. Todo ello encaminado al acuerdo transfronterizo entre diversos países del sur de Asia para comerciar con la electricidad (SAARC). En este marco, Nepal y Bután han acordado con India comerciar con la energía generada en los próximos proyectos hidroeléctricos [82].

La *Figura 2.2.6.1* muestra la evolución de la energía aportada a la red mediante la tecnología hidroeléctrica a lo largo de la serie estudiada, en los países objeto de

2.2.6 Energía Hidroeléctrica

comparación con India. En ella se puede apreciar el notable incremento experimentado por China que ha pasado de 10,4 Mtoe (1990), a alcanzar los 92,56 Mtoe (2018).

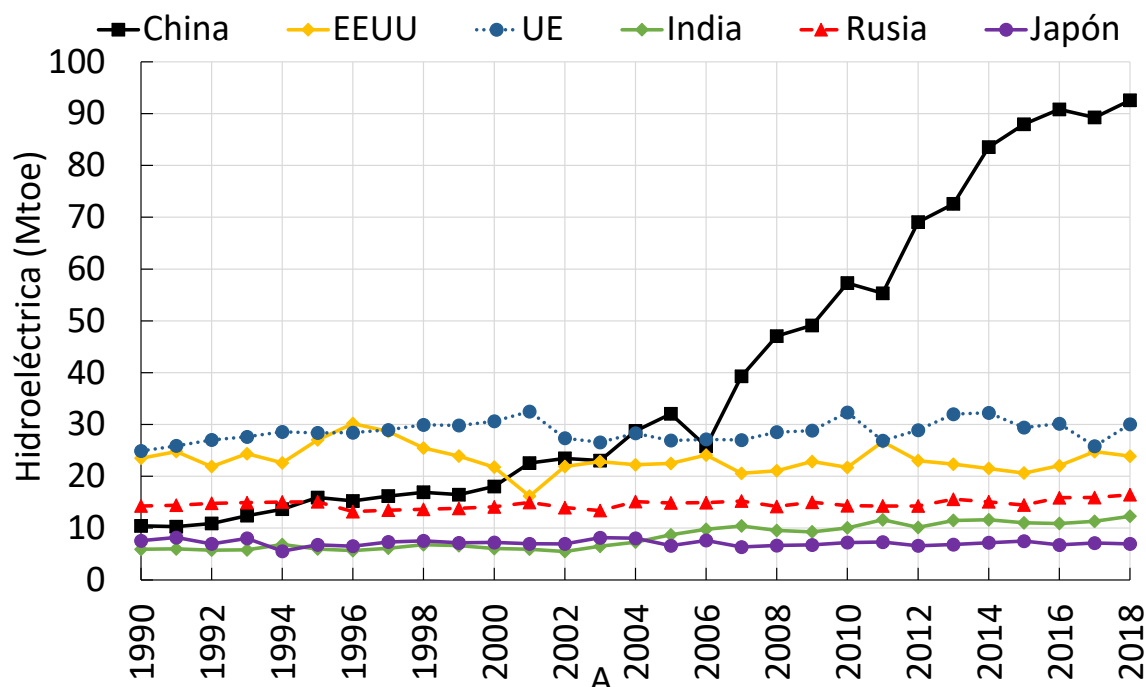


Figura 2.2.6.1: Evolución de la energía Hidroeléctrica aportada en los países objeto de estudio.
Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Estados Unidos no ha evolucionado en lo relativo a la entrega de nueva energía mediante la construcción de nuevas plantas hidroeléctricas, esto ha dejado la energía aportada a red de las plantas aproximadamente al mismo nivel en toda la serie temporal, de esta manera, la energía entregada suponía 23,49 Mtoe (1990), alcanzando un aporte equivalente a 23,89 Mtoe (2018).

La Unión Europea ha presentado una evolución irregular, ganando energía entregada a red en la primera etapa de la serie temporal, que duró hasta el año 2001, donde se registró el máximo de energía aportada al sistema eléctrico, aportando 32,5 Mtoe (2001). Desde ese momento la energía entregada se ha comportado de manera irregular, hasta abastecer una demanda de 30,06 Mtoe (2018).

La energía aportada por el sistema de la Federación Rusa se ha mantenido en el tiempo, aportando en el periodo comprendido entre 1990 a 2014 una energía regular, con un aporte anual que rondaba los 14 Mtoe. Desde ese momento se ha producido un incremento debido a las actuaciones citadas con anterioridad y la energía aportada al mix ha ascendido hasta los 16,43 Mtoe (2018).

2. ENERGÍA

Japón experimenta una tendencia uniforme, manteniendo aproximadamente el mismo nivel de energía entregada a lo largo de la serie estudiada, proporcionando una energía equivalente a 6,96 Mtoe (2018).

India por su parte comienza la serie histórica al mismo nivel aproximado que Japón, registrando a lo largo del periodo estudiado diferentes tendencias. La primera de ellas entre 1990 a 2002, donde se mantiene la misma aportación aproximadamente que oscila en torno a los 6 Mtoe. En los años posteriores, se comienzan a realizar actuaciones que llevan al aporte a crecer de manera que se contribuye con un total de energía equivalente a 12,29 Mtoe (2018).

2.2.7 Energía Atómica

La cantidad de energía aportada mediante energía atómica al mix energético, es otro elemento diferenciador en cada economía, especialmente entre las desarrolladas y aquellas en vías de desarrollo, que presentan una tardía incorporación a este sector, mientras que los países desarrollados han mantenido en su mayoría la capacidad existente, previa al inicio de la serie temporal. La *Figura 2.2.7.1* muestra esta realidad, permitiendo apreciar la nula participación hasta 1994 de este tipo de aporte energético en China, siendo el aporte presente en aquel primer periodo en India, el de sus dos únicos pequeños reactores de tipo presurizado de agua pesada (PHWR), Madras 1 and 2 (205x2 MW) [84].

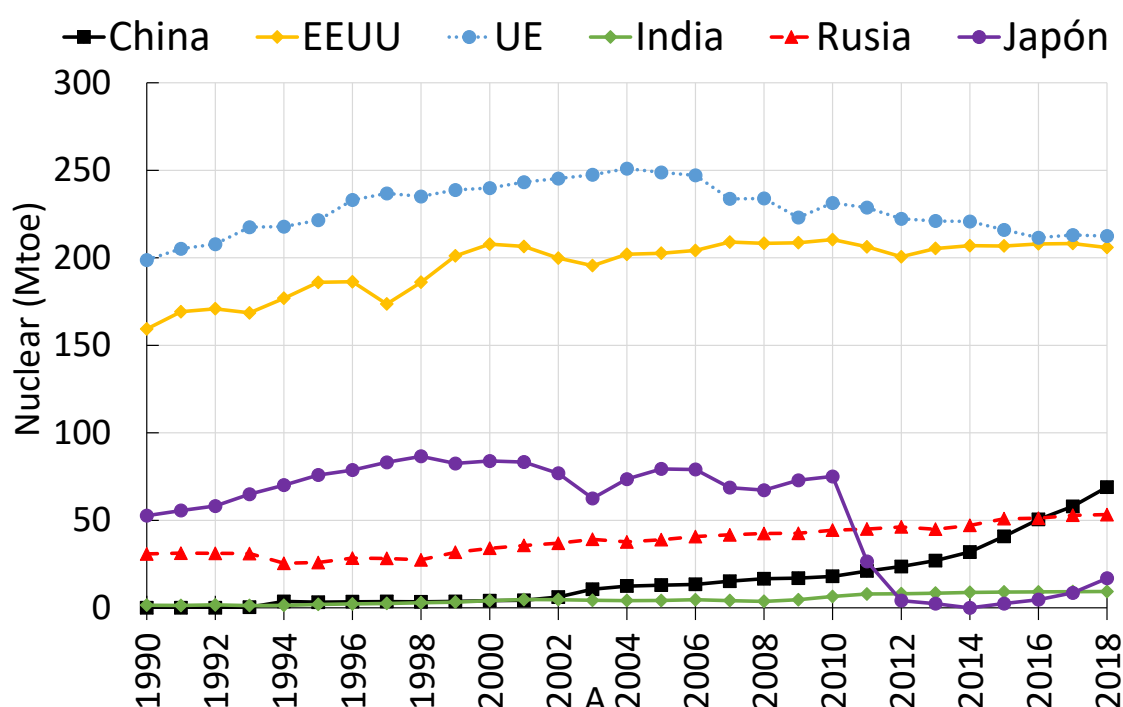


Figura 2.2.7.1: Aporte de la energía nuclear al mix energético. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

En el caso opuesto se encuentran los países desarrollados objeto de estudio, que en la serie temporal estudiada mantienen o reducen su alta capacidad nuclear. De esta manera, La generación de energía mediante plantas nucleares en Europa, tradicionalmente encabezada por Francia, Reino Unido y Alemania, que partía en 1990 con una producción anual de 198,74 Mtoe, alcanzó su máximo histórico en 2004, donde se produjeron un total de 251,02 Mtoe. Desde ese momento, la producción mediante este tipo de fuente ha decrecido hasta los 212,48 Mtoe registrados en 2018. Este cambio de tendencia, principalmente debida al cambio en la política de algunos miembros de la Unión, entre los

2. ENERGÍA

que destaca Alemania, que ha cambiado su legislación para la eliminación progresiva de este tipo de fuente de energía, prohibiendo su nueva construcción y reduciendo el tiempo máximo de operación de las plantas existentes a 32 años. Estos cambios que han reducido la capacidad nuclear en la UE se precipitaron a raíz del accidente de Fukushima, acelerando el cierre de plantas nucleares, cuyo aporte energético ha sido sustituido por la implantación de plantas de ciclo combinado que emplean como combustible gas natural [85, 86]. Aplicando esta política, un total de 12 grandes reactores de tipo Reactor de agua presurizada (PWR) han sido cerrados en el periodo estudiado, destacando entre ellos Biblis-A (1167MW), Biblis-B (1240 MW), Krümmel (1346 MW), Unterweser (1345 MW), todos ellos parados en agosto de 2011, menos de cinco meses después del accidente de Fukushima [84].

EEUU mantiene su capacidad nuclear en toda la serie histórica estudiada por este trabajo. Esta potencia económica mundial, ha realizado una política consistente en reemplazar antiguas plantas por otros modelos más eficientes. Así, EEUU ha parado antiguas plantas que entraron en operación entre 1960 y 1970, para conectar nuevos complejos que incrementan su producción en 29,25 % en la red. De esta manera, la energía vertida a la red por EEUU se asemeja a la de la UE. Entre los nuevos reactores de tipo PWR, que han entrado en servicio mediante el empleo de la citada política se encuentran Comanche peak-2 type (1218 MW), que entra en servicio en agosto de 1993, Watts bar-1 (1123 MW) que opera desde mayo de 1996 y Watts bar-2 (1165 MW) en operación desde octubre de 2016 [84].

Rusia también contaba con una enorme potencia nuclear anterior a 1990, con un total de 35 reactores en operación. A esta capacidad habría que sumar 8 nuevos reactores puestos en servicio en el período estudiado, destacando los reactores de tipo PWR Rostov 1 y 2 (950 x2 MW) que operan desde 2001 y 2010 respectivamente, Kalinin-3-4 (950x2MW) que operan desde 2005, 2012 y Novovoronezh 2-1 (1114 MW) que entra en servicio en 2017 [84]. Con la entrada de los citados reactores, Rusia dispone de un aporte energético que supera los 50 Mtoe anuales, lo que la hace la cuarta potencia mundial, por detrás de China, EEUU y la UE [8].

La evolución de la contribución nuclear al mix en Japón está marcada por la tragedia de Fukushima, el 11 de marzo de 2011. El aporte nuclear había pasado de 52,70 Mtoe en 1990 a 75,10 Mtoe en 2010, generando este aumento la apertura de plantas tipo PWR como Hamaoka -4 (1092MW), Hamaoka-5 (1325 MW), Higashi Dori-1 (1067 MW), Kashiwazaki Kariwa-2,3,4,5,6,7 (1067x6 MW), Ohi-3,4 (1127x2 MW) o Shika-2 (1108 MW), todos estos reactores puestos en servicio entre los años 1990 y 2010. Tras el accidente de la planta de Fukushima Dai-ichi, los 39 reactores del país fueron parados. Como resultado del suceso, en septiembre de 2012 se creó la Autoridad de Regulación Nuclear (NRA), como organismo regulador autónomo, regulando lo concerniente al empleo de la energía atómica en Japón con fines energéticos. De tal manera, la regulación y la supervisión de este tipo de energía queda en manos del citado organismo, que ejerce su criterio de manera independiente de cualquier figura o ministerio estatal. La nueva regulación impuesta por la NRA ha permitido

la reapertura paulatina de algunos de los reactores del país, registrándose una generación nuclear en 2019 de 63,8 TWh, lo que representa el 6,4% de la energía eléctrica total generada en el país [8].

China por su parte instala 35 nuevos reactores en el periodo estudiado, pasando a una producción anual de 69,00 Mtoe, lo que la convierte en la tercera potencia mundial en el empleo de este tipo de energía al superar a Rusia. Entre los nuevos reactores PWR se incluye a Fangchenggang 1-2 (1000x2 MW) puesto en funcionamiento en 2016, Fuqing 1-2-3 (1000x3 MW) puesto en funcionamiento en 2014, 2015, 2016 respectivamente, Hongyanhe 1-2-3-4 (1061x4 MW) 2013, 2014, 2015, 2016 respectivamente, Ningde 1-2-3-4 (1018x4 MW) 2013, 2014, 2015, 2016 y Yangjiang 1-2-3 (1000x3 MW) 2014, 2015, 2016 respectivamente [84].

A lo largo de la serie histórica, ha sido destacable la puesta en servicio de nuevos reactores en el conjunto de países en vías de desarrollo estudiado, pasando en el caso de India a un total de 22 reactores en operación en 2018, manteniéndose la totalidad de los reactores en operación. De esta manera el país asiático ha pasado de una producción anual de 1,54 Mtoe (1990), a 9,31 Mtoe. Este aumento en la capacidad es gracias a los nuevos reactores tipo PWR instalados, los cuales incluyen a Kudamkulam 1-2 (932 + 917 MW), puestos en funcionamiento en 2014 y 2016 respectivamente.

La capacidad nuclear sigue evolucionando en los territorios estudiados, con nuevos reactores en construcción en los que predomina el tipo PWR. Así, diez nuevos reactores tipo PWR están en construcción en China, proyectados para sumar 10.782 MW. India construye 2 nuevos reactores tipo PWR, 4 tipo PHWR y 1 tipo Reactor-generador rápido (FBR), que sumarán un total de 4.824 MW. Rusia por su parte está construyendo 6 nuevos reactores tipo PWR, con una potencia proyectada de 4.573 MW. Por otro lado, Japón solo está construyendo 2 nuevos reactores tipo Reactor de agua en ebullición (BWR), con una potencia proyectada de 2.653 MW. Las políticas para alejarse de las plantas de energía nuclear han significado que, entre todos los miembros de la UE, solo Francia tiene un solo reactor de tipo PWR en construcción.

2.3 Tendencias registradas en el empleo de combustibles

En esta sección se detallarán los cambios más importantes registrados en las tendencias de empleo de combustibles en cada una de los países estudiados, para comparar con la evolución de India, por lo que en el final del epígrafe se realizará el estudio de India con especial detalle. Para lograr este objetivo se han agrupado todos los sectores económicos y se estudiarán los países realizando la agregación de la energía aportada por tipo de combustible, indicando de esta manera, el consumo total de un determinado combustible por país. Esta disposición de los datos, no solo permitirá apreciar los cambios en la tendencia del empleo de los combustibles, también permitirá apreciar la variación en la demanda energética total registrada por un país, apreciándose igualmente qué grupo de combustibles han posibilitado este cambio en la demanda.

Para realizar el sumatorio completo de los combustibles empleados en cada sector, se ha atendido a aportar a estos, los grupos de combustibles que han hecho posible la electricidad consumida. De esta manera para realizar el estudio de cada país, se atenderá a la energía primaria consumida para generar la energía secundaria eléctrica en cada sector. Esta diferenciación a la metodología empleada en secciones anteriores, permite apreciar el total de energía que ha hecho posible la actividad de un sector, atendiendo a la energía primaria. Esta metodología será a la que se atenderá en el resto del trabajo, dado que es el único modo de cálculo de las emisiones de CO₂ resultantes de la actividad económica.

Para comprender la evolución de cada uno de los combustibles estudiados en este trabajo, se facilitarán tablas con el empleo de dichos combustibles en el momento inicial y final de la serie temporal, pudiéndose apreciar el grado de evolución general del combustible en la sociedad estudiada. También se aportará una gráfica que definirá en cada año estudiado la evolución del combustible, mejorando de esta manera, la comprensión de todas las etapas del tránsito.

2.3.1 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en los países a comparar con India

CHINA

China ha registrado una evolución interesante en el consumo de combustibles. La demanda energética ha crecido a lo largo de la serie estudiada desde los 697,5 Mtoe (1990) a precisar una energía equivalente de 2100,2 Mtoe (2018), siendo mayoritariamente suplida por carbón, que aporta como se aprecia en la *Tabla 2.3.1*, un 55,99 % (2018) de la energía. La importancia del carbón en el sistema energético chino es vital, aunque tiende a ser reducido su empleo mediante la incorporación de sistemas libres de emisiones de GEI. De esta manera, a lo largo del periodo estudiado se han venido multiplicando los proyectos que han aportado una energía nueva libre de emisiones equivalente a 250,17 Mtoe, aportados gracias a los esfuerzos en energía nuclear, eólica y solar [8].

Tabla 2.3.1: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

	Carbón	Nafta	GLP	Gasolina	Jet Q.	Queros.	Gasoil	Fueloil	Gas N.	Nuclear	Hidra.	Eólica Solar	Biocomb.	
1990 ^a	59,72	0,00	0,32	2,72	0,08	0,34	3,90	1,86	0,75	0,00	1,56	0,00	28,74	%
1990 ^b	416,60	0,00	2,21	18,94	0,56	2,40	27,20	12,99	5,23	0,00	10,90	0,03	200,50	Mtoe
2018 ^a	55,99	0,00	2,03	6,13	1,11	0,07	8,16	0,55	8,04	3,66	4,91	3,86	5,49	%
2018 ^b	1175,9	0,00	42,63	128,78	23,22	1,53	171,29	11,50	168,82	76,87	103,11	81,12	115,37	Mtoe

^a Porcentaje de energía aportada al país por el combustible citado.

^b Energía aportada por el combustible citado en Mtoe.

El caso de la bioenergía en China es diferente, registrando una caída en su empleo desde aportar 200,5 Mtoe (1990), hasta solo aportar 115,37 Mtoe (2018). Las principales causas de este declive en el empleo de biocombustibles hay que buscarlos en la poca incidencia de biocombustibles en el sector transportes, que emplea únicamente un 1% de estos combustibles entre el mix empleado en el transporte [87]. Otro de los motivos fundamentales hay que buscarlo en la pérdida en los últimos 20 años del uso tradicional de biomasa sólida, empleada para el calentamiento en los hogares de zonas rurales, en favor de sistemas que emplean como combustible gas o derivados del petróleo. Este modo de empleo de la biomasa estaba extendido fuera de las grandes ciudades, donde se emplean

2. ENERGÍA

mayoritariamente sistemas de calefacción central en edificios a base de carbón o derivados del petróleo. El empleo de la biomasa sólida en zonas rurales experimentó una caída por la citada causa que generó una reducción en su empleo desde un 70% a un 30% [87].

El gas natural es otros de los combustibles que han experimentado un auge en su empleo, pasando a lo largo del periodo estudiado de aportar 5,3 Mtoe (1990), a aportar 168,82 Mtoe (2018), empleándolo para el citado año, no solo en la generación eléctrica y las plantas de cogeneración, que consumieron 23,25 y 24,06 Mtoe, respectivamente, sino también en el sector industrial que consumió 27,01 Mtoe, el residencial donde aportó 39,53 Mtoe y el transporte con un consumo de 20,72 Mtoe [8].

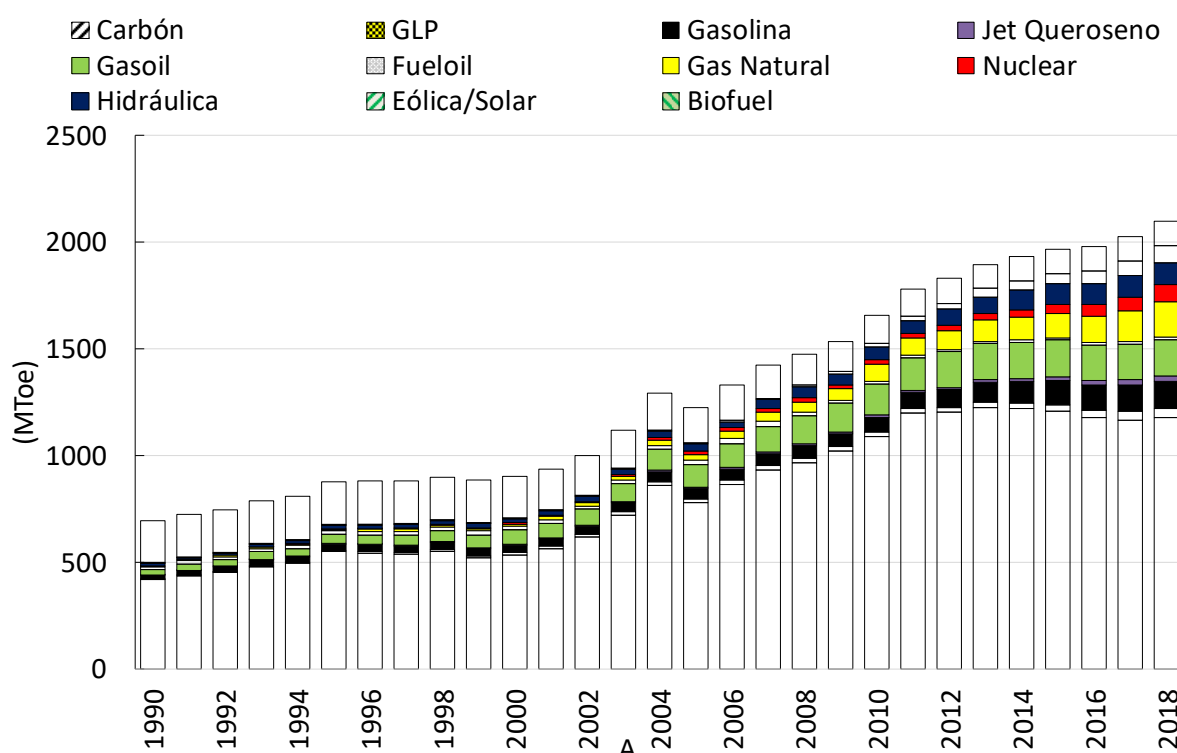


Figura 2.3 1: Evolución de la energía por tipo en China. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

Los aumentos en diésel y gasolina hay que buscarlos en la evolución del mercado de automóviles en China, que ha pasado de matricular $5,7 \times 10^6$ vehículos (2005), a matricular $28,08 \times 10^6$ vehículos (2018), lo que supone un lógico incremento en las necesidades de combustibles para la automoción [73].

2.3.1 Tendencias registrada en el empleo de combustibles en los países a comparar con India

EEUU

El mercado americano ha evolucionado en sus necesidades energéticas desde una demanda de 1570,9 Mtoe (1990), hasta precisar 1879,2 Mtoe (2018). Esta energía ha sido suplida principalmente por gas natural, que aportó para el citado año el 30,89% de la energía total consumida. La *Tabla 2.3.2* y la *Figura 2.3.2* muestran la evolución del conjunto de los combustibles, pudiéndose apreciar el grado de desarrollo del gas natural, dentro del modelo energético de EEUU, donde ha pasado de aportar el 22,57% de la energía al citado 30,98%.

En este mix no solo se ha visto ampliada la participación del gas natural, sino que se ha reforzado ampliamente la participación de fuentes de energía no emisoras de GEI. De esta manera se han visto potenciadas las participaciones de la energía nuclear, la solar y la eólica y los biocombustibles. Estas fuentes energéticas combinadas aportaron un total de 363,76 Mtoe (2018), lo que supone un 19,36% del conjunto del mix energético para el citado año.

Tabla 2.3.2: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en EEUU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

	Carbón	Nafta	GLP	Gasolina	Jet Q.	Queros.	Gasoil	Fueloil	Gas N.	Nuclear	Hidra.	Eólica Solar	Biocomb.	
1990 ^a	27,90	0,00	1,26	20,35	3,23	0,13	8,83	1,09	22,57	10,14	1,50	0,93	2,08	%
1990 ^b	438,32	0,00	19,77	319,67	50,73	2,07	138,69	17,11	354,53	159,33	23,49	14,54	32,72	Mtoe
2018 ^a	16,25	0,00	0,55	19,01	2,94	0,01	9,55	0,10	30,89	11,67	1,35	2,34	5,35	%
2018 ^b	305,33	0,00	10,29	357,22	55,17	0,19	179,37	1,95	580,50	219,22	25,41	43,99	100,55	Mtoe

^a Porcentaje de energía aportada al país por el combustible citado.

^b Energía aportada por el combustible citado en Mtoe.

El empleo de queroseno y el fueloil se ha visto reducido, pasando de contribuir un 1,22 % al mix, a únicamente hacerlo en un 0,11%. Las causas de este declive hay que buscarlas en lo poco práctico que resulta la utilización de los citados combustibles en comparación con el gas natural.

Centrándonos en el caso del fueloil, este es un combustible residual de alto poder calorífico y de bajo costo relativo, con aplicaciones numerosas dentro de la industria, pero también

2. ENERGÍA

en la operación de motores de barcos mercantes, en la combustión de calderas industriales, así como en centrales térmicas [88]. Este combustible, precisa de una canalización especial para mantener la temperatura de operación, dado que la viscosidad del elemento puede impedir el bombeo e incluso el empleo del mismo, si el combustible baja a la temperatura ambiente. Uno de los procesos de calentamiento más empleados en la industria, es el calentamiento mediante vapor de agua, para lo que se emplean canalizaciones combinadas vapor/fueloil, alojadas en un elemento de unión que protege de la temperatura exterior. El proceso se basa principalmente en la transferencia de calor desde el vapor de agua hacia el fueloil, empleando para ello serpentines de acero inoxidable distribuidos uniformemente. Este vapor se suministra a una temperatura que rondan los 150 grados centígrados, requiriendo un alto consumo de combustible previo simplemente para mantener la temperatura óptima de bombeo [88]. Este problema, unido al de la suciedad que genera el fueloil y a los retrasos a la hora de las puestas en marcha dado el tiempo previo de precalentamiento de las líneas, están detrás del empleo de combustibles más eficientes.

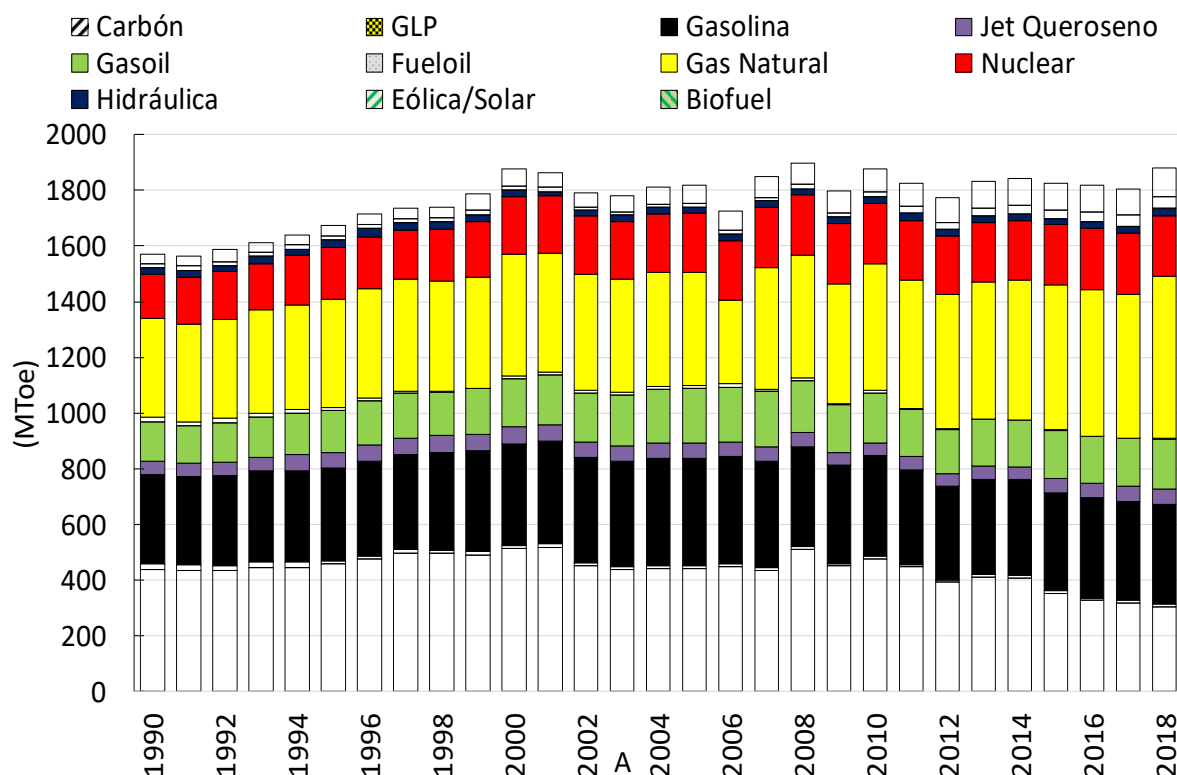


Figura 2.3.2: Evolución de la energía por tipo en EE.UU. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.3.1 Tendencias registrada en el empleo de combustibles en los países a comparar con India

El gasoil y sobre todo la gasolina, han sido tradicionalmente elementos que se han destacado entre los combustibles empleados en EEUU, dado el alto grado de empleo en el sector transportes.

El carbón se ha visto reducido en su empleo bajando de aportar 438,32 Mtoe (1990) hasta aportar 305,33 Mtoe (2018), lo que supone reducir su aportación para el año citado hasta solo aportar el 16,25% del mix [8].

UNIÓN EUROPEA

La Unión presenta unas necesidades energéticas que han variado desde precisar 1195,6 Mtoe (1990), hasta consumir 1200,5 Mtoe (2018), lo que muestra una evolución a lo largo de la serie temporal marcada por la eficiencia energética. El elemento combustible que aporta la mayor parte de la energía en el sistema europeo ha sido el gas natural, con un 24,54% del total de la energía consumida. Al igual que en los casos referidos con anterioridad, el mix ha evolucionado mediante la incorporación de numerosos proyectos que aportan energía sin emisiones de GEI, siendo notables las incorporaciones mediante las tecnologías eólica y solar, que han sumado más de 50 Mtoe a la energía aportada al principio de la serie temporal, ampliando su participación hasta alcanzar el 4,48 % del total de energía consumida.

Tabla 2.3.3: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en la UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

	Carbón	Nafta	GLP	Gasolina	Jet Q.	Queros.	Gasoil	Fueloil	Gas N.	Nuclear	Hidra.	Eólica Solar	Biocomb.	
1990 ^a	24,44	0,14	1,30	10,98	0,36	0,26	17,16	3,47	19,38	16,65	2,09	0,29	3,47	%
1990 ^b	292,20	1,69	15,53	131,33	4,33	3,14	205,21	41,51	231,66	199,09	24,94	3,47	41,49	Mtoe
2018 ^a	10,10	0,11	1,36	6,29	0,58	0,35	21,84	0,42	24,54	17,71	2,51	4,48	9,71	%
2018 ^b	121,26	1,29	16,34	75,54	6,96	4,17	262,18	5,09	294,61	212,65	30,08	53,74	116,58	Mtoe

^a Porcentaje de energía aportada al país por el combustible citado.

^b Energía aportada por el combustible citado en Mtoe.

2. ENERGÍA

La *Tabla 2.3.3* muestra el aporte de energía por cada uno de los combustibles estudiados por este trabajo, siendo representativa la caída en el empleo del fueloil, que aportaba una energía equivalente al 3,47% (1990), quedando su participación en el 0,42% (2018). A esta caída se debe sumar la del carbón que ha caído desde un 24,44% (1990), hasta ver reducida su participación al 10,10% (2018). Los motivos de esta caída hay que buscarlo en el cambio de política de la Unión, encaminadas a favor de tecnologías con menor emisión de GEI y mayor eficiencia, como son las que emplean sistemas de ciclo combinado que utilizan como combustible gas natural [8].

Son claves diferenciadoras de la política de la Unión el empleo de nafta, que contribuye en similar proporción a lo largo de la serie temporal, así como la reducción en el empleo de la gasolina, sustituido mayoritariamente a lo largo de la serie temporal estudiada por el diésel, al contrario de los casos analizados para Japón o Estados Unidos, que presentan un modelo de transporte familiar basado en la gasolina.

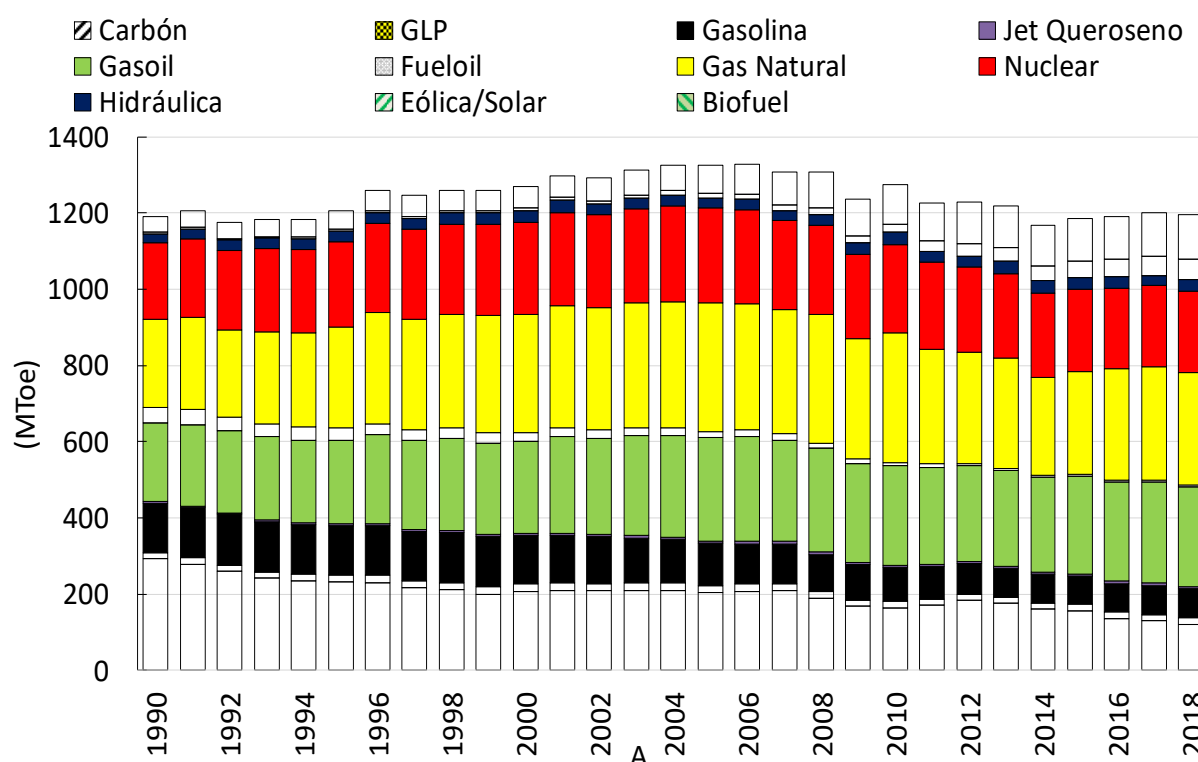


Figura 2.3.3: Evolución de la energía por tipo en la UE. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

La *Figura 2.3.3* muestra la evolución de los combustibles más comunes en el mix energético de la Unión, remarcando la evolución positiva experimentada por combustibles derivados

2.3.1 Tendencias registrada en el empleo de combustibles en los países a comparar con India

de la biomasa, que han avanzado desde aportar 41,49 Mtoe (1990), hasta contribuir con 116,58 Mtoe (2018), lo que supuso alcanzar un 9,71% del mix, siendo su empleo mayoritario en la generación eléctrica, en ciclos que aprovechan la biomasa forestal o los gases derivados del almacenamiento de residuos. Las aportaciones conjuntas de estos combustibles aportaron el equivalente a 22,68 Mtoe (2018) en plantas de generación eléctrica, más 35,83 Mtoe (2018) en plantas de cogeneración. Otra de las aplicaciones de los biocombustibles se centró en los destilados empleados para reemplazar en parte, o en su totalidad, la energía de los combustibles tradicionales en sistemas de automoción. Estos biocombustibles aportaron una cantidad de energía equivalente a 16,55 Mtoe (2018) [8].

La energía nuclear aún aporta un 17,71 % de la demandada por el sistema europeo. Las políticas iniciadas a raíz del accidente de Fukushima, comentadas en apartados anteriores, irán mermando esta contribución en un futuro, aunque para el final de la serie estudiada, contribuyeron aún con 212,65 Mtoe (2018).

RUSIA

La Federación Rusa presenta unas necesidades energéticas que han variado desde precisar 339,31 Mtoe (1990), hasta consumir 332,5 Mtoe (2018), alcanzando el consumo previo a la gran crisis sufrida tras la desintegración de la URSS. El elemento combustible que aporta la mayor parte de la energía en el sistema ruso ha sido el gas natural, destacándose hasta aportar casi la mitad de la energía que consume el país, dado que su aporte se cifra en un 44,61% del total de la energía consumida para 2018. Este elemento aporta energía a todos los sectores de la economía rusa, contribuyendo entre otros, al sector residencial con un total energético de 67,89 Mtoe (2018), o al sector transporte con 32,27 Mtoe (2018).

Es destacable apuntar en el caso ruso, la nula evolución de incorporaciones de nuevos proyectos que aporten energía sin emisiones de GEI, salvando los proyectos hidráulicos y nucleares citados con anterioridad. De este modo, el sistema energético ruso recibe nula o mínima incorporación energética mediante las tecnologías eólica y solar.

La *Tabla 2.3.4* muestra el aporte de energía por cada uno de los combustibles estudiados por este trabajo, siendo representativa la caída en el empleo del fueloil, que aportaba en 1990 el 6,19% de la energía, quedando su participación en el 0,49% (2018). A esta caída se debe sumar la del carbón que ha caído desde un 47,25% (1990), hasta ver reducida su participación al 8,20% (2018). Los motivos de esta caída hay que buscarlas en el cambio de política de la Federación Rusa en favor de tecnologías con mayor eficiencia, como son las que emplean sistemas de ciclo combinado que utilizan como combustible gas natural [8].

2. ENERGÍA

Tabla 2.3.4: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

	Carbón	Nafta	GLP	Gasolina	Jet Q.	Queros.	Gasoil	Fueloil	Gas N.	Nuclear	Hidra.	Eólica Solar	Biocomb.	
1990 ^a	13,93	0,00	0,91	9,07	2,55	0,31	15,32	6,19	36,03	9,08	4,20	0,01	2,39	%
1990 ^b	47,25	0,00	3,10	30,78	8,66	1,07	51,98	21,01	122,24	30,83	14,27	0,02	8,11	Mtoe
2018 ^a	8,20	0,00	3,58	10,48	1,67	0,00	8,75	0,49	44,61	16,03	4,94	0,06	1,20	%
2018 ^b	27,25	0,00	11,89	34,85	5,55	0,00	29,09	1,64	148,33	53,30	16,44	0,19	3,98	Mtoe

^a Porcentaje de energía aportada al país por el combustible citado.

^b Energía aportada por el combustible citado en Mtoe.

El sistema que abastece de energía al sector transportes ha evolucionado al empleo mayoritario para automóviles domésticos de gasolina, circunscribiendo el diésel a transportes pesados, flotas pesqueras o para el uso residencial con una aportación de energía en los hogares de 1,63 Mtoe (2018). Esta política hace que el consumo de gasoil sea inferior al consumo de gasolina, como ocurre en EEUU o Japón [8].

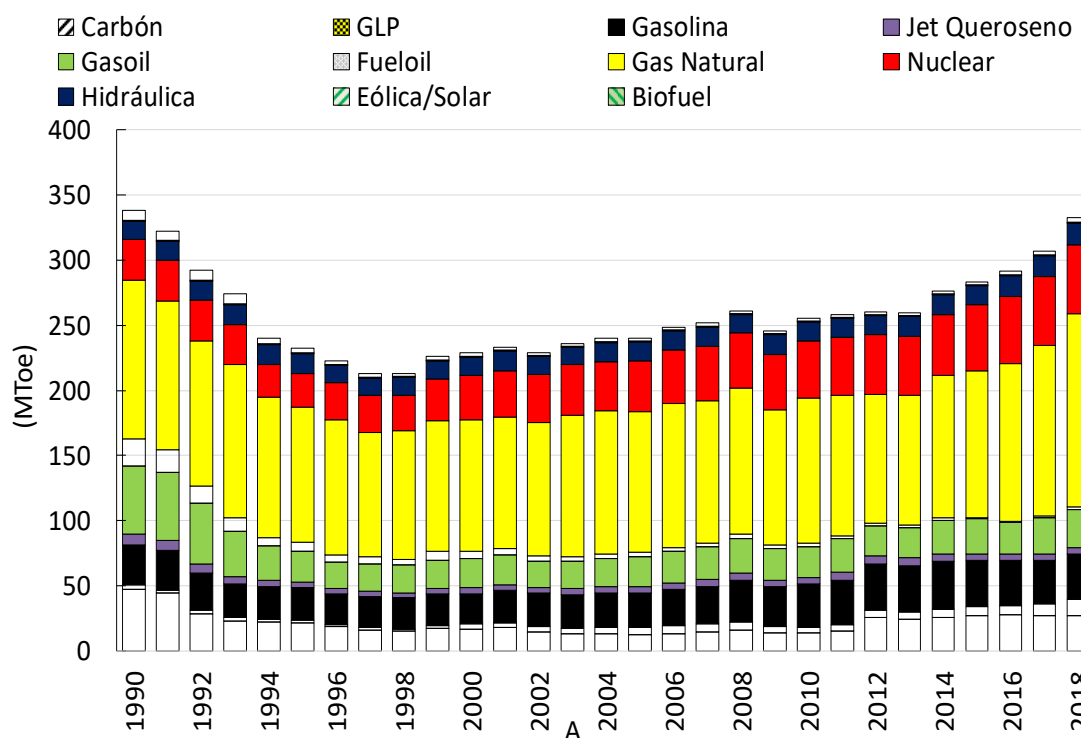


Figura 2.3.4: Evolución de la energía por tipo en Rusia. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.3.1 Tendencias registrada en el empleo de combustibles en los países a comparar con India

La energía nuclear se ha visto reforzada tras las incorporaciones citadas en el apartado 2.2.7 Energía Atómica, donde se desgranaron las nuevas plantas y tecnologías empleadas. Las incorporaciones efectuadas han posibilitado ampliar la cobertura nuclear al mix desde los 30,83 Mtoe (1990), a alcanzar los 53,30 Mtoe (2018) [8].

La *Figura 2.3.4* muestra la evolución de los combustibles empleados por la Federación Rusa, destacando la amplia utilización del gas natural. En ella se precia la disminución en el empleo de carbón citado con anterioridad y la nula participación de los combustibles con baja o nula emisión de GEI. La única excepción a esta afirmación ha sido la contribución de la energía hidroeléctrica, contribuyente de las necesidades de la Federación en un 4,20% (1990), subiendo su participación hasta el 4,94 % (2018).

El gas licuado del petróleo también ha experimentado un aumento aportando 11,89 Mtoe (2018), lo que ha supuesto pasar de aportar un total del mix del 0,91% (1990), a alcanzar el 3,58% (2018).

JAPÓN

El Estado del Japón, presenta escasa variación en sus necesidades energéticas en el periodo estudiado. Así, sus necesidades iniciales se fijaban en 306,64 Mtoe (1990), hasta alcanzar los 332,29 Mtoe (2018). El elemento combustible que aporta mayor proporción en la energía consumida es el gas natural, que debe cubrir la tremenda brecha dejada por el cierre de las centrales nucleares, después de los cambios en la política energética nipona, tras el accidente de la planta de Fukushima. Desde el momento del accidente, se cambió la regulación de las plantas y solo se han podido abrir aquellas que cumplen los actuales estándares de operación, por lo que la porción tradicional que aportaban las nucleares se cubre con gas natural. Este combustible, cubría en 2018 un 28,79% del total de la energía consumida. Del mismo modo, el empleo del carbón experimentó un auge después del citado accidente, contribuyendo a la energía total con un 25,51% (2018). El país ha comenzado, al igual que otros casos estudiados con anterioridad, una política de implantación de energías renovables que los ha llevado a disponer de un 9,3% (2018), de su energía total cubierta gracias al aporte de las tecnologías eólicas, solar, biocombustibles e hidroeléctrica, aunque esta contribución no supe a la energía que aportaban las nucleares.

2. ENERGÍA

Tabla 2.3.5: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

	Carbón	Nafta	GLP	Gasolina	Jet Q.	Queros.	Gasoil	Fueloil	Gas N.	Nuclear	Hidra.	Eólica Solar	Biocomb.	
1990 ^a	16,66	1,94	3,66	10,77	0,96	6,74	17,39	4,54	15,30	17,19	2,46	0,90	1,49	%
1990 ^b	51,10	5,95	11,23	33,03	2,93	20,67	53,33	13,91	46,90	52,70	7,56	2,75	4,58	Mtoe
2018 ^a	25,51	1,78	1,67	11,01	1,17	3,34	11,16	1,18	28,79	5,09	2,10	2,58	4,62	%
2018 ^b	84,76	5,91	5,56	36,60	3,90	11,10	37,09	3,91	95,67	16,92	6,96	8,58	15,34	Mtoe

^a Porcentaje de energía aportada al país por el combustible citado.

^b Energía aportada por el combustible citado en Mtoe.

La *Tabla 2.3.5* muestra el aporte de energía y el porcentaje con respecto al total de cada uno de los combustibles estudiados por este trabajo, siendo representativa, como en otros casos estudiados, la caída en el empleo del fueloil, que aportaba el 4,54% (1990), de la energía, quedando su participación en el 1,18% (2018), siendo la razón de esta bajada la misma que se comentó para el caso de EEUU. A esta caída se debe sumar la del queroseno, que curiosamente aporta una gran cantidad de energía al país, dado que se prodiga su empleo en el ámbito doméstico como combustible para calefacción [89]. Este combustible que aportaba un 6,74% (1990) ha visto su representación caer hasta el 3,34% (2018), en favor de nuevos sistemas de calefacción que emplean elementos con baja emisión de CO₂ [89].

El país ha visto igualmente una caída en el empleo del gasoil, empleado en menor medida para el transporte de vehículos automóviles, donde el combustible más empleado es la gasolina [8].

La *Figura 2.3.5* muestra la evolución experimentada por el país, donde se puede apreciar el gran esfuerzo realizado por la sociedad japonesa, en eficiencia y regulación del consumo tras el accidente de Fukushima en 2011. Si se compara el gasto energético previo al accidente se puede apreciar que alcanzaba un máximo, con una necesidad de abastecimiento de 387,18 Mtoe (2010), para reducirse esta hasta precisar únicamente 332,029 Mtoe (2012), tras el citado año. En el año previo al suceso, la energía nuclear cubría el 19,4% de las necesidades energéticas totales del país, que tuvo que ampliar rápidamente la cobertura en generación eléctrica mediante gas natural, ampliando el aporte que el gas cubría, pasando de dispensar una cantidad de energía equivalente de 57,73 Mtoe (2010), a aportar 75,32 Mtoe (2012), solo para cubrir parte del vacío creado en la distribución de energía eléctrica [8].

2.3.1 Tendencias registrada en el empleo de combustibles en los países a comparar con India

El gas natural se emplea también en plantas para generar calor, con una modesta contribución de 0,34 Mtoe (2018). También se registra su empleo en el sector transportes con un aporte energético equivalente a 0,09 Mtoe (2018) [8].

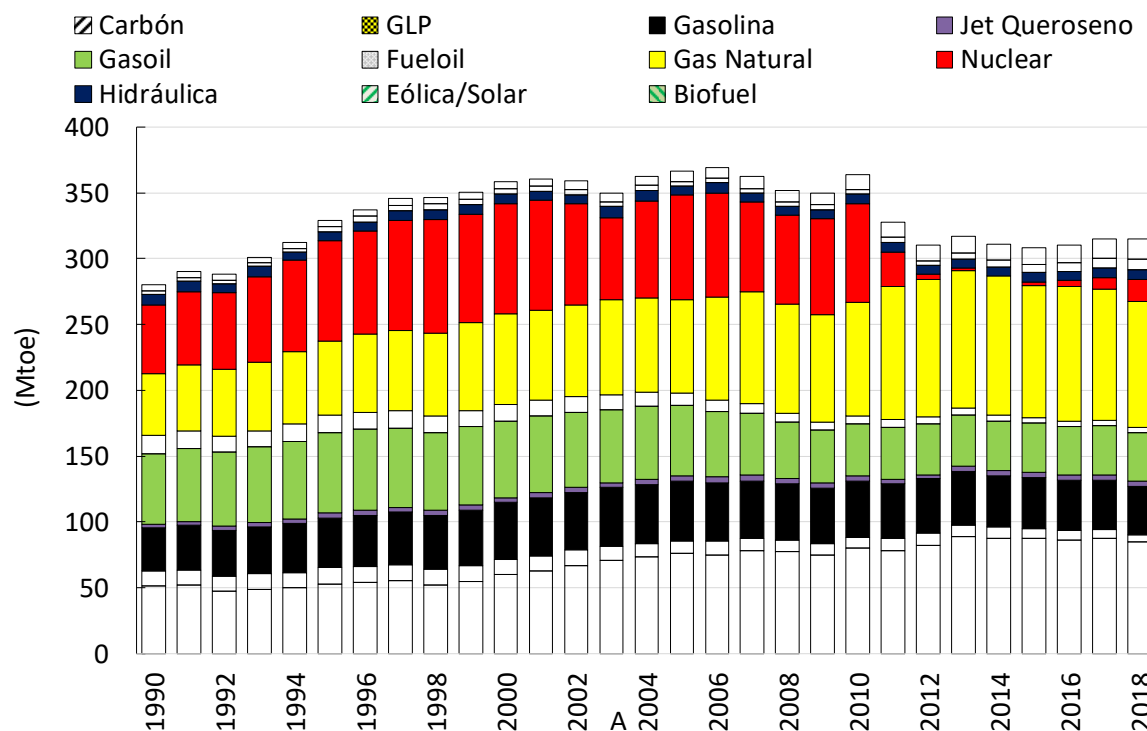


Figura 2.3.5: Evolución de la energía por tipo en Japón. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2.3.2 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en India

En el periodo estudiado, India ha evolucionado enormemente, precisando para la operación de sus sectores económicos una cantidad equivalente de energía de 775,23 Mtoe (2018), lo que representa un 194,7 % más que la energía necesaria para el principio de la serie temporal, que simplemente alcanzaba los 263,06 Mtoe (1990). El elemento combustible que más energía aporta al sistema indio sigue siendo el carbón, que ha dominado el transcurso del periodo temporal estudiado, ampliando su participación hasta un 49,86% (2018). El sistema indio ha ampliado su participación entre diferentes combustibles, destacando el citado carbón, pero también la nafta, el GLP, el queroseno de aviación, el gasoil, el gas natural, la energía nuclear y la energía solar. Apreciándose del mismo modo, reducciones en la aportación de energía mediante tecnologías hidroeléctrica, biomasa, fueloil y queroseno.

La *Tabla 2.3.6* muestra la energía aportada por cada combustible y el porcentaje que esto representa en el sistema indio, para los años final y comienzo de la serie histórica estudiada, pudiéndose apreciar las reducciones antes mencionadas en el empleo del queroseno, que se sigue empleando minoritariamente en el entorno doméstico con un aporte de 3,23 Mtoe (2018), siendo el resto empleado en el sector comercial y servicio público. Este combustible recibía subvenciones como programa para dotar de cocina moderna e iluminación a los hogares más pobres, donde no se contaba con red eléctrica. Estas subvenciones han sido objeto de duras críticas encabezadas por instituciones financieras internacionales, registrándose intentos por parte del gobierno indio para reducir o eliminar los subsidios al queroseno, teniendo que dar marcha atrás por la fuerte resistencia pública [90]. El queroseno es a menudo mezclado con el diésel y desviado de su empleo subsidiado, por lo que el Gobierno de la india lo ha puesto bajo su control directo, promoviendo sistemas energéticos basados en la energía solar y el GLP [90].

Tabla 2.3.6: Porcentaje y energía aportada por cada combustible en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

	Carbón	Nafta	GLP	Gasolina	Jet Q.	Queros.	Gasoil	Fueloil	Gas N.	Nuclear	Hidra.	Eólica Solar	Biocomb.	
1990 ^a	30,80	0,32	0,91	1,35	0,19	3,20	7,60	1,58	1,56	0,61	2,34	0,00	49,54	%
1990 ^b	81,02	0,84	2,38	3,55	0,50	8,42	19,99	4,16	4,12	1,60	6,16	0,01	130,31	Mtoe
2018 ^a	49,86	0,62	3,16	3,65	0,54	0,43	9,90	0,54	3,70	1,27	1,68	1,28	23,37	%
2018 ^b	386,52	4,77	24,50	28,28	4,17	3,33	76,77	4,22	28,69	9,85	13,00	9,95	181,20	Mtoe

^a Porcentaje de energía aportada al país por el combustible citado.

^b Energía aportada por el combustible citado en Mtoe.

2.3.2 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en India

El fueloil, como se ha comentado para otros países, ha bajado su aportación porcentual también en India, pasado de contribuir en 1990 con el 1,58 % del total de la energía consumida por el estado, a aportar simplemente el 0,54% en 2018. Esta circunstancia se debe no a una reducción en su empleo, que se mantiene constante, con un aporte energético equivalente de 4,22 Mtoe (2018), sino a la mayor aportación de otros combustibles como resultado de adaptarse a la creciente demanda. Este combustible contribuye con una energía residual en la generación eléctrica donde aporta una energía equivalente a 0,35 Mtoe (2018). El combustible también se emplea en la producción industrial y es curioso que aun aporte una cantidad de energía equivalente a 0,72 Mtoe (2018), en el sector transportes. La continuidad en el empleo de este combustible es un claro elemento diferenciador, con respecto a la política energética del resto de sociedades analizadas, a excepción de China, que en su conjunto han abandonado el consumo de fueloil, quedando su empleo restringido a limitadas aplicaciones.

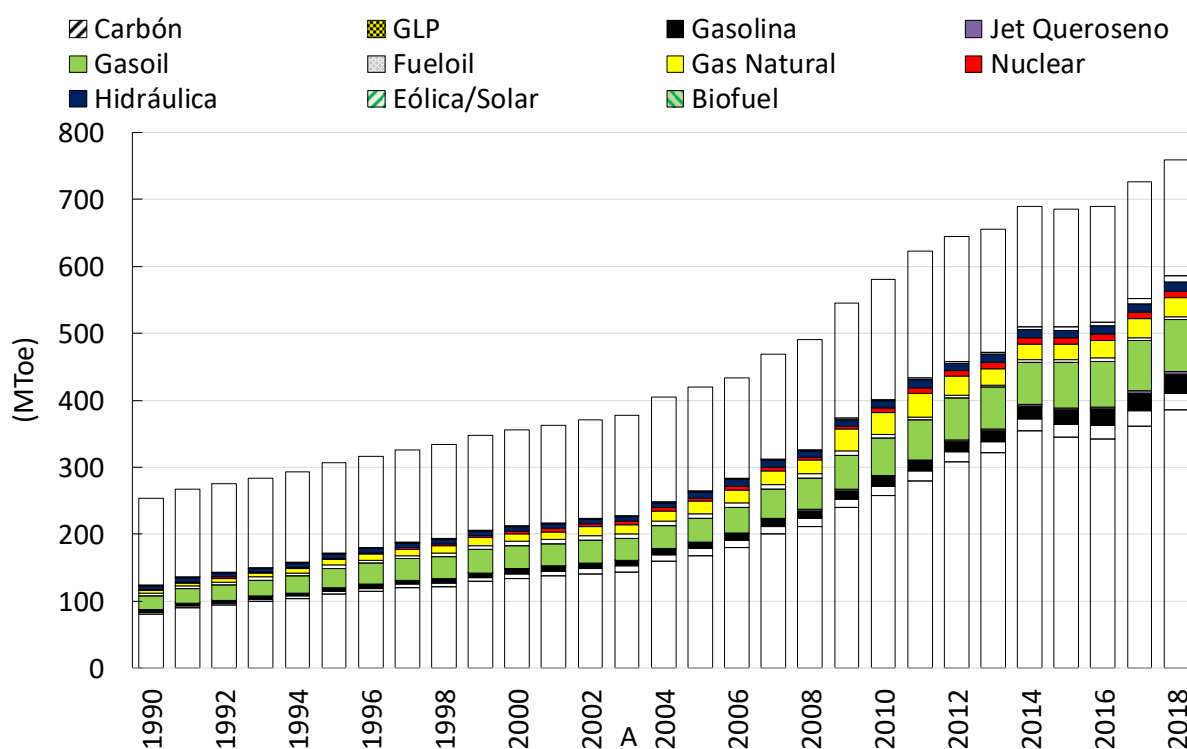


Figura 2.3.6: Evolución de la energía por tipo en India. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

La *Figura 2.3.6* muestra la evolución de los combustibles empleados por el sistema energético indio, destacándose el amplio porcentaje de energía aportada por los biocomustibles, que curiosamente se ha venido reduciendo a lo largo de la serie temporal. Esta aportación está encabezada por el empleo tradicional en zonas rurales de biomasa sólida para aportar calor a los hogares y cocinar [8]. Esta fuente de energía renovable,

2. ENERGÍA

considerada como una alternativa a los derivados del petróleo, ha venido reduciendo su empleo a pesar de las medidas impuestas por el Gobierno indio para ampliar su producción y uso. Como parte de esta propuesta el Gobierno indio lanzó un plan para el impulso de los biocombustibles en 2003, pretendiendo tres actuaciones diferenciadas, por un lado, dotar a su sistema energético de mayor capacidad de independencia, y por otro, estimular el desarrollo rural y alcanzar menor impacto ambiental [91]. La citada política pretende alcanzar una mezcla de biocombustibles, con los combustibles tradicionales de hasta un 20 %. Este programa pretende emplear zonas de cultivo baldío, para no afectar a la agricultura que provee de la necesaria materia prima para la alimentación, evitando así, posibles conflictos derivados de salud alimentaria o de encarecimiento de alimentos necesarios para la población. Entre los elementos a emplear para el desarrollo de biocombustibles estacan el bioetanol, obtenido a partir de melaza de caña de azúcar y el biodiésel, producido a partir de cultivos de semillas no comestibles [91].

En cuanto a la energía hidroeléctrica, se ha registrado una subida en la energía entregada por esta fuente, pero de menor cuantía que la subida en la demanda total, lo que hace que el porcentaje asociado a esta tecnología se reduzca. La subida experimentada por la hidroeléctrica hay que buscarla en las nuevas incorporaciones y actuaciones comentada en el 2.2.6 *Energía Hidroeléctrica*. Así, la energía hidroeléctrica aportó 13,0 Mtoe (2018), lo que supone una entrega de más del doble de la energía aportada por esta tecnología en 1990.

Entre las tecnologías que han experimentado un auge se encuentran los tradicionales combustibles para el transporte, el gasoil y la gasolina. Estos combustibles han ampliado su participación, tal y como muestra la *Tabla 2.3.6*. En concreto, los aportes de estos combustibles alcanzaron una participación del 3,65 y 9,90 % (2018), para el gasoil y la gasolina, respectivamente, gracias al aumento de las matriculaciones acaecidas en el estado indio a lo largo de la serie estudiada, lo que ha aumentado la demanda de este tipo de combustibles. Como se citó en apartados anteriores, la industria automotriz ha crecido de manera exponencial en los últimos años, alcanzando a las mayores del mundo. Esta industria aporta el 7,1% al PIB [71]. Cambios en la legislación india permiten en la actualidad un 100% de Inversión Extranjera Directa (IED), lo que implica que los inversores extranjeros no necesitan ningún permiso previo del gobierno de la India. Este cambio en la política ha permitido ampliar las ventas hasta alcanzar un crecimiento del 9,17% los vehículos comerciales 3,03% y los de 2 ruedas un 8,29% durante el periodo abril-enero 2017 [71].

El gas natural a su vez aporta una cantidad equivalente de energía de 28,69 Mtoe (2018), lo que le lleva a alcanzar un porcentaje del mercado del 3,70%, gracias a su empleo en casi todos los sectores indios, desde la industria, comercio y servicio público, pero también aportando una energía equivalente a 14,55 Mtoe (2018) en plantas eléctricas, contribuyendo además para el citado año con 3,25 Mtoe al sector transporte, o 1,17 Mtoe en el sector residencial, donde se emplea para cocinar principalmente en ciudades [8].

2.3.2 Tendencias registradas en el empleo de combustibles en India

Es destacable el impulso llevado a cabo por el Gobierno indio en la implantación de sistemas no emisores de GEI. Así, se han desarrollado numerosos proyectos que han posibilitado la incorporación al mix de 9,95 y 9,85 Mtoe (2018), en tecnologías eólica/solar y nuclear respectivamente, a pesar de ser testimoniales las aportaciones de estas tecnologías al comienzo de la serie histórica.

Ha sido también notable la incorporación del GLP al mix energético indio. Como se comentó con anterioridad, este combustible está supliendo parte de la energía aportada por el queroseno en zonas deprimidas del país, donde se emplea para cocinar [90]. La contribución de este combustible ha crecido hasta posicionarse en el 3,16% (2018), de la energía consumida por el país, lo que supuso un aporte de energía equivalente de 24,5 Mtoe. En concreto, para el citado año, el empleo en el sector residencial se situó en 21,72 Mtoe, 0,20 Mtoe en el sector industrial y 0,18 Mtoe en el sector transporte, quedando completada su aportación con la energía dispensada en el sector comercio y servicio público.

La principal característica que ha tenido el comportamiento del sistema energético indio a lo largo de la serie estudiada, está marcada por el empleo mayoritario de fuentes energéticas de reducido coste, así, se ha visto reforzado el empleo de modelos energéticos basados en el carbón, descartados o en decadencia en el resto de economías empleadas para la comparación con India. Esta tendencia a la reducción en el empleo del carbón se ha verificado incluso en sociedades como China, que aún presentan una fuerte dependencia de este combustible.

2.4 Integración de las energías libres de emisiones de GEI

El objeto de este apartado es mostrar, en primer lugar, el tamaño y fuentes energéticas que componen, de modo exclusivo, el sistema de generación de energía eléctrica en cada país objeto de estudio, para revisar de esta manera, cada una de las tecnologías que producen esta energía secundaria de una manera libre de emisiones de GEI. En segundo lugar, se mostrarán el conjunto de energía consumida por el país, independientemente de su empleo, por lo que se atenderá a la generación eléctrica y al resto de la demanda energética del estado estudiado.

Esta primera representación será totalmente distinta a las mostradas hasta ahora, al representar en primera instancia únicamente la energía por fuentes, que cada país emplea para la generación eléctrica. De esta manera se revisarán los sistemas de generación eléctrica en cada país estudiado, separándolos del resto de sistemas que consumen energía en cada sociedad, lo que aportará una clara imagen de la procedencia y nivel medio resultante de las emisiones relacionadas con el consumo eléctrico. Esta representación de los datos no solo resultará altamente beneficiosa para el desarrollo posterior del presente trabajo, sino que permitirá apreciar con claridad el desarrollo efectivo de la implantación de las tecnologías libres de GEI, en cada una de las sociedades estudiadas para comparar con India.

Para la reducción de las emisiones, sin renunciar al desarrollo que posibilita la disponibilidad de una energía abundante y barata, todas las sociedades han buscado el aporte de energía que provea sus sectores económicos con la menor inversión y costo. A esta tendencia se le une el rechazo a la dependencia energética externa, que supone la necesidad de materias primas como el petróleo, u otros recursos estratégicos que se encuentran localizados en el planeta, cuyo coste se ve incrementado al saberse limitado. Por estas razones y por la necesidad de reducir las emisiones contaminantes, causantes del Cambio Climático, se hace necesaria una transición energética mundial.

Ante este reto, nuevas tecnologías basadas en fuentes no emisoras de GEI, renovables y abundantes en el planeta están siendo desarrolladas, consiguiendo desplazar a algunos tipos de energías que emplean fuentes tradicionales. Algunas de estas fuentes energéticas se están convirtiendo en los últimos años en una alternativa competitiva, gracias al desarrollo de la tecnología que la hace posible, así como al escaso o nulo coste que supone la fuente energética primaria. A este respecto, en las tres últimas décadas la inversión en fuentes de energía renovable, ha posibilitado reducciones de costos cercanos al 40% en tecnologías relacionadas con la biomasa, 70% en geotérmica y 90% en eólica, solar fotovoltaica y solar térmica [92].

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

Es preciso aclarar que este capítulo solo hace mención a aquella porción de las energías no emisoras de GEI que tienen como objeto y resultado la generación eléctrica, quedando por tanto fuera del sumatorio realizado el aporte que estas tecnologías ejercen en la obtención de otro tipo de energía como puede ser la calorífica. Por tanto, quedarán excluidos de este capítulo los sistemas que emplean tecnologías solares de manera térmica para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS), u otros empleos relacionados con la climatización o la obtención de otra energía que no sea la eléctrica.

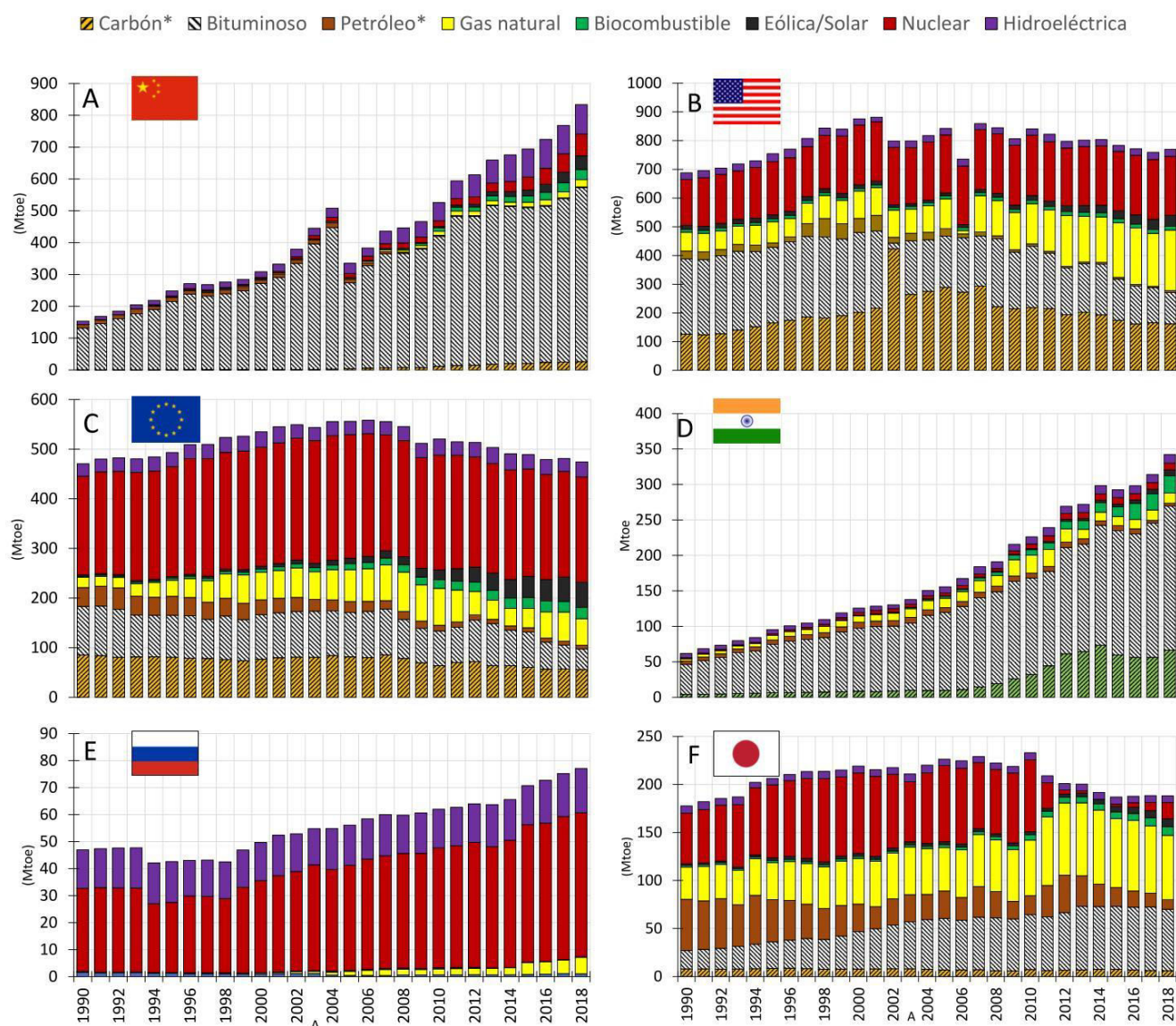


Figura 2.4.1: Evolución de la energía aportada por diferentes combustibles para la generación eléctrica en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

2. ENERGÍA

CHINA

En el panel A de la *Figura 2.4.1*, se puede apreciar la evolución de China en cuanto a los combustibles empleados para la generación eléctrica, pudiéndose apreciar como combustible base para la generación al carbón. Este material aporta un total de energía primaria equivalente a 638,39 Mtoe (2018), lo que representaba el 68,74 % del total de la energía aportada al sector. El resto de fuentes energéticas está encabezado por la aportación efectuada por la energía hidroeléctrica, que contribuye con un 11,10 % del total de energía al sector, con un aporte equivalente al 103,11 Mtoe (2018). Este aporte ha crecido en los últimos años, sumando nuevos proyectos, como los citados en el apartado 2.2.6 *Energía Hidroeléctrica*, a los tradicionales que aportaron gran parte de la energía en el pasado. De esta manera la evolución en lo concerniente al aporte mediante energía hidroeléctrica ha sufrido numerosos impulsos que han posibilitado pasar del aporte inicial equivalente de 10,90 Mtoe (1990), a los citados 103,11 Mtoe. Estos fueron especialmente representativos entre los años 2006 a 2008, cuando se pasó de una entrega energética de 27,47, a aportar 50,32 Mtoe (2008), y entre los años 2011 a 2014 cuando se pasó de 59,16 a 90,34 Mtoe (2014) [8].

Con un 8,28 % de la contribución en el sector de la generación eléctrica se encuentra el sector nuclear, que aportó 76,86 Mtoe (2018), siendo destacable la cantidad final entregada, teniendo en cuenta que esta tecnología se puso en operación por primera vez en el país asiático en 1993, aportando únicamente 0,42 Mtoe.

Con un 5,04% del total se sitúan las tecnologías eólica y solar, que en su conjunto exclusivo para la generación eléctrica aportaron una cantidad de energía equivalente a 46,85 Mtoe (2018), gracias a los impulsos llevados por el estado chino descritos en el apartado 2.2.4 *Energía eólica y solar*. La entrega en cuanto a biocombustibles se refiere, se enmarca en un aporte equivalente a 35,77 Mtoe (2018), aportando de esta manera un 3,85% de la energía primaria consumida por el país.

El gas natural aporta únicamente un 2,70% de la energía primaria para la generación eléctrica, contribuyendo con una energía equivalente a 25,11 Mtoe (2018), siendo su aporte poco representativo comparado con el aporte a sistemas de generación eléctrica de otros países estudiados.

Los derivados del petróleo tienen escaso peso en la generación eléctrica en el Estado chino, aportando únicamente 2,56 Mtoe (2018), lo que se corresponde al 0,28%.

Diferenciando la entrega por fuentes emisoras de GEI, encuentro que el sistema generativo chino ha evolucionado en los años estudiados desde presentar un aporte libre de GEI del 0,06% (1990), correspondiendo a 10,90 Mtoe (1990) de su energía hidroeléctrica. Esta situación ha ido evolucionando a lo largo de la serie temporal estudiada, donde se ha ido

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

ampliando cada año el aporte libre de emisiones de GEI, hasta llegar al 28,28 % (2018), estando el resto de su sistema de generación eléctrica compuesto casi en su totalidad por la energía procedente del carbón.

El sistema generativo de China proporcionó después de las pérdidas por parte de cada tecnología un total de energía eléctrica de 520,64 Mtoe (2018), siendo consumida por cada uno de sus sectores un total de 448,30 Mtoe (2018), debido a las pérdidas en su sistema de distribución [8].

EEUU

En el panel B de la *Figura 2.4.1*, se puede apreciar la evolución de EEUU en cuanto a los combustibles empleados para la generación eléctrica, pudiéndose apreciar como combustible base al carbón. Este material aporta un total de energía primaria equivalente a 288,51 Mtoe (2018), lo que representaba el 35,22% del total de la energía aportada al sector. El resto de fuentes energéticas están encabezados por el gas natural, que contribuye con un 27,36 % del total de energía al sector, con un aporte equivalente a 224,12 Mtoe (2018). Este aporte ha crecido en los últimos años, dado que su nivel al comienzo de la serie temporal se situaba en 65,34 Mtoe (1990) [8].

Con un 26,76 % del aporte en el sector de la generación eléctrica se encuentra la contribución nuclear, que aportó 219,22 Mtoe (2018). Esta tecnología ha estado presente a lo largo de la serie temporal, entregando grandes cantidades de energía desde el comienzo de la serie histórica, con un aporte equivalente de 159,33 Mtoe (1990), muy superior como se ha visto al aportado por el resto de los combustibles a excepción del carbón.

Con un 4,94% del total se sitúan las tecnologías eólica y solar, que aportaron una cantidad de energía equivalente a 40,46 Mtoe (2018), gracias a los impulsos llevados por EEUU en materia de implantación de sistemas que aportan energías renovables descritos en el apartado 2.2.4 Energía eólica y solar. La entrega en cuanto a biocombustibles se refiere, se enmarca en una contribución equivalente a 14,19 Mtoe (2018), aportando de esta manera un 1,73% de la energía primaria consumida por el país.

El potencial en cuanto a energía hidroeléctrica ha sufrido escasas variaciones a lo largo de la serie temporal estudiada, entregando una cantidad de energía semejante en ambos

2. ENERGÍA

extremos de la serie temporal. Así, la transmisión de energía equivalente se situaba en un 3,10%, correspondiendo a 25,41 Mtoe (2018), similares a los 23,49 Mtoe (1990).

Los derivados del petróleo tienen escaso peso en la generación eléctrica en EEUU, contribuyendo únicamente con 7,31 Mtoe (2018), lo que le confiere un aporte porcentual del 0,89%.

Diferenciando la entrega por fuentes emisoras de GEI, el sistema generativo en EEUU ha evolucionado en los años estudiados desde presentar un aporte libre de GEI del 30,10% (1990), gracias a un aporte en todas las tecnologías, que con diferentes grados de implantación aportaron energía libre de GEI. Entre las diferentes tecnologías empleadas destaca la energía nuclear, que para aquel periodo entregaron 159,33 Mtoe (1990). Esta situación ha ido evolucionando a lo largo de la serie temporal estudiada, donde se han ido cada año ampliando el aporte libre de emisiones de GEI, hasta llegar al 36,53 % (2018). Estando el resto de su sistema de generación eléctrica compuesto casi en su totalidad por la energía procedente del carbón y el gas natural.

El sistema de generación eléctrica de EEUU, aportó después de las pérdidas por parte de cada tecnología, un total de energía eléctrica al sistema de comercialización de 354,56 Mtoe (2018), siendo consumida por el conjunto de sus sectores un total de 335,42 Mtoe (2018), debido a las pérdidas en su sistema de distribución [8].

UNIÓN EUROPEA

En el panel C de la *Figura 2.4.1*, se puede apreciar la evolución de La Unión Europea en cuanto a los combustibles empleados para la generación eléctrica, pudiéndose comprobar que, la tecnología base para la generación eléctrica es la nuclear. Esta tecnología aporta en la Unión un total de energía equivalente a 212,65 Mtoe (2018), lo que representaba el 44,80 % del total de la energía aportada al sector. El resto de fuentes energéticas están encabezadas por la contribución efectuada por las plantas de carbón, que aporta un 20,55 % del total de energía al sector, con un aporte equivalente a 97,54 Mtoe (2018). Esta contribución se ha visto reducida en los últimos años, dada la política de la Unión acerca de este combustible citada en el 2.2.1 Demanda cubierta mediante carbón. De esta manera, la evolución en lo concerniente al aporte mediante este combustible ha sufrido diferentes trabas hasta reducir su aportación desde los 183,35 Mtoe (1990), lo que ha supuesto una reducción que ronda el 50% [8].

Con un 11,31 % del aporte en el sector de la generación eléctrica se encuentra la contribución del gas natural, que aportó 53,69 Mtoe (2018), lo que representa una

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

evolución notable de esta tecnología que crece desde aportar únicamente 20,62 Mtoe(1990), siendo la contribución de las plantas operadas con gas natural, una de las destinadas a paliar el efecto de la reducción registrada en el carbón, lo que trae consigo una mejora en la eficiencia de las instalaciones de generación por la superior eficiencia de centrales de ciclo combinado frente a los tradicionales ciclos térmicos de carbón, obteniendo además una notable mejora en las emisiones resultantes [8].

Con un 10,69% del total se sitúan las tecnologías eólica y solar, que en conjunto aportaron una cantidad de energía equivalente a 50,74 Mtoe (2018), gracias a los impulsos llevados a cabo por la Unión descritos en el apartado 2.2.4 Energía eólica y solar. La entrega en cuanto a biocombustibles se refiere, se corresponde a 22,65 Mtoe (2018), contribuyendo de esta manera con un 4,77% de la energía consumida por el sector.

La energía hidroeléctrica aporta al sistema de generación eléctrica un 6,34% de la energía eléctrica final, contribuyendo con una energía equivalente a 30,08 Mtoe (2018), siendo su aporte similar al aportado en el principio de la serie histórica, donde esta tecnología proporcionaba 24,94 Mtoe (1990), cosa que muestra que la Unión ha evolucionado a diferente ritmo que otros estados analizados en este trabajo.

Los derivados del petróleo tienen escaso peso en la generación eléctrica en la Unión, aportando únicamente 7,33 Mtoe (2018), lo que le confiere un aporte porcentual del 1,54%. Esta participación se ha visto reducida a lo largo de la serie estudiada, bajando desde una contribución equivalente a 38,22 Mtoe (1990).

Diferenciando la entrega por fuentes emisoras de GEI, el sistema generativo de la Unión ha evolucionado en los años estudiados desde presentar un aporte libre de GEI del 48,61% (1990), con el aporte principal de las nucleares y la hidroeléctrica, dado que era de escasa importancia en aquel año el aporte libre de GEI de otras tecnologías. Esta situación ha ido evolucionando a lo largo de la serie temporal estudiada, donde se ha ido cada año ampliando el aporte libre de emisiones de GEI, hasta alcanzar el 66,60% (2018). Estando el resto de su sistema de generación eléctrica compuesto, casi en su totalidad, por la energía procedente del gas natural y el carbón.

El sistema generativo de la Unión produjo después de pérdidas, debido a las diferentes eficiencias de cada tecnología empleada, un total de energía eléctrica de 241,75 Mtoe (2018), siendo consumida por cada uno de sus sectores un total de 220,75 Mtoe (2018), debido a las pérdidas en su sistema de distribución [8].

2. ENERGÍA

RUSIA

En el panel E de la *Figura 2.4.1*, se puede apreciar la evolución de Rusia en cuanto a los combustibles empleados para la generación eléctrica, pudiéndose percibir un total de energía empleada en el sector eléctrico equivalente a 77,1 Mtoe (2018). La tecnología base para la generación eléctrica es la nuclear. Esta tecnología aporta en la Federación Rusa un total de energía equivalente a 53,30 Mtoe (2018), lo que representaba el 69,13% del total de la energía aportada al sector. El resto de fuentes energéticas están encabezadas por la contribución efectuada por la hidroeléctrica, que suple un 21,32 % del total de energía demandado por el sector, con una participación equivalente a 16,43 Mtoe (2018). Este aporte ha estado presente a lo largo de la serie histórica, produciéndose escasos cambios en la contribución energética mediante esta fuente [8].

Con un 7,92 % del aporte en el sector de la generación eléctrica se encuentra el aporte del gas natural, que contribuyó con 6,11 Mtoe (2018), lo que representa una evolución notable de esta tecnología que crece desde aportar únicamente 0,28 Mtoe (1990) [8].

Con un 0,24% del total se sitúan las tecnologías eólica y solar, que aportan energía en el sistema ruso de generación eléctrica de manera testimonial, aportando una cantidad de energía equivalente a 0,18 Mtoe (2018). La energía aportada por biocombustibles es nula en el sistema generativo ruso, no habiendo constancia de ninguna planta que emplee este combustible en lo que a generación eléctrica se refiere [8].

Los derivados del petróleo tienen escaso peso en la generación eléctrica en la Federación, aportando únicamente 1,07 Mtoe (2018), lo que le confiere un aporte porcentual del 1,39%. Esta participación se ha visto reducida a lo largo de la serie estudiada, pero se presenta en dos etapas, la primera, de reducción de la necesidad establecidas en el principio de la serie estudiada, con aporte equivalente a 1,57 Mtoe (1990), hasta marcar un mínimo con una aportación equivalente a 0,46 Mtoe (2007). En la segunda etapa esta tendencia se interrumpió, para continuar en una senda hasta alcanzar los 1,07 Mtoe (2018) [8].

Diferenciando la entrega por fuentes emisoras de GEI, el sistema generativo de la Federación Rusa es el que más presencia manifiesta entre los estudiados por este trabajo, evolucionando en los años estudiados desde presentar un aporte libre de GEI del 96,04% (1990), con el aporte principal de las nucleares y la hidroeléctrica. Esta situación ha ido evolucionando a lo largo de la serie temporal estudiada, donde se han ido cada año reduciendo el aporte libre de emisiones de GEI, hasta aportar el 90,69% (2018). Estando el resto de su sistema de generación eléctrica compuesto casi en su totalidad por la energía procedente del gas natural [8]. Esta situación se muestra insólita, dado que ninguna de las sociedades analizadas presenta un aporte libre de GEI tan elevado, mostrando de esta

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

manera una gran diferencia en el sistema generativo de electricidad en Rusia, que se muestra más avanzado que los restantes en lo concerniente a las emisiones.

JAPÓN

En el panel F de la *Figura 2.4.1*, se puede apreciar la evolución del Estado del Japón en cuanto a los combustibles empleados para la generación eléctrica, con una energía aportada por las diferentes tecnologías empleadas de 188,16 Mtoe (2018). En la figura se puede apreciar como combustible base para la generación al carbón. Este material aporta un total de energía primaria equivalente a 69,98 Mtoe (2018), lo que representaba el 37,19% del total de la energía aportada al sector. El resto de fuentes energéticas está encabezado por la aportación efectuada por la energía procedente del gas natural, que contribuye con un 35,52 % del total de energía al sector, con un aporte equivalente al 66,83 Mtoe (2018). Esta participación ha crecido en los últimos años, dado que su nivel al comienzo de la serie temporal se situaba por encima del carbón aportando 33,56 Mtoe (1990) [8].

Con un 8,99 % del aporte en el sector de la generación eléctrica se encuentra la energía nuclear, que contribuyó con 16,92 Mtoe (2018). Esta tecnología ha estado muy presente a lo largo de la serie temporal, siendo en los inicios de la serie estudiada una de las de más presencia en el mix, con un aporte equivalente a 52,70 Mtoe (1990). Esta tecnología sirvió en el pasado para reemplazar al aporte de la energía procedente del petróleo, aportando un máximo del porcentaje del mix de un 40,54% (1998), gracias al esfuerzo descrito en el apartado 2.2.7 *Energía Atómica*, la tendencia para cubrir más del 35% de las necesidades japonesas de generación de energía eléctrica se rompieron con el desastre de Fukushima.

Con un 4,36% del total se sitúan las tecnologías eólica y solar, que en su conjunto aportaron una cantidad de energía equivalente a 8,20 Mtoe (2018), gracias a los impulsos llevados por Japón en materia de implantación de sistemas que aportan energías renovables descritos en el apartado 2.2.4 *Energía eólica y solar*. La entrega de energía procedente de biocombustibles aportó un equivalente a 9,10 Mtoe (2018), contribuyendo de esta manera con un 4,84% de la energía primaria aportada por el país.

El aporte de la energía hidroeléctrica al mix de generación eléctrica japonés, ha sufrido escasas variaciones a lo largo de la serie temporal estudiada, entregando una cantidad de energía semejante en toda la serie temporal. Así, la entrega de energía equivalente se

2. ENERGÍA

situaba en un 3,70% de la energía total, contribuyendo con una energía equivalente a 6,96 Mtoe (2018) [8].

Los derivados del petróleo tienen escaso peso en la generación eléctrica en Japón en 2018, pero curiosamente, para los primeros años de la serie temporal eran los que aportaban la mayor parte de la energía primaria para la obtención de electricidad, por lo que su empleo ha caído desde aportar 53,32 Mtoe (1990) a contribuir únicamente con 10,15 Mtoe (2018), lo que le confiere un aporte porcentual del 5,40%.

Realizando una separación entre las fuentes emisoras de GEI y no, empleadas en el sistema japonés de generación eléctrica, se encuentra que ha evolucionado en dos etapas diferenciadas. La primera, hasta el accidente de Fukushima, donde ha evolucionado desde presentar un aporte libre de GEI del 35,86% (1990), destacando el aporte de las nucleares que para aquel periodo entregaron 52,70 Mtoe. Esta situación evolucionó incorporando nuevos reactores al sistema generativo, permitiendo alcanzar un máximo porcentual libre de GEI de 46,51% (1998). Desde ese momento se produjo una atenuación en el aporte de las centrales nucleares, reduciendo el porcentaje de energía entregada libre de GEI hasta llegar al 39,06 % (2010). Tras el accidente de Fukushima, el Estado japonés realizó cambios drásticos para asegurar el suministro de energía a sus ciudadanos, quedando el porcentaje de energía libre de emisiones en 9,96% (2012). Esta situación se debe al aumento del uso de derivados del petróleo y de gas natural. La situación para el final de la serie histórica estudiada presenta un aporte de energías libres de emisión del 21,89%, gracias a la puesta en servicio de los reactores que han pasado los nuevos y más exigentes controles y a un gran esfuerzo en energía eólica/solar y en biocombustibles, que comenzando desde una generación de 3,23 y 6,04 Mtoe (2012), han evolucionado a una entrega de 8,20 y 9,10 Mtoe (2018) para eólica/solar y biocombustibles, respectivamente [8].

El sistema japonés generó después de las pérdidas por parte de cada tecnología un total de energía eléctrica de 90,32 Mtoe (2018), siendo consumida por cada uno de sus sectores un total de 81,30 Mtoe (2018), debido a las pérdidas en su sistema de distribución [8].

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

INDIA

En el panel D de la *Figura 2.4.1*, se puede apreciar la evolución del mix energético para la generación eléctrica en India, mostrando la evolución en cuanto al aporte que cada tecnología ha realizado al mix. Esto nos da una clara imagen de la energía primaria aportada por las diferentes tecnologías empleadas, que para el final de la serie temporal se situaba en un total de 353,58 Mtoe (2018). En la figura se puede apreciar como el carbón es el combustible base para la generación. Este material aporta un total de energía primaria equivalente a 284,98 Mtoe (2018), lo que representaba el 80,60% del total de la energía aportada al sector. La tipología del carbón empleado en 2018 es similar a lo largo de la serie estudiada, siendo en su mayor parte de alta riqueza, empleando un 75,35% de carbón bituminoso más un 5,32% de carbón de coque, pero también se emplean carbones de baja eficiencia destacando el 16,02% de carbón de tipo sub-bituminoso, un 3,01 de lignito y una cantidad residual de gas de coque.

El resto de fuentes energéticas está encabezado por la aportación realizada por la energía procedente de los biocombustibles, que aportaron un 4,86 % del total de energía al sector con un aporte equivalente a 17,17 Mtoe (2018). Este aporte ha crecido en los últimos años, dado que es una tecnología de nueva implantación en el país, sin que se registren datos de aporte previos a 1999. En concreto, las energías suministradas al sistema de generación eléctrico por los biocombustibles se pueden dividir en tres grandes grupos, el primero, de menor peso, es el referido al biocombustible gaseoso que se emplean en plantas eléctricas, aportando una cantidad equivalente a 0,49 Mtoe (2018). El segundo es el que emplea biocombustible sólido, principalmente madera y residuos forestales, que aportó al sistema eléctrico una cantidad de energía equivalente a 16,04 Mtoe (2018). El tercer grupo, es el de residuos municipales que se queman para generar electricidad, aportando un total de energía equivalente a 0,64 Mtoe (2018) [8].

Con un 4,37 % (2018) del aporte en el sector de la generación eléctrica se encuentra la contribución realizada por el gas natural, que contribuyó con 15,46 Mtoe (2018). Esta tecnología ha ido evolucionando a lo largo de la serie temporal, siendo su aportación al mix en los inicios de la serie estudiada equivalente a 3,46 Mtoe (1990).

Con un 3,68% del total se sitúa la tecnología hidroeléctrica, que aportó una cantidad de energía equivalente a 12,99 Mtoe (2018). Esta tecnología, entre las tradicionales en India, dada la riqueza hídrica del país, contribuía con una gran proporción al mix generativo al comienzo de la serie temporal, aportando un total de energía equivalente a 6,16 Mtoe (1990), lo que suponía un aporte porcentual del 9,56%. Gracias a los impulsos llevados a cabo por India en materia de implantación de sistemas hidroeléctricos, se ha llevado a esta

2. ENERGÍA

tecnología a doblar su aporte con respecto al original, pero desgraciadamente la demanda eléctrica ha subido en una proporción mucho mayor [8].

El aporte de la energía nuclear al mix de generación eléctrica indio ha ido evolucionando desde una aportación residual al comienzo de la serie estudiada. Esta pequeña aportación comentada en el 2.2.7 Energía Atómica, cubría únicamente el 2,48% de las necesidades energéticas indias, con una contribución inicial de 1,6 Mtoe (1990). La evolución alcanzada en esta tecnología, permite al sistema de generación contribuir con un aporte equivalente, para 2018 del 2,79% del total de energía dispensada en el sistema eléctrico, contribuyendo de esta manera, con una energía equivalente a 9,85 Mtoe (2018) [8]. Nótese el gran aumento en términos absolutos, pero que sin embargo representa un pequeño incremento porcentual.

Los derivados del petróleo tienen escaso peso en la generación eléctrica en India, comenzando la serie temporal con un aporte de 5,01 Mtoe (1990). Esta participación se ha venido ampliando en los últimos años hasta alcanzar un máximo de 8,07 Mtoe (2013), cayendo luego su empleo hasta alcanzar una contribución porcentual del 1,18% (2018), con un aporte de 4,18 Mtoe. Esta tendencia es un denominador común entre los países estudiados, que han marcado en diferentes momentos de su historia, un alejamiento de las tecnologías que emplean combustibles derivados del petróleo para la generación eléctrica. En cuanto a los combustibles empleados por India para operar las plantas de generación mediante derivados del petróleo, no se encuentran diferencias fundamentales con respecto al resto de economías, siendo el combustible más empleado para el caso indio el gasoil, responsable de un aporte porcentual dentro de los derivados del petróleo del 88,43%, seguido por el fueloil con un aporte porcentual del 11,33%. De manera residual se emplea nafta con un aporte del 0,17%, más una pequeña cantidad de GLP que completa la totalidad [8].

Diferenciando la aportación de fuentes emisoras de GEI, el sistema generativo de energía eléctrica en India ha evolucionado en los años estudiados desde presentar un aporte libre de GEI del 12,02% (1990), con el aporte casi exclusivo de las tecnologías nuclear e hidroeléctrica, dada que las otras fuentes eran de escasa importancia en aquel año. Esta situación ha ido evolucionando a lo largo de la serie temporal estudiada, donde se ha ido cada año ampliando el aporte libre de emisiones de GEI, hasta llegar al 13,89% (2018). Esta subida porcentual es de escasa importancia, dada la importante subida en el requerimiento energético demandado por el país, que precisa un 447% más de energía, estando por tanto cubierto el sistema mediante el aporte del resto de energías, entre las que destaca desgraciadamente el carbón.

El sistema eléctrico indio generó después de las pérdidas por parte de cada tecnología un total de energía eléctrica de 136,13 Mtoe (2018), siendo consumida por sus sectores

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

económicos un total de 103,29 Mtoe, debido a las pérdidas en su sistema de distribución [8].

El objetivo de este trabajo es analizar la situación de India en el contexto de los países con mayores índices de emisión de GEI, de este modo en esta parte final del apartado se mostrarán las evoluciones en la implantación de las tecnologías libres de emisión, para de una manera conjunta revisar la situación de cada estado en el contexto de introducción de energías libres de GEI en su sistema de generación de energía eléctrica.

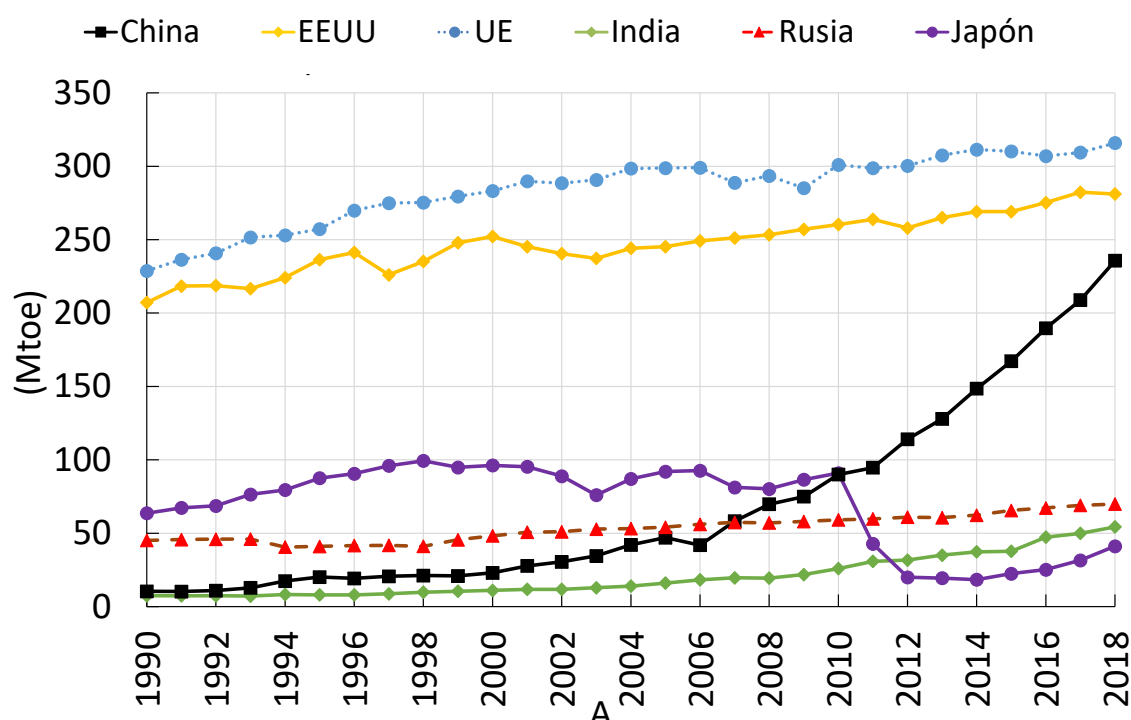


Figura 2.4.2: Evolución de la energía aportada por fuentes libres de emisiones en la generación eléctrica en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [8].

La *Figura 2.4.2* aporta la visión del volumen total de energías renovables en los sistemas generativos eléctricos de los países estudiados. En ella se puede apreciar la escasa aportación de estas fuentes renovables en los primeros años de la serie temporal en India y China, siendo el aporte energético libre de emisiones indio el menor de entre los países analizados.

Será preciso el análisis de la *Figura 2.4.3*, que aporta los mismos indicadores, pero de manera porcentual, esto es, la aportación libre de emisiones con respecto al consumo total eléctrico, para apreciar que en el contexto general el aporte porcentual indio del año 1990 era superior al chino, dado que el país disponía de una demanda eléctrica inferior. Será en

2. ENERGÍA

1994 cuando las primeras plantas nucleares chinas y una ampliación llevada en sus plantas hidroeléctricas, equilibren el porcentaje renovable entre India y China, aunque aún las dos potencias disponen de una implantación del 9,78 y 7,96% (1994) en India y China respectivamente, muy alejadas del resto de países que componen el estudio.

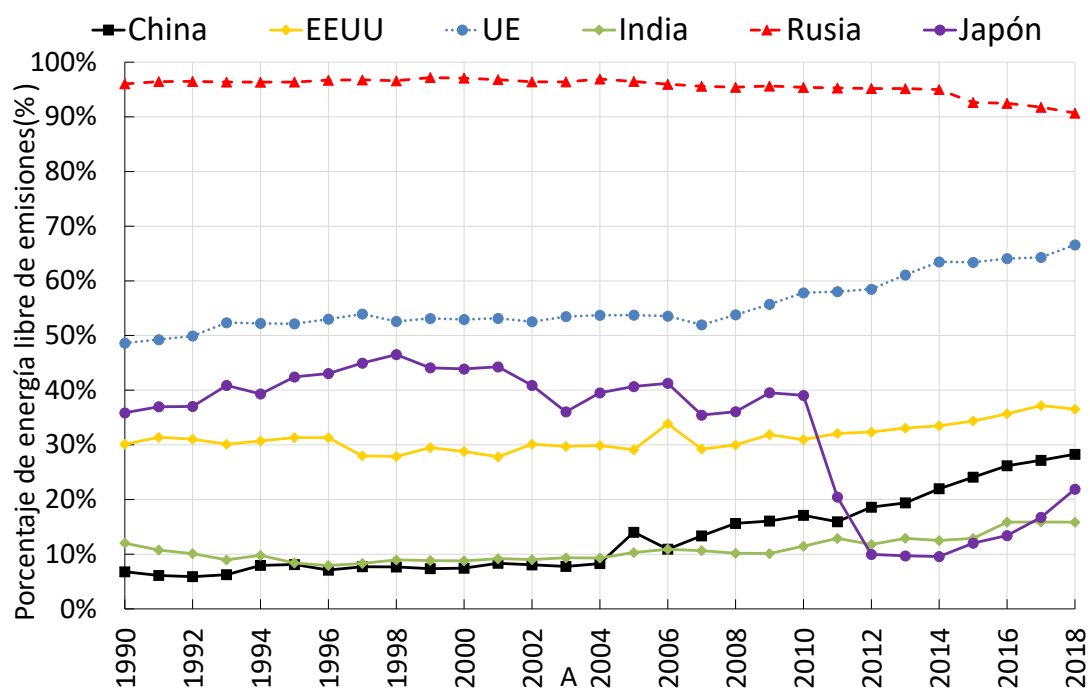


Figura 2.4.3: Evolución del porcentaje de fuentes libres de emisiones en la generación eléctrica en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [5].

Entre los años 1994 y 2004, el aporte energético libre de emisiones en China se hace notablemente superior al de India, sin embargo, a efectos de porcentajes siguen aproximadamente al mismo nivel, dado el crecimiento en la demanda de la economía china. En concreto, la situación porcentual se situaba en 9,30 y 8,28% (2004) en India y China, respectivamente.

A partir de 2006, ambos países muestran una importante evolución, sobre todo en el caso chino, que comienza una escalada en aporte de energía libre de emisiones que los lleva a conseguir, pese a su aumento en la demanda energética, cuotas de cobertura del 13,35% (2007), 15,64% (2008), 16,07% (2009), para continuar hasta alcanzar una demanda cubierta con fuentes no emisoras en su sistema de generación eléctrica del 28,28% (2018). Esta situación le hizo superar en aporte de renovables a países desarrollados como Japón o Rusia, acercándose de modo rápido a los niveles de Europa o EEUU [8].

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

En el mismo intervalo, India no ha podido continuar el ritmo de implantación registrado en China, marcando una tenue evolución en el porcentaje de renovables, debido sobre todo, a su creciente demanda eléctrica, situada en 103,24 Mtoe (2018), lo que sitúa al país con una demanda de energía eléctrica por habitante de 0,073 toe/hab. (2018), siendo esta la menor de las sociedades estudiadas, muy por debajo de China que presenta para este indicador una demanda por habitante de 0,37 toe/hab. (2018). Únicamente debido a la repentina pérdida de fuentes no emisoras de GEI en Japón, India ha alcanzado mayor nivel porcentual de aporte de estas energías entre los años 2012 a 2016, siendo remarcable el esfuerzo llevado a cabo por el Estado japonés, que para una generación total de energía eléctrica de 81,30 Mtoe (2018), lo que sitúa su generación por habitante en 0,64 toe/hab, ha podido cambiar esa dinámica e implantar masivamente tecnologías libres de emisiones, que les ha llevado a los mayores niveles de crecimiento de la curva porcentual de aporte en energía renovable de los países estudiados por este trabajo.

Del resto de estados destaca la cobertura en tecnologías libres de emisiones de Rusia, que genera su energía eléctrica prácticamente sin emisiones de GEI resultantes, dado el alto grado de cobertura de sus instalaciones nucleares e hidroeléctricas. Esta cobertura es alcanzada gracias a su excelente capacidad generativa en las citadas tecnologías y al escaso consumo eléctrico demandado 65,31 Mtoe (2018), comparado con el de la Unión Europea o el de EEUU, situados en 241,75 y 335,41 Mtoe (2018), respectivamente. Si se analiza este dato por habitantes para corregir el diferente tamaño poblacional de los estados analizados, se encuentra que la Federación poseía una producción eléctrica final anual por habitante igual a 0,45 toe/hab., muy inferior al mismo indicador en la Unión Europea que era de 0,54 toe/hab., o que al registrado para EEUU con una generación eléctrica anual por habitante de 1,03 toe/hab. Lo que sitúa a EEUU como el de mayor generación por habitante de los estudiados [8].

El aumento en la demanda en la Federación Rusa de los últimos años ha sido en parte cubierto mediante ciclos combinados que emplean como combustible gas natural, lo que ha limitado ligeramente su porcentaje en generación libre de emisiones.

En cuanto a Europa y EEUU, ambas economías poseían gran aporte de energías libres de emisiones, principalmente por su tradicional aportación hidroeléctrica y nuclear, viéndose esta reforzada con la implantación masiva de energía eólica y solar, principalmente a partir de 2007.

2.4.2 Integración de las energías libres de emisiones de GEI

En esta sección se analizará el conjunto completo de la energía consumida por cada uno de los estados estudiados. De esta manera se atenderá a la introducción de las tecnologías libres de emisiones estudiadas, esto es, eólica/solar, hidroeléctrica, atómica y biocombustibles, en los estados analizados por el presente trabajo, mostrando el conjunto de energía consumida, ya sea generación eléctrica, calor o cualquier consumo realizado de energía, aportando de esta manera una visión global más amplia de la implementación de energías libres de emisiones.

La *Figura 2.4.4* muestra la evolución del aporte libre de emisiones en los países objeto de estudio, en ella se destaca la fuerte aportación india al comienzo de la serie histórica, debida mayoritariamente al empleo masivo en zonas rurales de biomasa sólida para cocinar. Este aporte se ha visto reducido por el aumento de la demanda y por la implantación analizada en el apartado 2.2.5 Bioenergía en el que se detalla el cambio en los usos tradicionales en India.

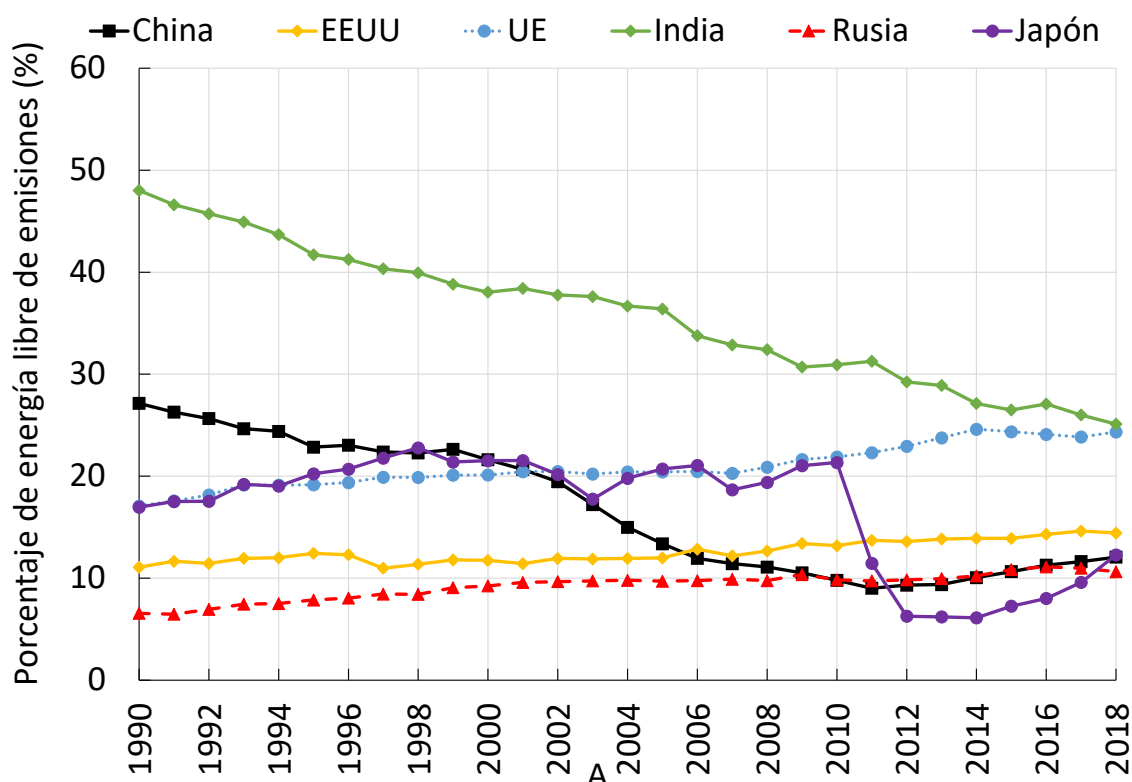


Figura 2.4.4: Evolución del porcentaje de fuentes libres de emisiones en los 6 países con mayor emisión de GEI. Fuente IEA (International Energy Agency) [5].

2.4.1 Integración en el sistema eléctrico de las energías libres de emisiones de GEI

El sistema de generación de energía indio ha perdido porcentualmente aporte renovable, descendiendo de una contribución porcentual en el conjunto de su economía del 48,02% (1990). Este porcentaje, analizado de manera sectorial, resultaría una cobertura renovable del 9,39% en el sector primario, 24,72% en el industrial y 68,50% en el sector servicios. Esta cobertura se ha visto reducida hasta un aporte porcentual del 25,11% (2018), con un reparto totalmente distinto, dado que aun siendo el sector servicios el de mayor demanda, el porcentaje entregado a este sector se ha visto mermado hasta el 36,44%, al igual que el industrial que reduce su consumo hasta el 15,49%. Únicamente el sector primario ha visto incrementado su demanda porcentual, situándose esta en el 13,51%. En este contexto, la pérdida de aporte porcentual en renovables de la economía india, ha llevado a este indicador a niveles de aporte similares a los de la Unión Europea, que ha registrado para el mismo periodo, un incremento en el presente indicador, situando su aportación en el conjunto de su economía en el 24,34% (2018) [8].

Para el caso de China, se registran pendientes descendentes de similar magnitud a las registradas para el caso de India en el intervalo 1990-2002. Esta tendencia en la reducción porcentual en el aporte de renovables se hace más acusada en el periodo 2002-2006, donde la pendiente alcanzó reducciones porcentuales anuales de hasta el 2,24% (2002-2003). La tendencia se fue reduciendo, hasta alcanzar un mínimo de aporte renovable del 9,02% (2011). Desde este momento, el consumo de elementos renovables encaminó subidas porcentuales, situando su aportación final en el 12,07% (2018) [8].

El aporte de energía libre de emisiones en la economía japonesa describe la misma tendencia que la analizada en el apartado anterior, dado el marcado consumo de electricidad en todos los sectores de esta sociedad. De esta manera, en los primeros años analizados, poseía un aporte porcentual similar al europeo. Esta contribución se vio sumamente mermada tras el accidente de Fukushima en 2011, para describir una importante recuperación que la devuelve a niveles similares a los de EEUU.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA	164
3.1 La identidad Kaya.....	166
3.2 Metodología LMDI	167
3.3 Análisis mediante la causalidad de Granger usando el test de Toda- Yamamoto	170
3.4 Modelo económico	172
3.5 Ecuaciones del modelo.....	174
3.6 Fuentes de datos y preprocesado	176
3.6.1 Datos de población y actividad económica.....	176
3.6.2 Datos de energía y combustibles	177
3.6.3 Preprocesado de los datos.....	179
3.7 Modelo de validación y verificación.....	180
3.8 Escenarios.....	181

*"Si no sabes cuál es tu puerto, ningún viento te
será favorable"*

Séneca

3. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se analizarán las técnicas a emplear para acometer el análisis de los datos, exponiendo las particulares condiciones que las llevan a ser escogidas entre las técnicas presentes en la bibliografía científica. De este modo, se presentarán cada una de las técnicas empleadas, analizando las ventajas que aportan dichas técnicas para el análisis de nuestro particular estudio.

Otra parte importante ha sido la idoneidad de la serie temporal elegida, dado que la tarea comparativa llevada a cabo por esta tesis hace indispensable una serie temporal homogénea entre países, que confronte en el mismo periodo cada una de los estados analizados. Por otra parte, la serie temporal se ve influenciada por el hecho del retraso a la hora de la publicación de datos contrastados de algunas variables, siendo el caso más desfavorable el del consumo de energía por tipo de combustible, puesto que estos datos suelen presentar un retardo de 3 años hasta su publicación. Otro punto importante al elegir la serie temporal, es la inclusión de los años fijados como referencia para el cumplimiento de las distintas NDC de los países objeto de estudio.

Atendiendo a lo expuesto, y dada la carencia, anterior a 1990, de los datos de alguno de los países estudiados, esta tesis se centró en la etapa que va desde 1990 al último año con datos disponibles, 2018. De esta manera, se puede apreciar la evolución de las sociedades a lo largo de 28 años, margen suficiente para estudiar de manera detallada la evolución india con respecto a las citadas sociedades y atender a la totalidad de los criterios seleccionados para el cumplimiento de las respectivas NDC que, para el caso más precoz, el de la UE, se estableció tomando a 1990 como año de referencia.

La *Figura 3.1* muestra el conjunto de procesos realizados, pudiéndose apreciar las distintas metodologías que se llevarán a cabo para alcanzar los resultados de esta tesis. En el margen izquierdo de la figura, se encuentra cada uno de los datos empleados para la realización del modelado, así como las primeras tareas de filtrado y test previos a realizar. En el margen inferior se sitúa el cálculo de escenarios que, una vez desarrollados, aportarán la información necesaria para el modelado de las diferentes magnitudes estudiadas, como la emisión resultante, LMDI o el PIB.

3. METODOLOGÍA

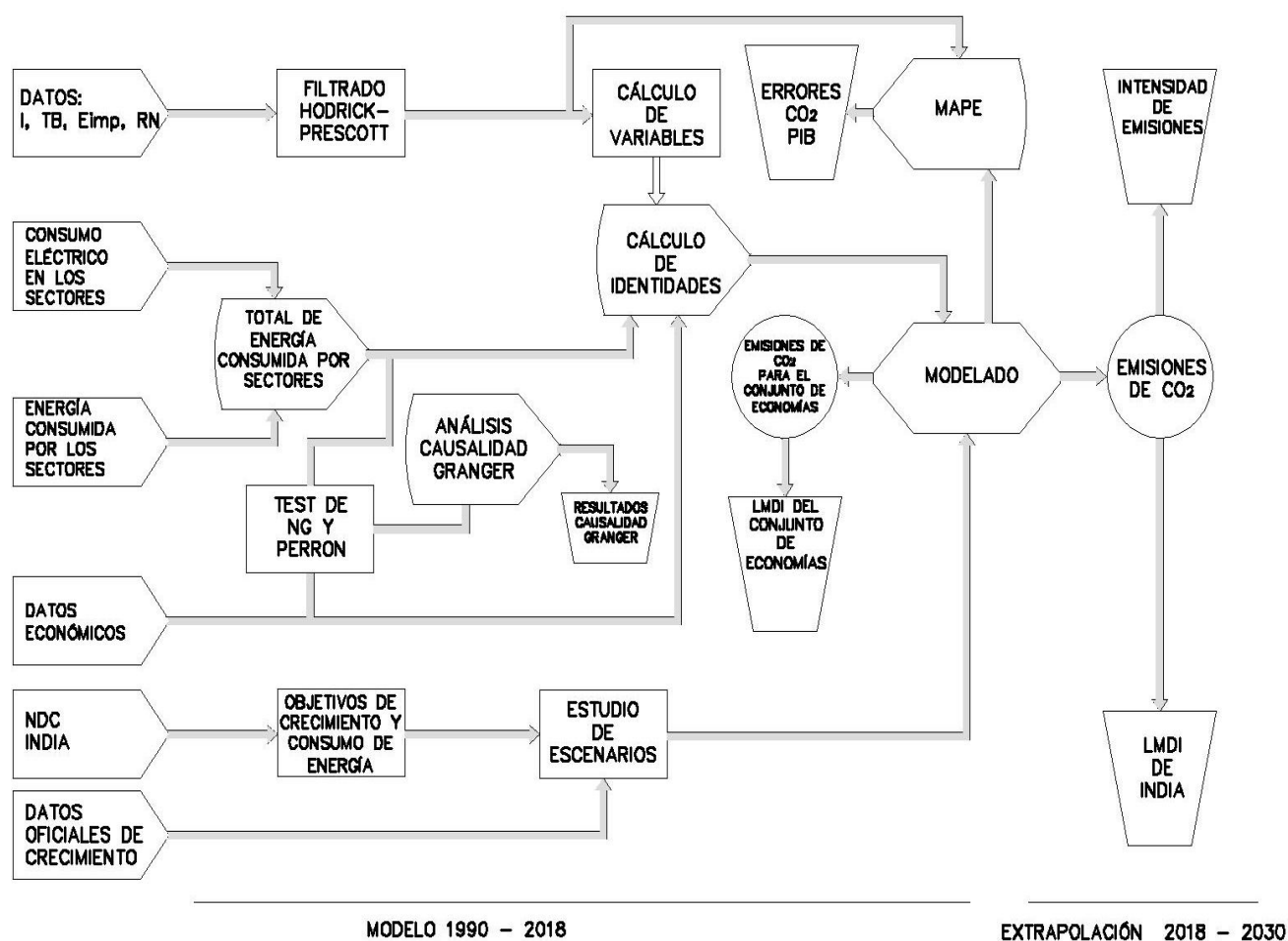


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso realizado para la obtención de resultados.

El estudio se realizará 6 veces, ejecutando el modelo sobre variables conocidas, en el periodo 1990-2018, para India y el conjunto de países empleados para realizar la comparación, mientras que la extrapolación de datos, que aportará la información del comportamiento de las variables a futuro, solo se realizará para el caso central de esta tesis, India. Los datos conocidos dentro del periodo estudiado, pueden emplearse para realizar un test que permita la cuantificación de la robustez y confianza. Así, se ha realizado un análisis mediante el estimador Media Absoluta de Porcentaje de Error (MAPE). Los datos a extrapolar serán los referentes a los resultados de la aplicación del modelo LMDI, más el PIB y la emisión de CO₂ resultante. Esta última se mostrará de manera directa y mediante el indicador intensidad de emisiones, dada la relevancia del citado indicador en lo referente al cumplimiento de la presente NDC de India.

3.1 La identidad Kaya

Para el análisis y comparación de los elementos que generan las emisiones de CO₂ en la India y el resto de estados analizados por este trabajo, se empleará la identidad del eminente economista japonés Kaya, [20] [93]. La identidad Kaya se ha utilizado ampliamente en el ámbito de los inventarios de CO₂, así como en el análisis de múltiples escenarios. Desde su primera propuesta, se ha refinado y redactado de manera desagregada para dar respuesta al considerar diferentes sociedades, provistas de diferentes sectores económicos y de tipos de combustibles que las proveen de energía. Se pueden encontrar ejemplos de la identidad Kaya escrita en forma desagregada, en los trabajos realizados por Robalino et al. [31], [21], [32], o en el trabajo con gran impacto realizado por Dalia Streimikiene et al. [94]. La identidad de Kaya en forma desagregada se da en la ecuación (1), donde para este trabajo se ha añadido el efecto del crecimiento de la población, ya que se ha comprobado que en el caso de la India no puede omitirse, dada la especial relevancia que este indicador ejerce en la economía y las emisiones resultantes del país. La ecuación (1) presenta las emisiones resultantes de CO₂ de un período determinado, permitiendo analizar los cambios en las emisiones generadas mediante el estudio de cinco factores: el efecto derivado del cambio en la población (P), el derivado de la actividad económica (Qpc), que en el presente trabajo se muestra por habitante, la estructura por sectores existentes (Si), que muestra cómo afecta el cambio en el aporte económico al PIB entre los sectores económicos del estado analizado, la intensidad energética de cada sector productivo (Eli), que refleja la energía necesaria para generar una cantidad dada de PIB por sector, el mix energético por sectores productivos (Mij), que refleja qué combustibles proveen la energía necesaria por sectores, y el factor de emisión (Uij), que nos aporta la cantidad de emisión por combustible empleado en los distintos sectores.

$$C = \sum_i^j C_{ij} = P \frac{Q}{P} \sum_i^j \frac{Q_i}{Q} \frac{E_i}{Q_i} \frac{E_{ij}}{E_i} \frac{C_{ij}}{E_{ij}} = P * Qpc * \sum_i^j S_i * EI_i * M_{ij} * U_{ij} \quad (1)$$

En la citada expresión, C define la emisión total de CO₂ en un periodo determinado, i recorre los diferentes sectores productivos y j las fuentes primarias de energía, P es la población total del territorio de estudio, Q es el PIB del periodo de estudio a precios constantes referidos a 2010, Q_i es el PIB correspondiente al sector i, E_i es la energía total consumida en el sector i, E_{ij} es la energía consumida de tipo j en el sector productivo i.

3.2 Metodología LMDI

En la ecuación (1) se pueden identificar fácilmente seis términos, sin embargo, debido a la forma matemática de la ecuación, no es trivial aislar las diferentes contribuciones. Con este fin, Ang y Choi en su trabajo pionero [36], propusieron el método de descomposición LMDI, que permite identificar y extraer las contribuciones de los diferentes factores dentro de una expresión dada. Esta metodología es ampliamente empleada, destacando el trabajo de Ang [95], que aporta una guía que permite la elección del mejor modelo de LMDI en función del trabajo a realizar. Usando el método LMDI, las contribuciones resultantes en las emisiones para un período dado, T, con referencia a un tiempo inicial, 0, pueden evaluarse de forma aditiva o multiplicativa. En el caso del método de descomposición aditiva, la variación de las emisiones para un período dado se escribe como:

$$\Delta C_{tot} = C^T - C^0 = \Delta C_{act} + \Delta C_{str} + \Delta C_{int} + \Delta C_{mix} + \Delta C_{pob} \quad (2)$$

Donde la suma de cada uno de los factores aportados por el método, equivale a la diferencia total de emisiones en el intervalo estudiado. Esta metodología aporta de una manera sencilla la contribución de cada uno de los factores, que vendrán expresados en forma de emisión resultante originada por el factor estudiado, en caso de resultar positivo, o la de compensar por su efecto una emisión, caso de resultar menor que cero.

Por el contrario, el método multiplicativo aportará la relación entre las emisiones finales e iniciales, al multiplicar cada uno de los factores aportados por el método. Este modo de estudiar la emisión resultante, contribuirá igualmente con la aportación relativa de cada factor a la emisión resultante, pudiendo ser los factores mayores que la unidad, lo que representará un aumento de la emisión debida al factor estudiado, o menor que uno, lo que significará una reducción en la emisión debida al factor. La ecuación (3), define la metodología LMDI multiplicativa:

$$D_{tot} = C^T / C^0 = D_{act} \times D_{str} \times D_{int} \times D_{mix} \times D_{pob} \quad (3)$$

Cada uno de los factores a emplear por el método aditivo se extraen de la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \Delta C_{act} &= \sum_{ij} \frac{c_{ij}^T - c_{ij}^0}{\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0} \ln \left(\frac{Q_{pc}^T}{Q_{pc}^0} \right) \\
 \Delta C_{str} &= \sum_{ij} \frac{c_{ij}^T - c_{ij}^0}{\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0} \ln \left(\frac{S_i^T}{S_i^0} \right) \\
 \Delta C_{int} &= \sum_{ij} \frac{c_{ij}^T - c_{ij}^0}{\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0} \ln \left(\frac{I_i^T}{I_i^0} \right) \\
 \Delta C_{mix} &= \sum_{ij} \frac{c_{ij}^T - c_{ij}^0}{\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0} \ln \left(\frac{M_{ij}^T}{M_{ij}^0} \right) \\
 \Delta C_{Pob} &= \sum_{ij} \frac{c_{ij}^T - c_{ij}^0}{\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0} \ln \left(\frac{pob^T}{pob^0} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Mientras que para la obtención de los factores del método LMDI multiplicativo se emplearán las siguientes funciones:

$$\begin{aligned}
 D_{act} &= \exp \left(\sum_{ij} \frac{(c_{ij}^T - c_{ij}^0) / (\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0)}{(C^T - C^0) / (\ln C^T - \ln C^0)} \ln \left(\frac{Q_{pc}^T}{Q_{pc}^0} \right) \right) \\
 D_{str} &= \exp \left(\sum_{ij} \frac{(c_{ij}^T - c_{ij}^0) / (\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0)}{(C^T - C^0) / (\ln C^T - \ln C^0)} \ln \left(\frac{S_i^T}{S_i^0} \right) \right) \\
 D_{int} &= \exp \left(\sum_{ij} \frac{(c_{ij}^T - c_{ij}^0) / (\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0)}{(C^T - C^0) / (\ln C^T - \ln C^0)} \ln \left(\frac{I_i^T}{I_i^0} \right) \right) \\
 D_{mix} &= \exp \left(\sum_{ij} \frac{(c_{ij}^T - c_{ij}^0) / (\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0)}{(C^T - C^0) / (\ln C^T - \ln C^0)} \ln \left(\frac{M_{ij}^T}{M_{ij}^0} \right) \right) \\
 D_{Pob} &= \exp \left(\sum_{ij} \frac{(c_{ij}^T - c_{ij}^0) / (\ln c_{ij}^T - \ln c_{ij}^0)}{(C^T - C^0) / (\ln C^T - \ln C^0)} \ln \left(\frac{pob^T}{pob^0} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

3. MEDOTOLÓGÍA

Este método presenta un problema para aquellos valores que hagan cero el denominador, dado que se supone que la expresión $(A-B) / (\ln A - \ln B)$, no tiene solución para $A=B$, $A=0$ o $B=0$. Por este motivo se ha aplicado la corrección genérica aportada por Ang [95], que para cada uno de los casos corrige el valor por una referencia de valor aproximado a 0.

Es muy interesante para el estudio realizado la aplicación de las propiedades del método, que permiten cuantificar la importancia de cada sector productivo estudiado con respecto al total. De esta manera, podemos descomponer cada uno de los factores adictivos, como suma de los factores generados por cada sector productivo, empleando para ello la descomposición siguiente:

$$\begin{aligned}\Delta C_{act}(t) &= (\Delta C_{act}(t))_{\text{Primario}} + (\Delta C_{act}(t))_{\text{Industrial}} + (\Delta C_{act}(t))_{\text{Servicios}} \\ \Delta C_{str}(t) &= (\Delta C_{str}(t))_{\text{Primario}} + (\Delta C_{str}(t))_{\text{Industrial}} + (\Delta C_{str}(t))_{\text{Servicios}} \\ \Delta C_{int}(t) &= (\Delta C_{int}(t))_{\text{Primario}} + (\Delta C_{int}(t))_{\text{Industrial}} + (\Delta C_{int}(t))_{\text{Servicios}} \\ \Delta C_{mix}(t) &= (\Delta C_{mix}(t))_{\text{Primario}} + (\Delta C_{mix}(t))_{\text{Industrial}} + (\Delta C_{mix}(t))_{\text{Servicios}} \\ \Delta C_{emf}(t) &= (\Delta C_{emf}(t))_{\text{Primario}} + (\Delta C_{emf}(t))_{\text{Industrial}} + (\Delta C_{emf}(t))_{\text{Servicios}} \\ \Delta C_{pob}(t) &= (\Delta C_{pob}(t))_{\text{Primario}} + (\Delta C_{pob}(t))_{\text{Industrial}} + (\Delta C_{pob}(t))_{\text{Servicios}}\end{aligned}\tag{6}$$

Igualmente, para la descomposición multiplicativa se puede conocer la importancia de cada uno de los sectores productivos con respecto al total, dado que se cumple la siguiente propiedad:

$$\begin{aligned}D_{act}(t) &= (D_{act}(t))_{\text{Primario}} \times (D_{act}(t))_{\text{Industrial}} \times (D_{act}(t))_{\text{Servicios}} \\ D_{str}(t) &= (D_{str}(t))_{\text{Primario}} \times (D_{str}(t))_{\text{Industrial}} \times (D_{str}(t))_{\text{Servicios}} \\ D_{int}(t) &= (D_{int}(t))_{\text{Primario}} \times (D_{int}(t))_{\text{Industrial}} \times (D_{int}(t))_{\text{Servicios}} \\ D_{mix}(t) &= (D_{mix}(t))_{\text{primario}} \times (D_{mix}(t))_{\text{Industrial}} \times (D_{mix}(t))_{\text{Servicios}} \\ D_{emf}(t) &= (D_{emf}(t))_{\text{Primario}} \times (D_{emf}(t))_{\text{Industrial}} \times (D_{emf}(t))_{\text{Servicios}} \\ D_{pob}(t) &= (D_{pob}(t))_{\text{Primario}} \times (D_{pob}(t))_{\text{Industrial}} \times (D_{pob}(t))_{\text{Servicios}}\end{aligned}\tag{7}$$

3.3 Análisis mediante la causalidad de Granger usando el test de Toda-Yamamoto

Este análisis permite encontrar las relaciones existentes entre los diferentes factores objeto de estudio, y entre estos y las emisiones de CO₂ resultantes. El método debe estudiarse cuidadosamente para desentrañar las posibles relaciones y cómo estas pueden cambiar en función del país estudiado. Con este fin, se aplicará el estudio de causalidad de Granger [96] para todas las variables involucradas en la identidad de Kaya. El método es ampliamente empleado en la literatura, resultando uno de los más comunes para probar los efectos de causalidad entre diferentes variables. El análisis de causalidad está basado en la estimación de modelos vectoriales autorregresivos (VAR). El método de Toda y Yamamoto [97], intenta medir la causalidad resolviendo problemas derivados de las relaciones de cointegración y series no estacionarias. Profundizando en la relación sugerida, se realiza el enfoque de causalidad de Toda-Yamamoto como una forma ampliada de Granger, que prueba de manera eficiente la causalidad en modelos VAR, proporcionando resultados más robustos que mediante el empleo de otros modelos VAR de tipo estándar, que puede proporcionar resultados sesgados con una muestra la bibliografía en [98], [99], [100], [101], [102]. La principal ventaja de esta prueba es la posibilidad de ser aplicada de manera independiente si las series están cointegradas, no siendo el orden de integración crucial, para el caso de existir cointegración. En este trabajo se considera un modelo de dos variables que incluye las variables CO₂, consumo de energías renovables, PIB, población e intensidad energética. Se debe tener en cuenta que las variables anteriores no corresponden exactamente a las contribuciones de LMDI, mostrado en las Ecuaciones (2) y (3), sino que corresponden directamente a los datos tomados de las fuentes especificadas en la presente sección.

Así, para el caso de las emisiones de CO₂ y el PIB, el análisis de causalidad de Granger puede ser realizado de la manera:

$$CO_{2t} = \alpha_1 + \sum_{i=1}^{l+dmax} \beta_{1i} CO_{2t-i} + \sum_{j=1}^{l+dmax} \gamma_{1j} PIB_{t-j} + \varepsilon_{1t} \quad (8)$$

$$PIB_t = \alpha_2 + \sum_{i=1}^{l+dmax} \beta_{2i} PIB_{t-i} + \sum_{j=1}^{l+dmax} \gamma_{2j} CO_{2t-j} + \varepsilon_{2t} \quad (9)$$

donde l es el retraso óptimo para el modelo VAR según el criterio de información de Akaike (AIC); $dmax$, corresponde a la variable de máximo retraso que corresponde al máximo orden de integración de las variables consideradas en el modelo; y los términos de error ε_{1t}

3. MEDOTOLÓGÍA

y ε_{2t} siguen una distribución gaussiana y se consideran el procesado como “ruido blanco”. Por lo tanto, esta prueba estima un modelo VAR (l+dmax), empleando una prueba de Wald Modificada (MWALD), que se distribuye estadísticamente asintóticamente como un χ^2 con p grados de libertad.

Probar la causalidad de Granger entre las dos variables seleccionadas, atendiendo a la ecuación (8), si $\sum_{j=1}^l \gamma_{1j} \neq 0$, sugiere que el PIB presenta causalidad de Granger con respecto al CO₂.

Del mismo modo, en ecuación (9), si $\sum_{j=1}^l \gamma_{2j} \neq 0$, sugiere que el CO₂ presenta causalidad de Granger con respecto el PIB. Posteriormente, si ambas hipótesis son rechazadas, esto implica que puede existir una causalidad bidireccional en la relación examinada.

3.4 Modelo económico

Para el modelado económico se ha empleado la función desarrollada por Chien y Hu [33]. Mediante el empleo de esta función, se puede calcular el valor del PIB de un estado dentro de unos escenarios previamente fijados. Para realizar esta tesis es de capital importancia la posibilidad de empleo de esta función, dado que permite incluir el aporte de las renovables en el cálculo del PIB a futuro, esta particularidad la hace ideal en los escenarios a plantear para India, donde se fija en su NDC un importante compromiso para aumentar la instalación de este sector energético. El PIB se define como:

$$\text{PIB} = \text{Ca} + \text{I} + \text{G} + \text{TB} \quad (10)$$

Donde Ca es el gasto en consumo final en los hogares, I es la inversión bruta de capital, G es el gasto final por parte del gobierno y TB es el balance comercial del país, esto es, exportaciones menos importaciones. Siguiendo el método de cálculo fijado por Chien y Hu, (donde la variable G se elimina de la función para evitar colinealidad en los cálculos). El sistema económico para el cálculo del PIB queda compuesto por las siguientes funciones:

$$Q = a_1 * I + a_2 * \text{TB} + a_3 * \text{Ca} + a_4 * \text{Eimp} + a_5 * \text{RN} + \epsilon_1 \quad (11)$$

$$I = b_1 * \text{RN} + b_2 * \text{Ca} + \epsilon_2 \quad (12)$$

$$\text{TB} = c_1 * \text{Eimp} + c_2 * \text{RN} + \epsilon_3 \quad (13)$$

$$\text{Eimp} = d_1 * \text{RN} + \epsilon_4 \quad (14)$$

$$\text{Ca} = f_1 * \text{Eimp} + f_2 * \text{TB} + \epsilon_5 \quad (15)$$

Donde los coeficientes ϵ_1 a ϵ_5 son los errores residuales cometidos al modelar el sistema, Eimp es la energía importada por el estado a lo largo del año analizado y RN es la energía renovable consumida en el mismo año. Los coeficientes a_i , b_i , c_i y f_i se calculan empleando el método de los mínimos cuadrados, utilizando para ello toda la amplia base de datos

3. MEDOTOLOGÍA

aportados por las fuentes. La irregularidad apreciada en alguno de los parámetros a emplear ha precisado de un suavizado previo de las variables, esta labor de suavizado ha sido realizada mediante el empleo de un filtro del tipo Hodrick-Prescott (HP).

3.5 Ecuaciones del modelo

Como se ha podido ver en los apartados anteriores, en esta tesis se presentan unas ecuaciones que modelan dos procesos distintos, por un lado, se han presentado ecuaciones con las que se pretende modelar el comportamiento económico del sistema y, por otro lado, el comportamiento de la demanda energética por cada sector productivo y fuente de energía que la produce, pudiendo modelar la emisión contaminante esperada. Es preciso indicar que el término correspondiente a la energía renovable pertenece tanto a las ecuaciones del modelo económico, como, a través de los combustibles nuclear, eólica/solar, biocombustible e hidroeléctrica, al modelo de energía. Esta circunstancia es muy importante para el trabajo realizado, ya que permite el modelado a futuro de un sistema que dependerá en gran medida, no solo de la esperada bajada de emisiones de CO₂ que origine la mayor participación progresiva en el mix de las renovables, sino también de los aspectos económicos para el PIB que tiene la implantación de este tipo de energía.

Las ecuaciones siguientes modelarán el sistema a futuro, en ellas se detallan cada una de las variables que permitirán la extrapolación de los resultados, empleando los coeficientes obtenidos como resultado del mejor ajuste mediante mínimos cuadrados de los datos históricos recopilados entre los años 1990 y 2018.

$$Q(t) = a_1 * I(t) + a_2 * TB(t) + a_3 * C_a(t) + a_4 * E_{imp}(t) + a_5 * RN(t-1) \quad (16)$$

$$E_j = \sum_{ij} S_i(t) * E_{li}(t) * M_{ij}(t) * U_{ij}(t) * Q(t) \quad (17)$$

$$(18)$$

$$RN(t) = \sum_{ij} E_{ij}(t) \quad \text{para } j=4,5,6,7$$

$$y_t = y_{t-1} (1 + r) \quad (19)$$

Para realizar la extrapolación de los datos, se calculará la pendiente seguida por ellos durante los 6 años previos, obteniéndose el valor de r . Las variables $I(t)$, $TB(t)$, $C_a(t)$, $E_{imp}(t)$, $S_i(t)$, $E_{li}(t)$, $M_{ij}(t)$, seguirán la ecuación de la regla del interés compuesto (19), empleando cada uno de ellos su propio valor de r .

El dato obtenido de PIB en la ecuación de tasa de cambio (16) se ingresará como entrada en la función (17), de esta manera se puede obtener la contribución de energía por fuentes necesaria para alcanzar ese PIB. De entre todos los valores de combustibles obtenidos se diferenciará el valor de las renovables, que se incluirá para la generación del PIB del año

3. MEDOTOLOGÍA

siguiente, de esta forma, se empleará el dato de energía renovable del año anterior, para calcular el PIB de un año dado (nótese el término $RN(t-1)$ en (16)).

Para este modelado, el valor de $T=0$ corresponderá al último año del que se dispone de datos oficiales y el año $T=12$ corresponderá con el último año a extrapolar, 2030, coincidente con el que se han fijado como objetivo India para fijar su NDC.

3.6 Fuentes de datos y preprocesado

3.6.1 Datos de población y actividad económica

Los datos empleados para la realización del presente trabajo han sido extraídos de diferentes fuentes oficiales, destacando en el apartado de población y actividad económica los aportados por el Banco Mundial [5]. Este ente multinacional, que comprende a 189 estados miembros, tiene su sede en la ciudad de Washington D. C Estados Unidos. El Banco Mundial fue creado en 1944, cuando todavía en el mundo se libraba la Segunda Guerra Mundial, con objeto de paliar las dificultades para la reconstrucción de algunos estados. Entre los objetivos del Banco Mundial, destaca desde su origen el de contribuir a erradicar la pobreza, valiéndose para ello de préstamos a bajo interés.

El Banco Mundial posee una abundante base de datos para India y el grupo de países seleccionados por este trabajo. Así, las citadas fuentes de datos se encuentran agrupadas en diversas familias de indicadores entre las que destacan las de Cambio climático, Desarrollo Urbano y Economía y crecimiento. De la base de datos de Cambio climático, se han podido obtener los datos completos de emisiones de CO₂ en las distintas sociedades estudiadas, sirviendo esta reseña únicamente como contraste con respecto a la calculada por el presente trabajo. Desarrollo Urbano, donde se han podido recopilar las distintas estadísticas de población, posibilitando acceder a la población desagregada por grupos urbanos o rurales, así como, dentro de los citados grupos a indicadores tales como población en edad laboral ocupada por sexos, lo que ha permitido un conocimiento más profundo de cada una de las sociedades. De la base de datos de Economía y Crecimiento, se han podido recopilar los datos económicos por sectores, lo que ha permitido analizar el comportamiento sectorial de cada uno de los estados analizados, así como comprobar su nivel de riqueza a lo largo de la serie temporal estudiada.

Además de la base de datos presente en el Banco Mundial, incluida en la familia Pobreza, se han empleado como base de datos los aportados por el Gobierno Indio en diversas publicaciones entre las que destaca su NDC, sobre todo, aquellos que aportan información relativa al modo de vida y necesidades dentro del estado indio.

Un aspecto a destacar relativo a los datos económicos, ha sido la necesidad de emplear una referencia monetaria homogénea, permitiendo estudiar en el mismo contexto económico cada una de las sociedades analizadas. Esta variable, no debe presentar alteraciones a lo largo de la serie histórica desarrollada, permitiendo estudiar los datos de una manera estable a lo largo del tiempo. Así pues, y como se realiza en numerosos ejemplos a lo largo de la extensa bibliografía citada por este trabajo, se ha optado por el empleo de dólares a precios constantes referidos a 2010, unidad presente para todas las sociedades objeto de estudio, y única empleada a la hora de referenciar el PIB económica a lo largo de la presente tesis.

3. MEDOTOLÓGÍA

3.6.2 Datos de energía y combustibles

En lo referente a energía final empleada por sectores y los diversos combustibles que han posibilitado su abastecimiento mediante de la energía primaria, se ha empleado diversas bases de datos oficiales, entre las que destaca la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [8]. En ella se posibilita la consulta del consumo por sectores de los diferentes grupos de combustibles. Entre los grupos se destacan los apartados, Balances, Carbón, Electricidad, Gas natural, Petróleo y Renovables.

En la base de datos Balances, se encuentra un resumen de la producción, importación o exportación de energía, así como las diferentes cantidades de elementos combustibles reservados de manera estratégica. Así mismo facilita información de la energía suplida mediante el empleo de carbón, derivados del petróleo, gas natural, energía nuclear, hidroeléctrica, solar y eólica, biocombustibles y electricidad, en los distintos sectores económicos. Las bases de datos de Carbón, Electricidad, Gas natural, Petróleo y Renovables, aportan la desagregación que ha hecho posible la diferenciación entre los diversos tipos de carbón empleados por este trabajo, así como dividir los derivados del petróleo o atender a los combustibles que han aportado la energía primaria para la obtención de la electricidad, consumida como energía secundaria en cada uno de los sectores estudiados.

En la base de datos de la IEA [8], se ha podido diferenciar el consumo de combustibles de los países objeto de estudio, así como el destino de estos combustibles dentro de cada uno de sus sectores. De esta forma, se ha podido diferenciar los combustibles utilizados tradicionalmente en el sector del transporte, de los que sirven como energía primaria para la obtención de electricidad, y todos estos con los utilizados por el resto de sectores económicos. Desde la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [66], se han podido obtener los diferentes factores de emisión de los combustibles empleados.

Para obtener una mejor resolución se han diferenciado los diferentes tipos de carbón y petróleo utilizados, desagregando su aportación en cada uno de los derivados más utilizados, aportando valor adicional a este estudio, que de esta manera se aleja de la forma tradicional que analiza al conjunto de tipos de carbón mediante un valor medio. Así pues, este trabajo aborda la diferencia entre las emisiones de cada derivado, así como el uso diferenciado que cada país hace de estos. Del mismo modo, se tienen en cuenta las diferencias de consumo entre derivados a lo largo de la serie temporal, influenciadas por la disponibilidad de productos y las variaciones del mercado.

De esta forma, el consumo de carbón se ha diferenciado en 7 derivados, utilizando carbón para referirse al factor medio utilizado para designar el consumo restante. Asimismo, el término petróleo se ha diferenciado en otros 7 derivados, atendiendo de esta manera al consumo de combustibles muy presente en el sector transporte, como la gasolina o el

gasoil, pero también a la nafta o al *Jet queroseno*, completando de este modo el estudio por separado de los derivados del petróleo, por lo que se realiza un estudio más detallado que en algunos de los trabajos citados en la bibliografía que emplean un valor de emisión genérico [66] .

De este modo, en el presente trabajo se han considerado un total de 21 fuentes de energía, que se enumeran en la *Tabla 3.1* con el correspondiente índice de emisión extraído de la guía que publica anualmente la EPA [66].

Tabla 3.1: Combustibles analizados y factores de emisión. Fuente EPA (Agencia de Protección Ambiental de EEUU.) [66].

Combustibles	Factor de emisión (kgCO ₂ /koe)
Carbón*	4,511
Antracita	4,116
Carbón de coque	3,742
Bituminoso	3,702
Lignito	3,989
Gas de coque	1,860
Gas de alto horno	10,888
Petróleo*	2,978
Gasoil	2,973
Gasolina	2,789
Nafta	2,871
Keroseno	2,984
Jet keroseno	2,866
GLP	2,449
Gas Natural	2,106
Biocombustible (gaseoso)	2,066
Biocombustible (solido)	0
Biocombustible (liquido)	2,930
Eólica y Solar	0
Nuclear	0
Hidroeléctrica	0

3.6.3 Preprocesado de los datos

Dada la fluctuación e irregularidad mostrada por alguno de los datos empleados, ha sido necesaria una etapa de preprocesado previa al trabajo de las metodologías anteriormente descritas. Para este trabajo de suavizado se ha empleado el filtrado de Hodrick-Prescott, que extrae la tendencia de una serie.

El filtro Hodrick-Pescott (HP) es un método para extraer la componente de tendencia de una serie de tiempo. Esta metodología fué propuesta por Robert J. Hodrick y Edward C. Prescott en 1980 [103]. El método, descompone la serie en la componente tendencial y la componente cíclica.

El ajuste de la sensibilidad de la tendencia se obtiene operando sobre el multiplicador λ . El método es ampliamente empleado en la investigación de ciclos económicos, permitiendo reducir los errores al calcular tendencias en series temporales, ya que alcanza resultados más consistentes con los datos que mediante la aplicación de otros métodos. Según los autores, el filtro HP tiene su origen en el método de Whittaker-Henderson Tipo A, empleado por primera vez para suavizar tablas, pero también ha sido útil en estudios de astronomía y balística. Kydland y Prescott (1990), justifican el uso de este filtro por su linealidad, quedando bien definido sin elementos subjetivos, independiente de la serie a la que se aplica.

La técnica puede escribirse de la manera:

$$\min \sum_{t=1}^T (Y_t - \tau_t)^2 + \lambda \sum_{t=2}^{T-1} [(\tau_{t+1} - \tau_t) - (\tau_t - \tau_{t-1})]^2 \quad (20)$$

El primer término de la Ecuación (20), es la suma de las desviaciones al cuadrado $d_t = y_t - \tau_t$ lo que atiende al componente cíclico. El segundo término, que es múltiplo de λ corresponde a la suma de los cuadrados de las diferencias del componente de tendencia. Este segundo término atiende a las variaciones en la tasa de crecimiento del componente tendencial. Cuanto mayor sea el valor de λ , mayor será la penalización. Hodrick y Prescott sugieren como valor de λ para series mensuales el de $\lambda = 14400$ y para series anuales se recomienda un valor de $\lambda = 100$. Siendo este último el valor empleado para el filtrado de los componentes de esta tesis, dado la frecuencia anual de los datos empleados.

3.7 Modelo de validación y verificación

Los datos obtenidos por el modelado del PIB, mediante la aplicación de la ecuación (16) y la emisión final de CO₂ de la aplicación de la ecuación (1), puede ser comparado con los datos disponibles a lo largo de la serie histórica, para de esta manera, previa comparación con los datos proporcionados, estimar la robustez y confianza del modelo empleado. Para este análisis particular, se empleará el estimador Media Absoluta de Porcentaje de Error (MAPE), la cual está definida:

$$\text{MAPE (\%)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\text{Data}_i - \text{Modelo}_i}{\text{Data}_i} \right| * 100 \quad (21)$$

Donde Data_i se refiere a los datos reales proporcionados por fuentes oficiales, que mediante la aplicación de la ecuación (21), se compararán con los obtenidos como resultado del modelado aplicado (Modelo_i). El operador realiza un sumatorio de los porcentajes de error cometidos, tomando el error en su valor absoluto, descartándose de esta manera posibles interferencias ocasionadas por resultados de error negativos. El indicador nos devuelve la media del error cometido, puesto que divide por N, que representa el tamaño de la muestra, en nuestro caso los 28 años de los que se dispone de datos. Los autores Hyndman R, Koehler A, [104], recomiendan el empleo del método MAPE para verificar la robustez de los resultados obtenidos por un modelo.

3.8 Escenarios

Para modelar los datos a futuro se han marcado distintos escenarios, que pretenden recrear las condiciones económicas y energéticas en las que se encontrará India en los próximos 12 años. Las emisiones contaminantes de un país dependen de numerosas variables, entre las que cabe destacar el PIB, la estructura sectorial de su economía, la intensidad energética, y la combinación en el mix energético de las distintas fuentes de energía.

Todos los modelos a futuro señalan una continuada subida para la población y producto interior bruto en India, es por esto que los escenarios empleados están marcados por esta tendencia al alza de la economía. En su propia NDC India establece un compromiso en el empleo de fuentes de energía alternativas, pero también aventura unos datos de crecimiento de demanda energética y crecimiento de su PIB. Esta nueva política del gobierno indio, pretende mejorar el país mediante un proceso de industrialización, de mejora de la productividad en los sectores económicos y de dotar a la totalidad de sus ciudadanos de unas condiciones de vida dignas.

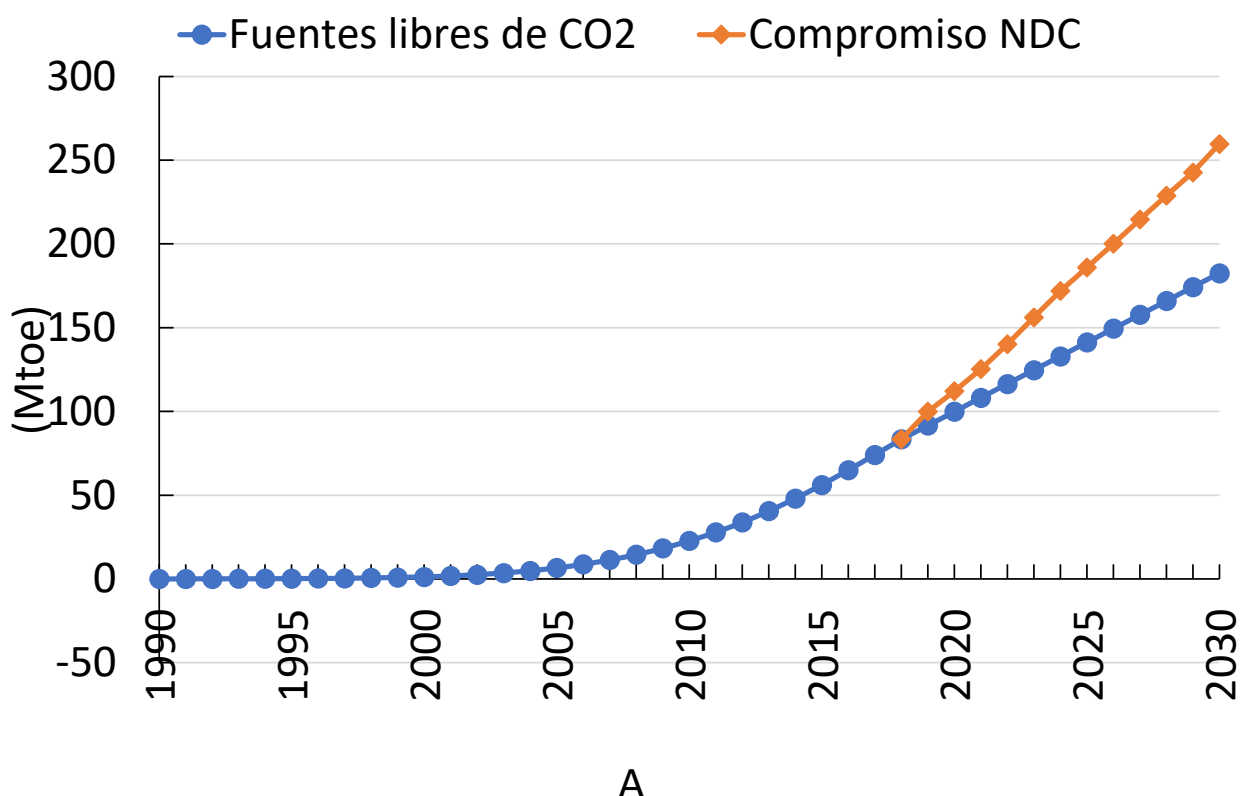


Figura 3.2: Evolución de la energía entregada por fuentes libres de emisiones de CO2 comparada con la comprometida por la NDC India.

La evolución en los últimos años de las variables estudiadas y los datos aportados por India en sus NDC marcarán los escenarios fijados en este trabajo. En su NDC se marca como compromiso incrementar la potencia instalada en renovables cinco veces, pasando de los actuales 35GW, a una potencia instalada de 175 GW para 2030, lo que supone un aumento porcentual anual cercano a un 10 %. Esta subida está muy por encima del crecimiento registrado por el mercado de las renovables en los últimos años, siendo por tanto un escenario diferente a la evolución del sistema actual. La *Figura 3.2* constata la diferencia entre la tendencia de producción de las renovables en el pasado de la India y la generación de energía esperada mediante la implantación del nuevo compromiso energético planteado por India en su NDC.

Igualmente, su NDC estima un valor para su PIB 2,98 veces mayor que el actual para 2030, igualmente esta tendencia de crecimiento es superior a la evolución actual del PIB, por lo que se tratará a este dato como otro escenario distinto al base.

Una de las soluciones aportadas por las autoridades indias en materia de política energética es la mejora de las emisiones en las plantas térmicas, empleando plantas de generación eléctrica de carbón con tecnología supercrítica, que aportan una notable mejora a la eficiencia energética del combustible. Este tipo de tecnología unida a otros anuncios como la mejora de la red de distribución, que pretende crear corredores verdes para mejorar la distribución en la red eléctrica de la energía renovable, el cambio mayoritario de fuente de combustible en los hogares, o las medidas adoptadas en el sector transporte, apoyan escenarios a futuro que incluyen mejora de la eficiencia. Datos como la evolución de los últimos años del indicador de intensidad energética, que ha pasado de 5,5 MJ/US\$ (2009) a 4,4 MJ/US\$ (2018) demuestran que se están dando pasos en este sentido [5]. Teniendo en cuenta este último objetivo, este trabajo estudiará cuatro escenarios en relación con el crecimiento del PIB, la evolución de la matriz energética, la estructura productiva sectorial, y la mejora de eficiencia energética para el período 2019-2030.

Escenario 1

En el Escenario base la evolución del PIB, la matriz energética y la estructura productiva seguirán la tendencia de los últimos seis años, trabajando con los datos del periodo 1990-2018, extrapolando para obtener el periodo 2019 -2030. Se han elegido los últimos 6 años al representar la tendencia que India ha experimentado en la última etapa con datos conocidos, tomando como punto medio de referencia al año 2015, en el que se ratificó la NDC india. En este modelo se seguirá instalando energía renovable en la misma proporción que lo realizado en los últimos 6 años. Este escenario quiere servir de modelo para verificar la evolución del sistema si se continúa con la misma política en los años sucesivos, por lo que no se ha incrementado el PIB u otro indicador del sistema.

3. MEDOTOLÓGÍA

Escenario 2

India, tal como anticipa en su NDC, experimenta una fuerte subida en su economía y alcanza un PIB para 2030 de $6,31 * 10^{12}$ US\$, lo que significa una subida porcentual con respecto a 2018 del 123 %. Para modelar este escenario se empleará una tasa de crecimiento anual constante de los componentes de la formación del PIB. Igualmente se fijará una tasa de crecimiento/decrecimiento en la participación de los sectores económicos en la composición del PIB, evolucionando desde los valores actuales encabezados por el sector servicios, con una participación del 51 %, el sector industrial con un 32% y el primario con un 17%, a los valores propuestos por la Agencia Mundial de la Energía que anticipan un aumento paulatino en la participación del sector servicios, alcanzando el 57 % en su participación del PIB para el año 2030. Igualmente se espera una consolidación del sector industrial, que alcanzará una cuota del 33%. Se espera continuar con una tendencia a la baja de la participación del sector primario, que quedará reducido a un 10 % en la participación de PIB para 2030. El resto de las variables evolucionará como en el escenario base. Este escenario corresponde claramente a una situación donde la economía está creciendo rápidamente, sin la puesta en servicio de nuevas propuestas ambientales para el fomento de las energías renovables y eficiencia energética contemplada en la NDC de India, estando la evolución de las renovables fijada únicamente a la evolución propia de este sector en los últimos 6 años.

Escenario 3

El escenario 3 cuenta con la misma tendencia en cuanto se refiere a la expansión económica esperada para India, así pues, se respetarán las tasas de crecimiento empleadas para modelar la variable que dan forma al PIB del escenario 1. Así mismo, para este escenario se incluyen la ampliación de energía renovable propuesta por la India en su NDC, alcanzando para 2030 una potencia instalada en este sector de 175 GW. Este crecimiento, mayor del acontecido en el pasado, generará un exceso de energía limpia que permitirá una bajada de la cuota de las energías fósiles, debido a un crecimiento anual constante de la cuota de las renovables. Este escenario cuenta con una de las medidas propuestas en la NDC, la de instalación de energía renovable, pero continúa sin contar con las medidas de eficiencia fijadas por el gobierno indio.

Escenario 4

Para el escenario 4, se sigue planteando la misma tendencia en cuanto se refiere a la expansión económica esperada para India, respetando la tasa de crecimiento empleada

para modelar la variable que dan forma al PIB del escenario 1. Del mismo modo para este escenario se incluyen la ampliación de energía renovable propuesta por el escenario 3, incluyendo esta vez una tasa de eficiencia propiciada por el cumplimiento de los compromisos de India en su NDC. Para modelar este escenario se ha previsto una mejora en la eficiencia del uso de energía debida a la implantación de la tecnología supercrítica en las plantas de producción eléctrica, de acuerdo con lo establecido en la NDC. Este tipo de tecnología consigue rendimientos cercanos al 52% de eficiencia, muy por encima de la empleada por India en la actualidad que presenta únicamente un 35%. La implantación de esta tecnología genera un nuevo escenario en el que se precisa una menor cantidad de energía primaria para la obtención de la misma energía eléctrica. Para el modelado de este escenario, se ha empleado una reducción paulatina de las necesidades de energía primaria del sector de producción eléctrica del país mediante carbón, hasta alcanzar una eficiencia final en 2030 del 52% en el total de las plantas eléctricas del país, lo que modelará la introducción gradual de este tipo de tecnología en las plantas de generación. Igualmente, el modelado realizado atiende al crecimiento esperado de la demanda eléctrica, que crece como el resto de las necesidades de combustibles al ritmo en el que ha subido en los últimos años. Este escenario mejora la responsabilidad ambiental del país y el desarrollo sostenible mediante el apoyo a las medidas de ahorro energético y la eficiencia energética.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS	186
4.1 Emisiones por tipo de combustible y sector en los 6 mayores emisores ..	186
4.2 Emisiones por tipo de combustible y sector en India.....	189
4.3 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO₂ en los 6 mayores emisores	193
4.4 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO₂ en India	199
4.5 Intensidad de emisiones en los 6 mayores emisores	205
4.6 Intensidad de emisiones en India y su proyección hasta 2030	207
4.7 Análisis de causalidad de Granger	213

*"Nada tiene tanto poder para ampliar la mente
como la capacidad de investigar de forma
sistemática y real todo lo que es susceptible de
observación en la vida"
Marco Aurelio*

4. RESULTADOS

4.1 Emisiones por tipo de combustible y sector en los 6 mayores emisores

En este apartado se analizará en profundidad la evolución de las emisiones de CO₂ en los diferentes países estudiados, desagregando por tipos de combustible y sector, prestando especial atención a los diferentes tipos de carbón y petróleo utilizados. Esta información se resume en la *Figura 4.1.1*.

La *Figura 4.1.1* presenta en su panel A la evolución de las emisiones en China. El hecho más evidente de esta figura es el rápido aumento de las emisiones durante el período de tiempo analizado. La principal fuente de emisiones corresponde a las diferentes formas de carbón. En 1990, era responsable del 85% de las emisiones, siendo estas, generadas principalmente por el empleo del tipo bituminoso, con un 69% de las emisiones totales. Incluso en 2018 el carbón sigue siendo la principal fuente de emisiones, un 78%, aunque el uso de carbón bituminoso se ha visto reducido al 37%, principalmente por la introducción de nuevos tipos de carbón como el de coque o el carbón de alto horno, todos ellos con un factor de emisión muy elevado. El aumento abrupto en las emisiones de 2005 proviene del uso de carbón de alto horno (incluido en el carbón*) en la industria siderúrgica, que se ha mantenido desde entonces. El empleo del diésel y la gasolina también ha aumentado, con un consumo de diésel que ha pasado del 3,9% (1990) al 5,4% (2018). Vale la pena mencionar la reducción del uso de fueloil, que pasa del 1,9% (1990) al 0,4% (2018). Además, el sistema recibe una creciente cantidad de energía aportada por el gas natural, que empezó a emplearse en 2005 con una participación en las emisiones de 1,4%. Este combustible ha subido en su empleo, hasta alcanzar un 4,6% de las emisiones (2018). En cuanto a los sectores económicos, sus porcentajes de emisiones son relativamente constantes durante todo el período, con valores aproximados de 67%, 26% y 7% para los sectores industrial, de servicios y primario, respectivamente. Sin embargo, se observa al final del periodo una reducción específica en la participación del sector primario en comparación con los sectores industrial y de servicios.

4. RESULTADOS

En la *Figura 4.1.1 D* se presenta la evolución de la India, que también muestra un rápido aumento de emisiones como China. Estas emisiones están fuertemente determinadas por el empleo de los diferentes tipos de carbón, siendo responsable del 59% de las emisiones totales en 1990, alcanzando el 65% (2018). El país también muestra un uso significativo de carbón de tipo bituminoso, responsable del 44% del total de emisiones en 2018. En cuanto a la participación de los sectores económicos, el sector primario presenta una contribución bastante estable en su tendencia durante todo el período, con aproximadamente un 10% de incremento. Sin embargo, el sector servicios aumentó del 30% (1990) al 36% (2018), mientras que el sector industrial pasó del 60% (1990) al 54% (2018). Se debe tener en cuenta que el aumento en el uso de diésel y gasolina ha sido enmascarado por el rápido aumento de las emisiones provenientes del carbón.

La tendencia observada en las emisiones de los países desarrollados (paneles B, C, E y F de la *Figura 4.1.1*), presenta una cierta estabilización o incluso una disminución, a pesar de la evolución económica de este grupo de países durante los últimos treinta años. Un aspecto común en estos cuatro países es la retirada constante de las emisiones de combustibles derivados del carbón a favor del gas natural, que ha crecido en este conjunto de economías desarrolladas, convirtiéndose en una de las principales fuentes de energía. De hecho, se pueden asignar más del 27% de las emisiones en los EEUU a esta fuente. En la UE (*Figura 4.1.1 C*) las emisiones de gas natural crecieron del 15% (1990) al 25% (2018), mientras que en Japón (*Figura 4.1.1 F*) del 10% al 20% para el mismo periodo. Finalmente, Rusia (*Figura 4.1.1 E*), un país tradicional productor y exportador de gas natural, pasó del 42% (1993) al 50% (2018).

Un problema común en las economías desarrolladas es su alto porcentaje de emisiones en el sector transportes, donde se emplean mayoritariamente derivados del petróleo como la gasolina y el diésel. Estas emisiones representan en EEUU (*Figura 4.1.1 A*) el 27% (1990), ascendiendo al 31% (2018), mientras que la UE pasó del 25% (1990) al 31% (2018). Por otro lado, en 2018 Rusia se igualó la participación de emisiones de diésel y gasolina alcanzada en 1990, donde ocuparon aproximadamente un 11% del total. El único país desarrollado donde la proporción de emisiones relacionadas con el diésel y la gasolina ha disminuido es Japón, pasando de representar el 25% (1990) al 20% (2018).

Finalmente, en cuanto a la evolución de las emisiones por sectores, todas las economías desarrolladas han mantenido una participación relativamente similar. En ellos, la participación del sector industrial ha disminuido, aumentando la participación del sector servicios. En EEUU, el sector industrial comparte esta tendencia, dado que se registró una disminución que le hizo pasar del 33% (1990) al 29% (2018), mientras que el sector de servicios aumentó del 67% al 70% en el mismo periodo. En la UE por su parte, se registró una tendencia similar, experimentando una reducción en las emisiones del sector industrial, que pasaron del 42 % (1990) al 34 % (2018); en Japón, del 53% al 43% en el mismo periodo; y en Rusia, del 46% (1993) al 42% (2018).

4.1 Emisiones por tipo de combustible y sector en los 6 mayores emisores

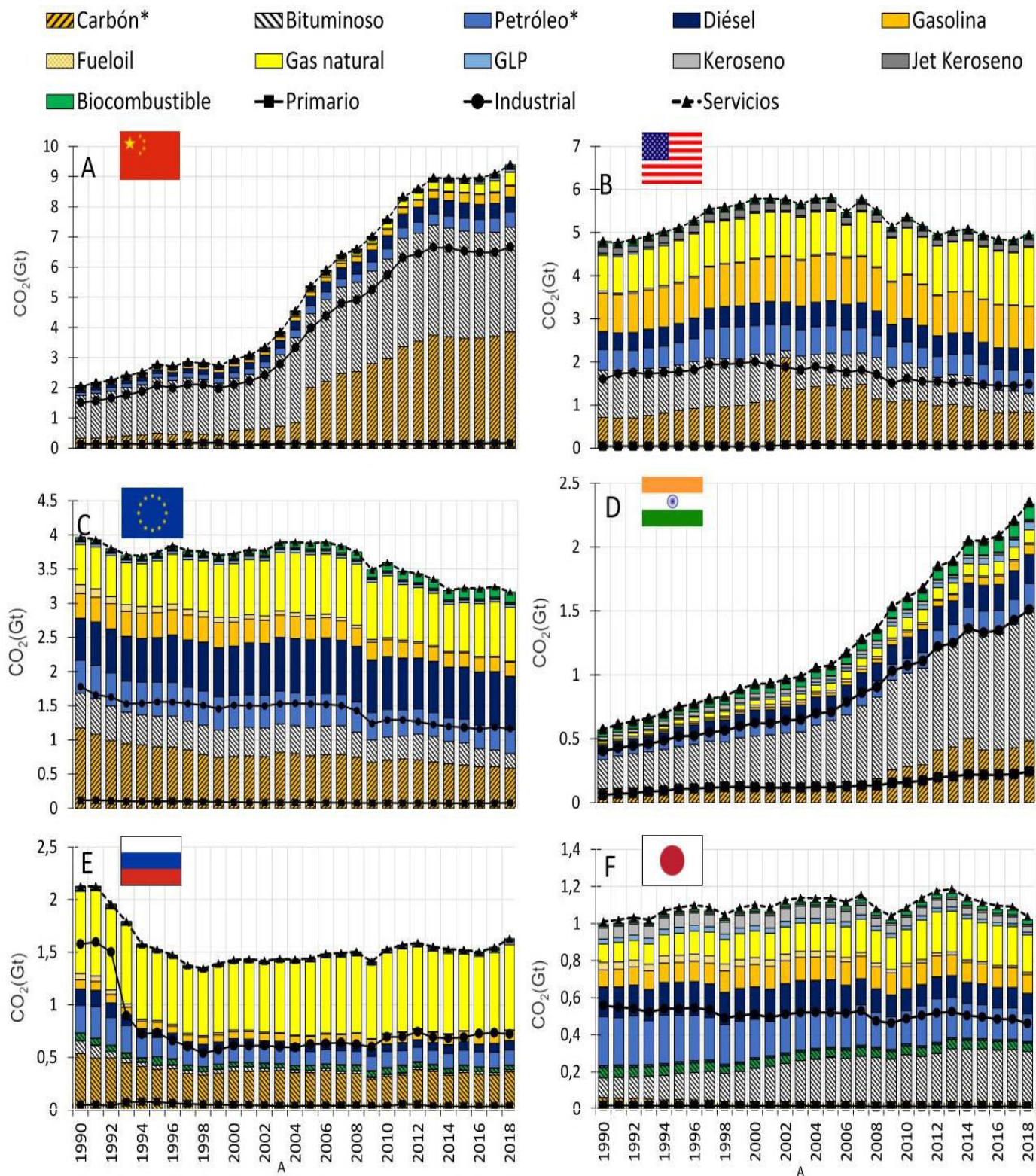


Figura 4.1.1: Evolución de la emisión resultante de CO₂ por tipo de combustible, junto con las emisiones separadas por sectores económicos en los 6 países con mayor emisión de GEI

4.2 Emisiones por tipo de combustible y sector en India

Una de las novedades de esta tesis es la consideración de 21 fuentes distintas de energía, lo que representa una notable mejora en el cálculo, al presentar cada una de ellas factores de emisión muy diferentes. Cada uno de los consumos de los combustibles citados se ha analizado dentro de tres sectores económicos diferentes que componen el total de la economía del país, posibilitando el análisis completo de las emisiones. En la *Figura 4.2.1*, las emisiones de CO₂ se presentan separadas por cada sector estudiado. Nótese que el valor de las emisiones ha sido calculado usando la ecuación (1), empleando para ello los diferentes tipos de combustibles para cada sector. El aumento de las emisiones durante el período estudiado es un factor común independientemente del sector. Sin embargo, el mayor aumento se registra en el sector industrial, seguido del sector servicios. El sector primario muestra una tendencia mucho más constante en todo el periodo estudiado, aunque sus emisiones al final del período son aproximadamente el doble que en la fase inicial estudiada.

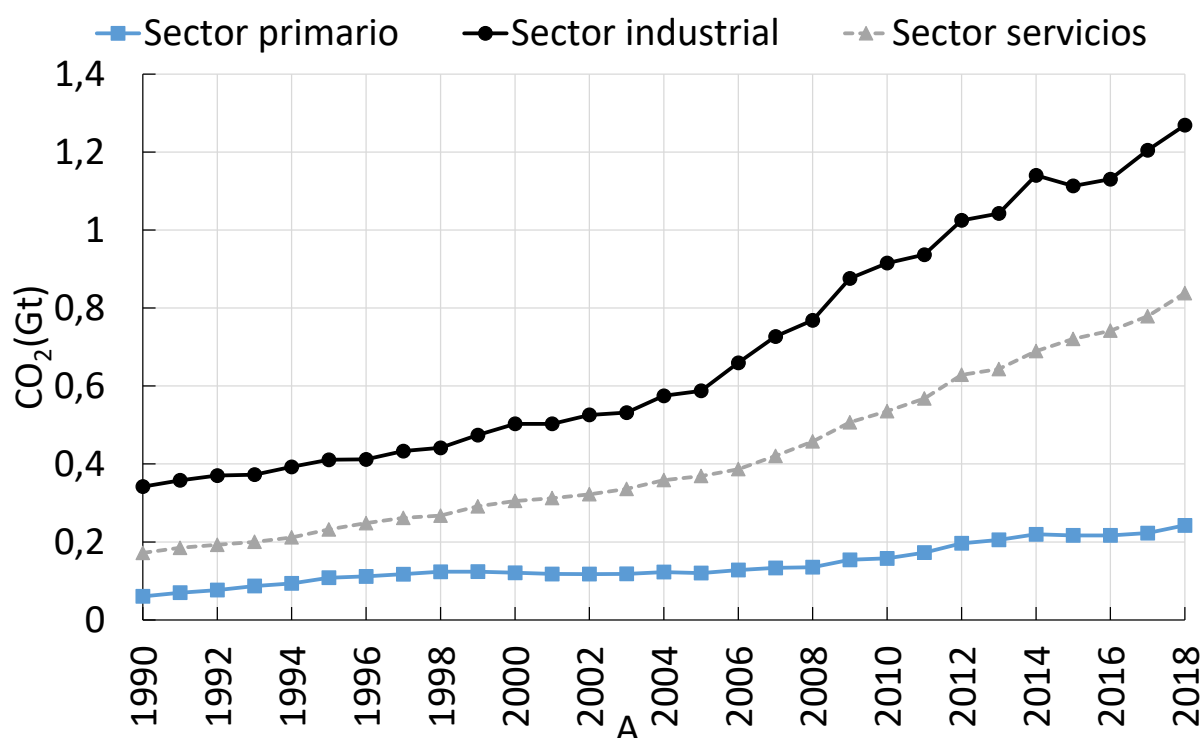


Figura 4.2.1: Evolución de la emisión resultante de CO₂ por sectores en India

4.2 Emisiones por tipo de combustible y sector en India

De acuerdo con la ecuación de Kaya, este comportamiento puede entenderse parcialmente considerando el crecimiento del PIB, dado que este factor ha experimentado un cambio notable, alcanzando un valor 5 veces superior a la inicial. A este factor se debe añadir la evolución experimentada por los sectores económicos, que han variado en su tamaño relativo, aumentando aquellos que mayores emisiones generan. Así, se ha reducido el tamaño porcentual del sector primario, que ha pasado del 28% (1990) al 15% (2018) del total del PIB. El sector industrial se ha mantenido estable durante todo el período con una participación que ha rondado el 28%, siendo el sector servicios el que ha experimentado mayor crecimiento, lo que le ha permitido pasar del 44% (1990) al 55% al final de la serie estudiada. A pesar de la tendencia general creciente, las emisiones de los sectores primario e industrial han mostrado una clara estabilización durante los últimos tres años.

Para entender en profundidad la evolución de las emisiones de CO₂, vale la pena estudiar la contribución de los diferentes combustibles en cada uno de los sectores económicos estudiados. Por lo tanto, en la *Figura 4.2.2* se presentan de forma desagregada las emisiones de CO₂ por tipo de combustible y sector. En los paneles superiores (A y D), se muestran los resultados del sector primario, el panel A incluye todo tipo de combustibles, eliminándose en el panel D el carbón, para permitir apreciar la evolución del resto de combustibles cuyas contribuciones son mucho más pequeñas. En esta figura, se puede apreciar cómo el carbón y el diésel, y en menor medida el petróleo y el gas natural, son los principales contribuyentes a la emisión de este sector, con un aporte creciente de biogás durante las últimas décadas. El carbón se utiliza para la producción de electricidad, mientras que el diésel se emplea para generar energía en vehículos en tareas agrícolas. Nótese la clara reducción de emisiones procedentes del carbón en los últimos tres años, que es muy probablemente la razón de la estabilización de emisiones del sector durante el mismo período. En los paneles B y E de la *Figura 4.2.2* se representan las emisiones del sector industrial. Este sector presenta, con mucho, las mayores emisiones, consecuencia esto último de su gran tamaño y también de su gran intensidad de emisión. En la *Figura 4.2.2*, se puede observar cómo el carbón es también, con mucho, el principal contribuyente a las emisiones de CO₂ en el sector industrial, seguido por el petróleo, el biogás y gas natural, pero en una proporción bastante menor. Se debe tener en cuenta que el resto de combustibles presentan una contribución mucho menor y casi constante. En este sector, la contribución del carbón como energía primaria en procesos industriales es muy grande, pero se debe añadir a esta la proveniente de la producción de electricidad. La tendencia de las emisiones de CO₂ derivadas del empleo de carbón se mantuvieron bastante estables hasta mediados de la década de 2010, con un modesto aumento constante, pero desde entonces, las emisiones aumentaron a un ritmo mucho mayor, registrándose un aumento significativo hasta 2015, donde se produjo un cierto descenso y posterior estabilización. Esto también se refleja de una forma clara en las emisiones totales del sector. Se puede concluir que las emisiones en este sector son en gran parte impulsadas por el uso del

4. RESULTADOS

carbón y, en consecuencia, representa un objetivo clave para futuras políticas de reducción de CO₂.

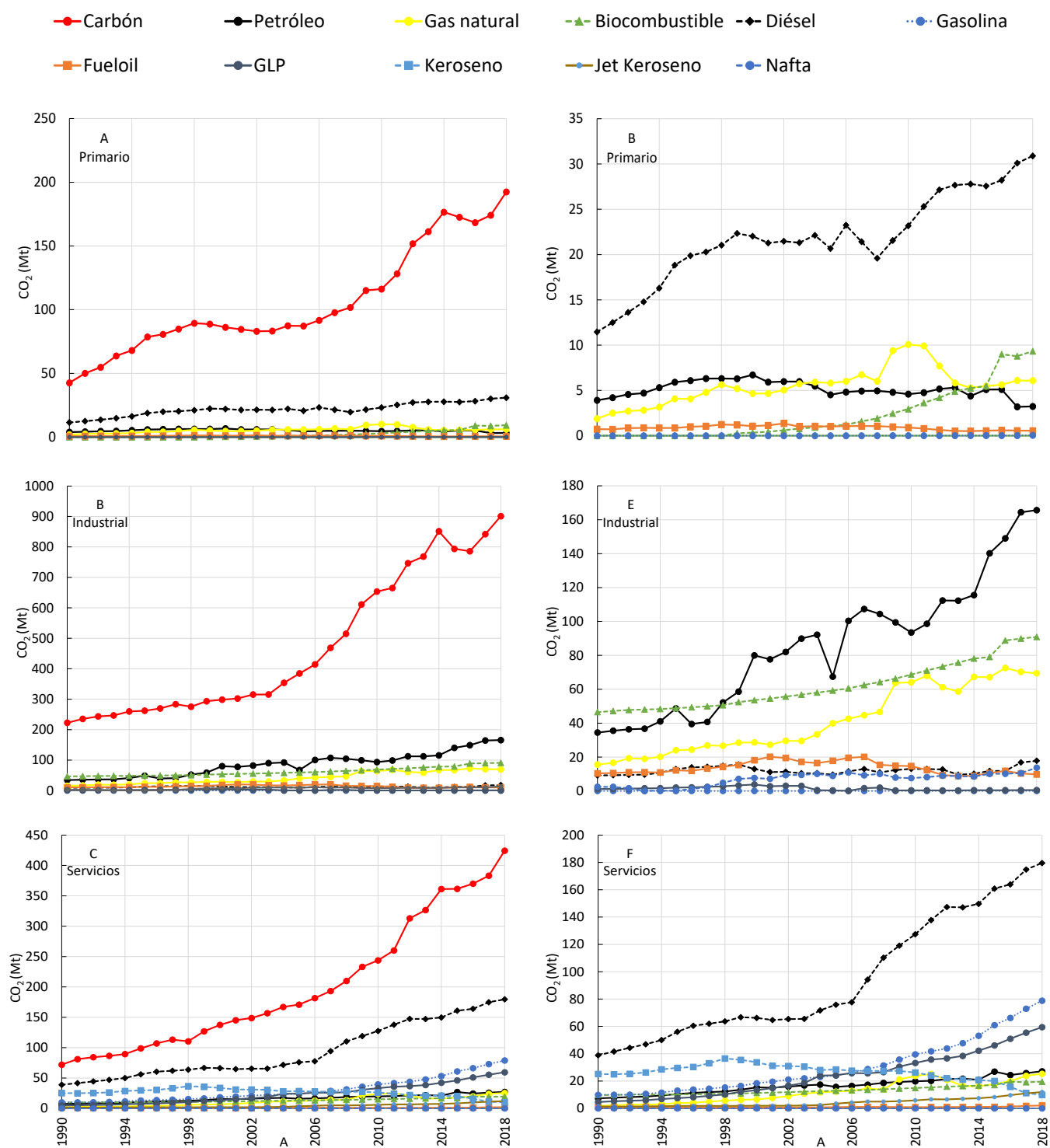


Figura 4.2.2: Evolución de la emisión resultante de CO₂ por principales combustibles y sectores en India. Los paneles izquierdos incluyen todos los combustibles, mientras, que los derechos no incluyen el carbón.

4.2 Emisiones por tipo de combustible y sector en India

Finalmente, en los paneles C y F de la *Figura 4.2.2* se muestran las emisiones resultantes de los combustibles utilizados en el sector servicios. Aquí, en gran medida el carbón, el diésel, la gasolina y el GLP, son los principales contribuyentes a las emisiones del sector. El resto de combustibles aportan mucho menor emisión de CO₂, con una notable disminución de la contribución del queroseno, debida sin duda a las reducciones en las ayudas estatales comentadas en el apartado 2.3.2 *Tendencias registradas en el empleo de combustibles en India*. En el sector servicios, el carbón se utiliza principalmente para la producción de electricidad, el diésel, el GLP, la gasolina para el transporte, mientras que el keroseno aporta energía en el entorno del hogar. Nótese que en este sector las emisiones del carbón no disminuyeron en los últimos años del período estudiado, aunque mostraron una cierta desaceleración en el periodo 2014-2016. Esta tendencia, ha cambiado en los dos últimos años analizados, registrándose nuevamente fuertes subidas, que pueden cuantificarse en un incremento interanual del 3,5% y del 10,8% para el 2017 y 2018, respectivamente.

4.3 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO₂ en los 6 mayores emisores

El objetivo principal de este trabajo es determinar la contribución de los diferentes factores estudiados a la formación de las emisiones de CO₂ (fuerzas motrices), por tanto, se ha obtenido las emisiones de los estados que comparamos con India, mediante la aplicación de la identidad de Kaya. De acuerdo con la forma de la identidad de Kaya empleada, Ecuación (1), las fuerzas motrices estudiadas son la población (pob), la actividad económica (act), la estructura económica (str), la intensidad energética (int) y el mix energético (mix). Se supone que el término de emisión desaparece porque los factores de emisión se han tomado como constantes, empleando para ello los factores de emisión aportados por la EPA [66].

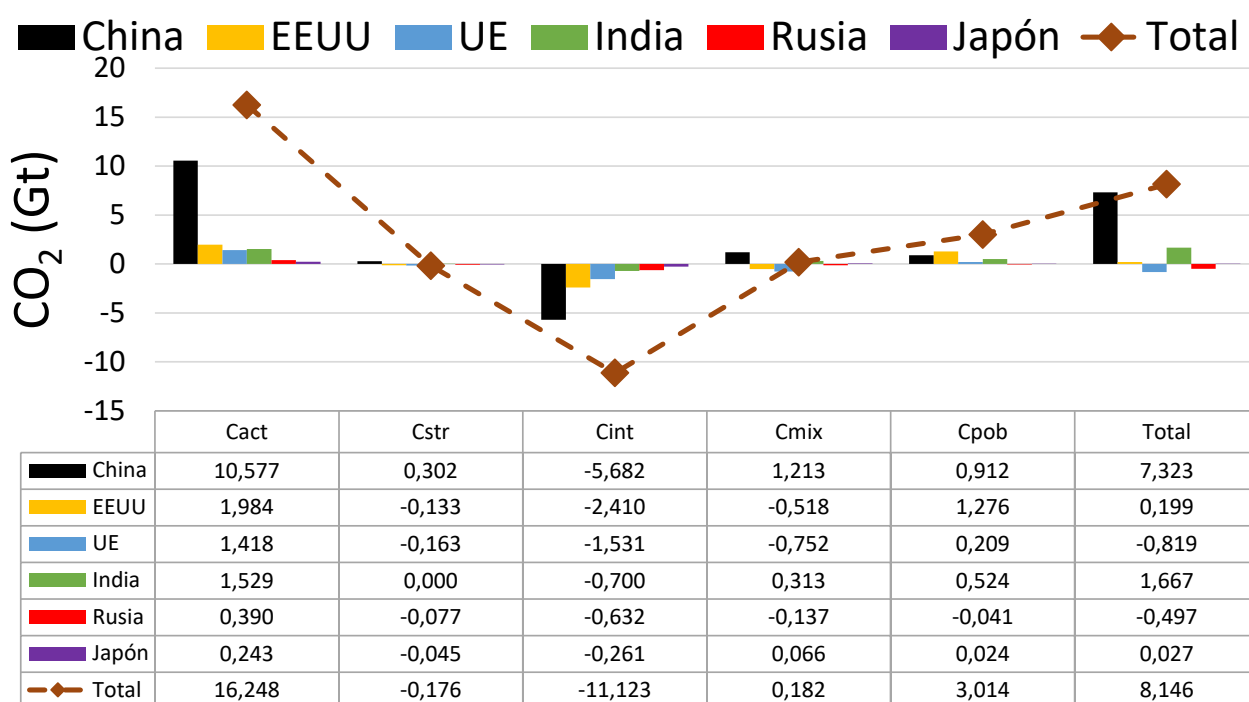


Figura 4.3.1: Resultados de la aplicación del modelo LDMI aditivo para el periodo 1990-2018 en los países empleados para comparar con India.

En la *Figura 4.3.1*, se representa la contribución de cada fuerza motriz analizada mediante el empleo del modelo LMDI en la forma aditiva. Este modelo aditivo, se ha realizado para las cinco economías analizadas durante el mismo periodo, 1990-2018.

4.3 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO₂ en los 6 mayores emisores

El primer aspecto que llama la atención es que aparentemente todos los países tienen un comportamiento común, aunque con una escala claramente diferente, especialmente en el caso de China, pero cuando se analiza en detalle, se observan diferencias notables. En el caso del término de actividad (act), todos los países presentan contribuciones positivas, siendo el de China la mayor, que presenta una contribución tan grande como el doble de la suma de las contribuciones del resto de los países. El segundo contribuyente es EEUU, con una contribución de alrededor del 20% de la de China. La importante contribución positiva del término de actividad ya ha sido observada en otros trabajos como [105]. La contribución del término de estructura (str) es casi insignificante en todos los estados analizados, mientras que el término de intensidad energética (int) es negativo en todos los países, lo que supone una reducción en las emisiones resultantes, con China como máximo exponente de esta tendencia, correspondiendo su magnitud a la suma de las contribuciones del resto de países combinados, lo que implica que los cambios en el modelo energético de China no han sido capaces de compensar el aumento registrado en el término de actividad descrito anteriormente. En [106], el autor concluyó que en Rusia, China e India la intensidad energética juega un papel importante en la mitigación del aumento de emisiones de CO₂, aunque en [107] se observa un efecto rebote. En [105] y [54] también apoyan la existencia de una contribución negativa del término de intensidad energética. En el caso del término asociado al mix energético, China e India presentan aportes positivos, Japón una contribución insignificante, mientras que EEUU, la UE y Rusia presentan una aportación negativa que implica que hasta ahora China e India son incapaces de reducir sus emisiones con energías libres de emisiones, mientras que los resultados apoyan que, para EEUU, la UE y Rusia se reducen emisiones por este término. Según la Agencia Internacional de la Energía [8], el comportamiento más bien plano de Japón es una consecuencia de la política aplicada tras el accidente de Fukushima [108]. China e India aún no son capaces de lograr un resultado negativo en el término mix, a pesar del gran aumento en el uso de tecnologías libres de emisión. Esta incapacidad es debida al aumento del uso de energía fósil para cubrir su fuerte demanda energética. Finalmente, el término de población es positivo en todos los países, excepto en Rusia. Para este indicador se registran mayores contribuciones para EEUU y China. Vale la pena mencionar el pequeño tamaño de la contribución de la población en la India, a pesar del gran aumento de sus habitantes en el período considerado, en el que se ha registrado un incremento poblacional de un 40% [5]. Esto está relacionado con el todavía demasiado bajo PIB per cápita del país, lo que produce un pequeño incremento en las emisiones por cada habitante extra.

Con todo, China e India son los principales contribuyentes positivos, con los EEUU y Japón también teniendo contribuciones, aunque casi insignificantes, y Rusia y la UE siendo los únicos países con una suma negativa. En otras palabras, el aumento de las emisiones de CO₂ anuales (relativa a 1990) de los seis países fue de 8,2 Gt, correspondiente a 7,3 Gt para China, 1,7 para India y 0,2 para EEUU. Además, la UE y Rusia generaron una reducción de 0,8 Gt y 0,5 Gt, respectivamente, teniendo Japón una contribución nula.

4. RESULTADOS

Como conclusión de esta figura, el elemento principal detrás del aumento de las emisiones de CO₂ es el término de actividad (act), mientras que, hasta ahora, la intensidad energética (int) es la única con una clara capacidad de reducción, mientras que el término relativo a los combustibles empleados (mix) solo está actuando efectivamente en los EEUU, la UE y Rusia.

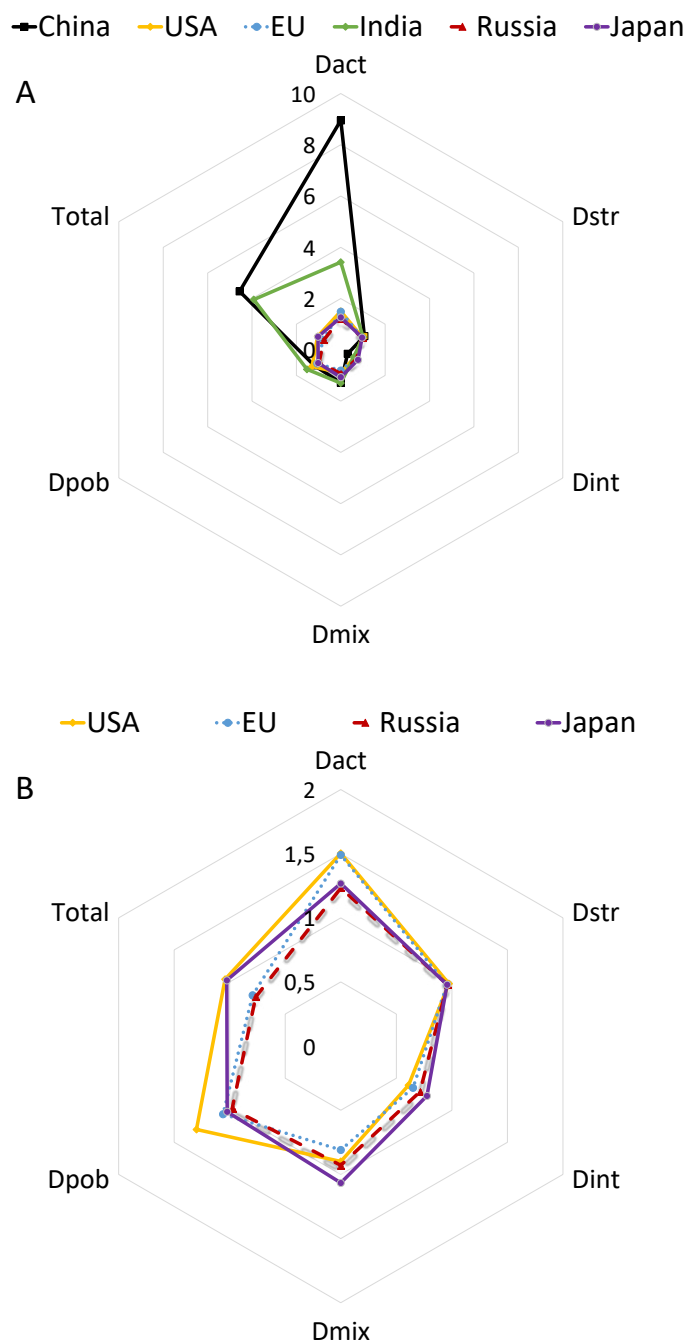


Figura 4.3.2: Resultados de la aplicación del modelo LDMI multiplicativo para el periodo 1990-2018 en los países empleados para comparar con India.

4.3 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO₂ en los 6 mayores emisores

Una forma diferente de presentar los mismos resultados es proporcionada en la *Figura 4.3.2* donde se muestra la descomposición LMDI multiplicativa. Resulta importante apuntar cuán claramente separados se encuentran los países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo, según la escala de cambio de sus fuerzas motrices. De hecho, para apreciar realmente esto, en la *Figura 4.3.2 A*, todos los países están representados, mientras que en la *Figura 4.3.2 B*, solo los desarrollados son mostrados, logrando de esta manera una resolución clara para revelar los cambios entre estos.

En la *Figura 4.3.3* se muestra la evolución de los cinco componentes del modelo aditivo de LMDI empleados tras la descomposición aplicada a la identidad de Kaya, junto con el valor agregado, separados por países, a lo largo de la serie temporal estudiada. La primera característica común es que China presenta una tendencia distinta en comparación con el resto de los países en todos los indicadores, excepto en el caso de la población (panel E). De hecho, todos los países excepto China cubren un rango relativamente estrecho de emisiones, mientras que China está lejos de esta situación.

En cuanto al indicador de la actividad, es decir, la contribución debida al cambio en el PIB per cápita (panel A), todos los países presentan una tendencia al alza, con China aumentando considerablemente. Este país muestra una clara aceleración desde 2002 en adelante. Lo más probable es que la razón sea debida a los cambios realizados en 2004 en la constitución estatal del país que incluye la protección de los derechos de propiedad privada y a una nueva política económica general del gobierno. Esta tendencia ha continuado hasta hoy, demostrando la madurez de la economía china. La disminución del término de actividad en Rusia también es notable, que es una consecuencia de la crisis que sufrió el país tras la desintegración de la antigua Unión Soviética. En esta figura también es posible detectar el impacto de la gran recesión de 2008 que es principalmente visible en los EEUU y la UE.

Estos resultados son consistentes con los obtenidos en [105], dado que la actividad económica se presenta como el contribuyente más significativo a las emisiones, siendo China en este contexto el más firme exponente de esta aseveración. La contribución en el indicador estructura, es decir, la contribución debida a los cambios en la estructura de los sectores económicos (panel B) es negativa en todos los países excepto en India y principalmente en China, con un claro máximo alrededor del año 2010. Nótese que, en valores absolutos la contribución de este indicador es la más pequeña. La intensidad energética, es decir, la contribución debida a los cambios entre la relación de energía y PIB (panel C), es, en la mayoría de los casos, el principal contribuyente a la reducción de las emisiones de CO₂; esto es especialmente notorio en los casos de la UE, los Estados Unidos y China, mientras en Japón, India y Rusia, el comportamiento es casi nulo. Estos resultados están en línea con los obtenidos en [51], [52], [54]. La *Figura 4.3.3 C*, muestra claramente cómo la energía se utiliza cada vez de forma más eficiente en todos los países analizados. El término que modela el mix empleado, es decir, la contribución debida a la matriz

4. RESULTADOS

energética (panel D), es el segundo contribuyente a la reducción de las emisiones de CO₂, de hecho, eso solo ocurre durante todo el período para la UE, que presenta una clara tendencia a la baja.

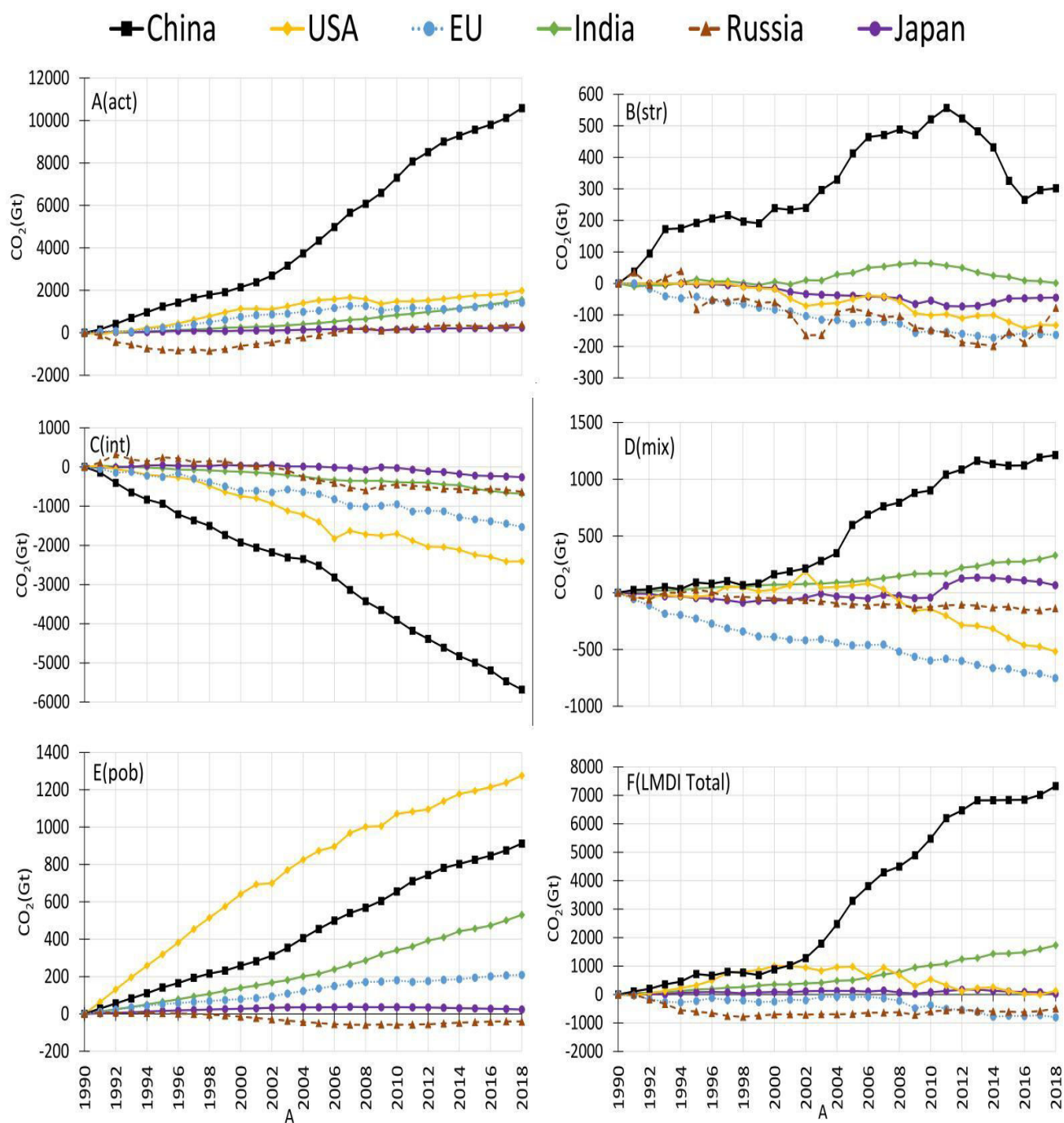


Figura 4.3.3: Resultados de la aplicación del método LMDI aditivo para el periodo 1990-2018 en los países empleados para comparar con India.

4.3 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO₂ en los 6 mayores emisores

Este hecho es una prueba del impulso de las energías renovables como modelo energético en la UE desde la década de 1990. EEUU tuvo una contribución plana o incluso positiva hasta 2006, pero desde entonces la reducción ha sido muy intensa, casi alcanzando el nivel de la UE, lo que muestra un cambio en la política relativa al empleo de energía libre de emisiones de carbono. Los NDC de ambas regiones [11] muestran que las políticas medioambientales actuales reforzarán esta tendencia en los próximos años. Rusia y Japón presentan una tendencia bastante plana, aunque hay un aumento repentino en 2011 debido al accidente de Fukushima en el caso de Japón [108]. Sin embargo, se espera que las políticas futuras, según lo establecido en sus NDC [11], producirán una reducción neta del presente indicador, lo que sin duda contribuirá a la reducción de emisiones resultantes. En el caso de la India, se observa una tendencia creciente sin signos de reducción, mientras que en China es posible distinguir dos períodos, uno hasta el año 2004, que representa un aumento moderado, y desde entonces hasta 2018, cuando la contribución del mix comenzó a aumentar rápidamente. Estos indicadores claramente indican que el combustible fósil en China e India es la principal fuente de energía, y su uso se está incrementando.

En la *Figura 4.3.3 E*, se muestra la contribución a las emisiones de la población, sorprendentemente, la más significativa contribución corresponde a EEUU, muy por encima de las contribuciones de China e India. Las contribuciones de Japón y Rusia son muy planas, casi nulas, mientras que la de la UE ha aumentado constantemente, alcanzando la saturación en los últimos años

Finalmente, en la *Figura 4.3.3 F* se proporciona la contribución agregada. Este indicador presenta un comportamiento similar en China hasta 2002, con un aumento impresionante de las emisiones desde entonces hasta 2012, seguido de cierta estabilización al final del período. Estados Unidos ha mostrado una contribución positiva durante la mayor parte del período, pero cambios a partir de 2007 han permitido reducciones que llevaron al indicador a anularse a partir de 2012. India muestra un aumento continuado de las emisiones durante todo el período con una cierta aceleración durante los últimos doce años. Japón presenta una contribución nula durante todo el período, y Rusia una constante pero negativa contribución, finalmente, la UE presenta una contribución casi nula hasta 2008, pero desde entonces ha habido una clara contribución descendente. Vale la pena analizar por separado el caso de Japón porque muestra una tendencia plana casi en todos los paneles de la *Figura 4.3.3*. Esta es una clara consecuencia de la evolución de la economía de Japón desde la década de 1990, cuando una profunda crisis económica condujo a los llamados “veinte años perdidos” [109] que claramente todavía tiene efecto hoy y casi no ha producido cambios en la emisión de CO₂, con la excepción de la influencia del accidente nuclear de Fukushima.

4.4 LDMI: descomposición de los factores emisores de CO₂ en India

Para analizar el impacto sobre las emisiones resultantes de CO₂, este trabajo se ha centrado en comparar los indicadores analizados en los 6 países con mayor emisión de GEI. Será en este apartado donde el estudio se centrará con más detalle en India. Primero, en la *Figura 4.4.1* muestra el desempeño en lo referente a la generación de emisiones de las diferentes fuerzas motrices para el periodo estudiado.

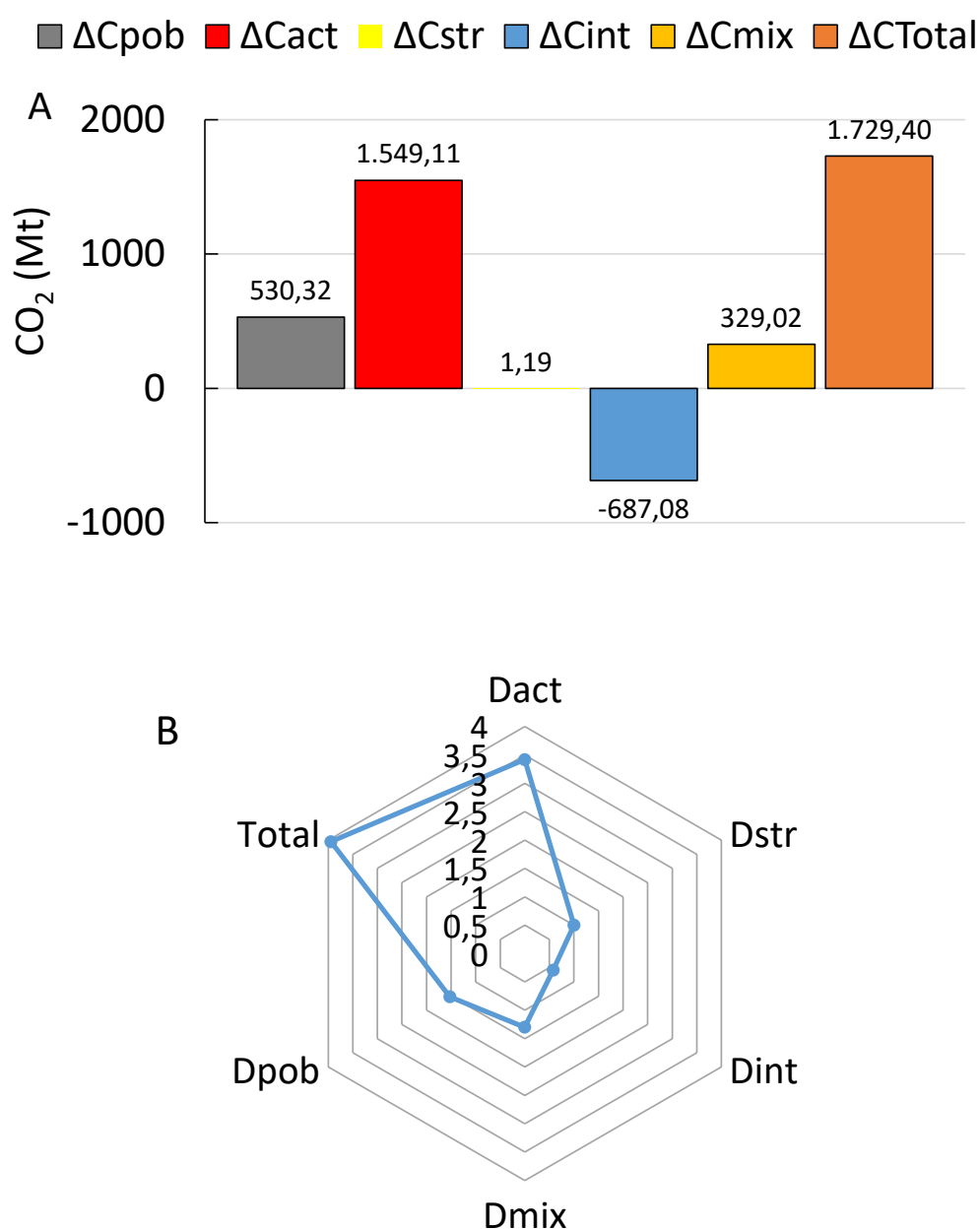


Figura 4.4.1: Resultados de la aplicación del modelo LDMI aditivo (A) y multiplicativo (B), para el periodo 1990-2018 en India.

4.4 LDMI descomposición de los factores emisores de CO₂ en India

Destacándose en su forma aditiva (A) y en su forma multiplicativa (B). La principal conclusión es que la actividad económica, es decir, el aumento del PIB per cápita, generó el mayor superávit de las emisiones resultantes de CO₂, con un aumento de 1549 MtCO₂, seguido del aumento de población con 530 MtCO₂ y el mix energético con 329 MtCO₂. El único componente estudiado que logra mitigar las emisiones de CO₂ es el término de intensidad energética, que contribuye con -687 MtCO₂, siendo el aporte casi neutro el relativo al término de estructura económica, con una contribución de 1,2 MtCO₂. El conjunto de los factores analizados conduce a un aumento de las emisiones durante el período completo de 1729 MtCO₂, lo que supone un aumento porcentual desde el año base del 276%. En resumen, al menos globalmente, es justo decir que el término intensidad energética consigue compensar el efecto de las contribuciones de la población y del mix energético, mientras que el aumento de las emisiones de CO₂ proviene fundamentalmente del término de actividad, siendo el término efecto de estructura económica despreciable. En particular, como se detalla en los trabajos de Paul y Nath Bhattacharya [110] y Yeo et al [111], donde también se concluyó que los principales contribuyentes a las emisiones de CO₂ para India fueron la actividad y el término de población y el incremento en el consumo de energía, mientras que Kangyin et al [45], comprobó que la reducción de la intensidad energética es el factor más efectivo para mitigar el incremento de emisiones de CO₂.

Para obtener una visión más precisa del problema de las emisiones de CO₂, vale la pena mostrar la evolución de la descomposición LMDI en función del tiempo. Esto se presenta en la *Figura 4.4.2*, donde en el panel A se representa la descomposición aditiva, mientras que en el panel B se muestra la descomposición LMDI multiplicativa. Los resultados de ambas descomposiciones son equivalentes, pero la información que proporcionan es complementaria.

El primer hecho que se puede apreciar fácilmente en ambos gráficos es que todos los indicadores analizados, excepto el término de actividad, presentan una tendencia bastante homogénea durante el período completo, con un aumento constante en términos de población y mix energético. Así mismo, existe un valor casi constante del término de estructura y una caída continua en el término de intensidad energética, que alcanza cierta aceleración en el 2000 y una desaceleración a principios de 2010. Sin embargo, el término de actividad presenta dos períodos claros. El primero de estos hasta mediados del 2000, presentando un moderado aumento de emisiones, y el segundo, desde mediados de 2000 en adelante, que presenta un aumento mucho mayor en las emisiones. Como ya se ha mencionado para el análisis global, el término de actividad sigue de cerca las emisiones totales, lo que implica que en cualquier momento el resto de componentes están casi compensadas entre sí. Vale la pena mencionar la contribución creciente del término de mix energético, que sugiere que la combinación energética en India ha visto reducida la contribución de la energía libre de carbono. Sin embargo, se puede notar una desaceleración de la contribución del mix energético en los últimos años. Esta caída en las

4. RESULTADOS

emisiones resultantes del mix energético está motivado por el aumento en renovables, que ejercen cierta reducción pese a la elevada demanda energética del país.

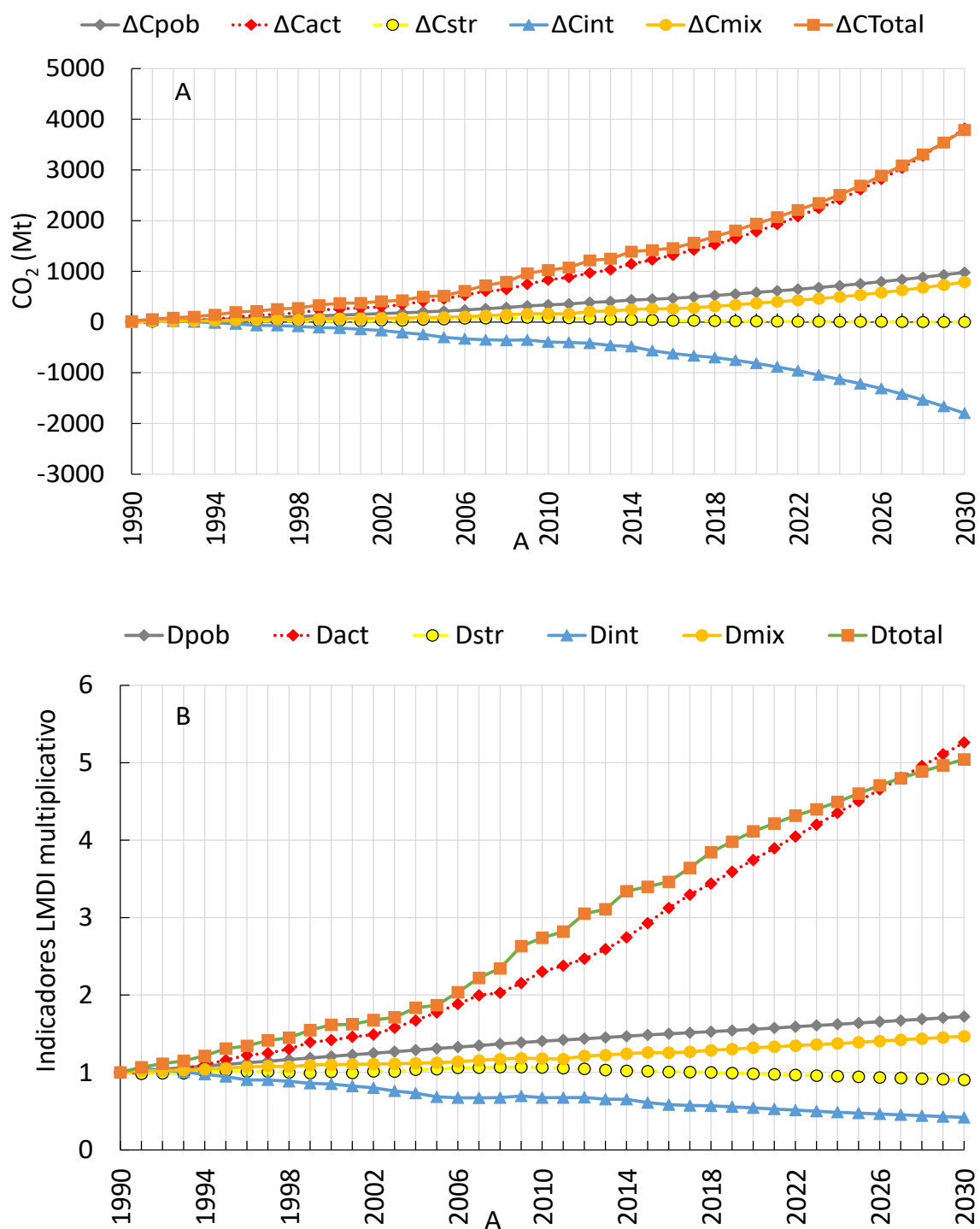


Figura 4.4.2: Evolución temporal del LDMI aditivo y multiplicativo para el periodo 1990-2020 en India.

4.4 LDMI descomposición de los factores emisores de CO₂ en India

En la *Figura 4.4.2* también se ha realizado la proyección de los resultados del LMDI hasta 2030. Para tal efecto, se ha asumido un escenario base para las cinco componentes del análisis LMDI, asumiendo que la tasa de variación para los próximos años corresponde a un promedio de los 6 últimos años. Por lo tanto, los valores parciales de los cinco componentes se combinan para obtener la variación completa, ya sea para el modelo aditivo o el multiplicativo. La proyección se ha realizado tal y como se describe en Robalino-López et al. [31].

$$y_t = y_{t-1}(1 + r) \quad (22)$$

Donde y_t y y_{t-1} representan el valor del indicador estudiado en el tiempo t y $t-1$, respectivamente, y r la tasa de cambio. De acuerdo con los valores extrapolados, la componente de actividad sigue siendo la de mayor contribución, superando incluso el valor del indicador multiplicativo para 2030. Este hecho supone que el efecto del rápido crecimiento económico no puede ser compensado por el efecto del resto de los componentes, dado que la emisión resultante sería 4,89 veces la del año base. El efecto del aumento de la población es aún moderado, la contribución del término estructura económica es casi despreciable, el efecto mix energético sigue siendo positivo con tendencia alcista de pendiente y el término de intensidad energética continúa con una clara tendencia a la baja.

Los resultados presentados en la *Figura 4.4.2*, se basan en un procedimiento muy bien establecido por Ang [112]. Sin embargo, es importante evaluar qué grado de confianza aportan estos resultados. Por lo tanto, es necesaria una comparación con un método diferente de descomposición. Una posible opción podría ser comparar con un Estadístico por regresión en el enfoque de población, riqueza y tecnología como se hace en el trabajo de Ma et al. [113]. Sin embargo, tal cálculo no puede ser fácilmente implementado para una identidad Kaya que está completamente desagregada en sectores económicos y tipos de combustibles, como el utilizado en este trabajo (1). Por lo tanto, se realizará un cálculo alternativo de LMDI, usando el LMDI-II, ideado por Ang y detallado en [95]. Este método alternativo se comparará con el LMDI-I empleado mediante el cálculo de su porcentaje absoluto medio (MAPE):

$$MAPE\Delta C_m = \frac{1}{n} \sum_{t_i} \left[\frac{\Delta C_m(LMDI I, t_i) - \Delta C_m(LMDI II, t_i)}{\Delta C_m(LMDI I, t_i)} \right] * 100 \quad (23)$$

4. RESULTADOS

Donde m representa “pob”, “act”, “str”, “int” y “mix”, n es el número de años y ti corre sobre los años analizados. Los valores obtenidos para el MAPE son $MAPE\Delta C_m = 0,61\%$. Dado el pequeño valor de este índice, se puede decir que los resultados presentados son lo suficientemente robustos.

Dada la importancia demostrada por los términos actividad ($\Delta Cact$) e intensidad ($\Delta Cint$), vale la pena desagregarlos en sectores. En la *Figura 4.4.3* se puede apreciar por sectores la evolución de la actividad económica (A) y la intensidad energética (B).

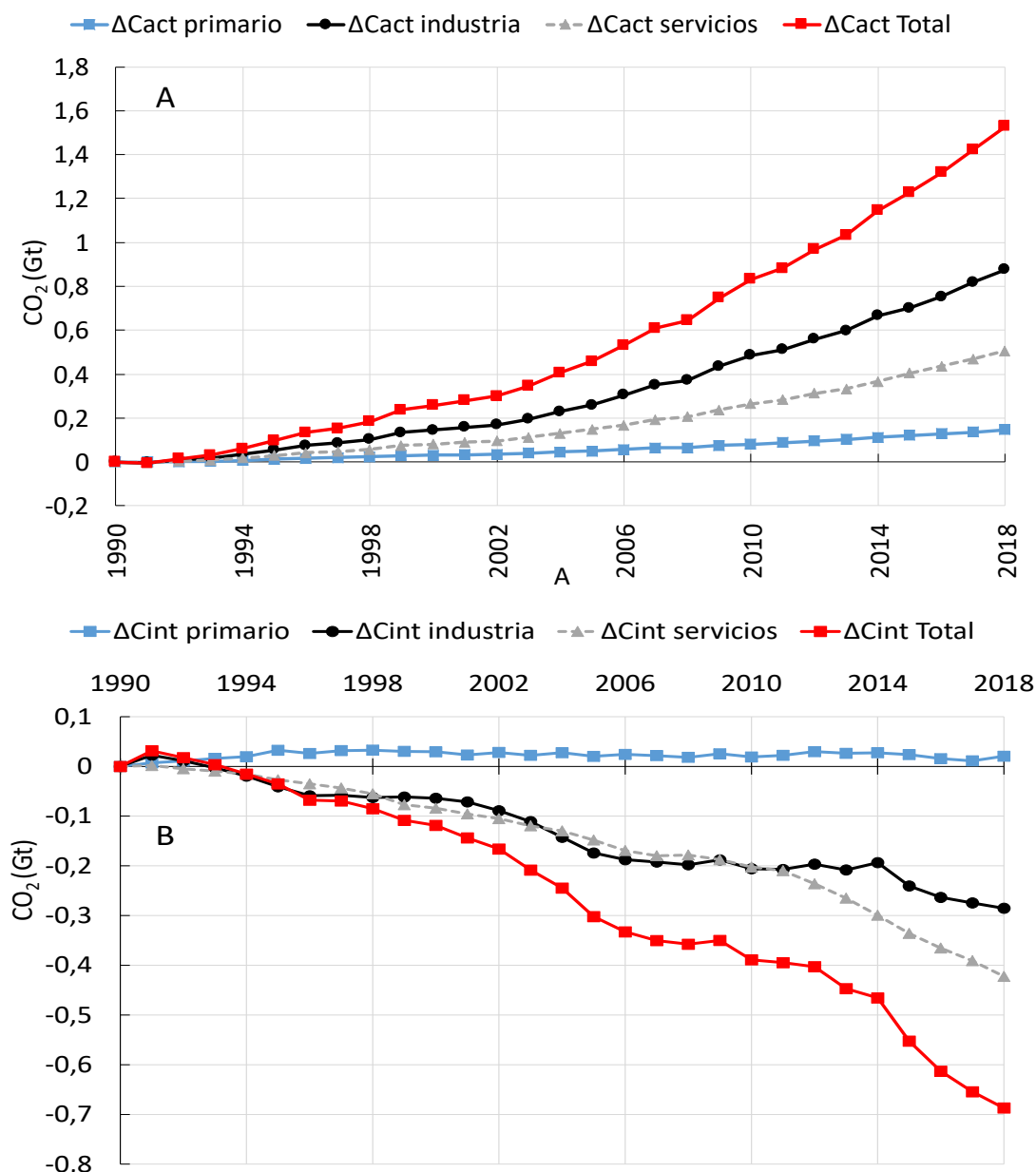


Figura 4.4.3: Evolución del término actividad económica (A) e intensidad energética (B) para el periodo 1990-2016 en India.

Esta figura muestra la evolución de los tres sectores estudiados que suponen la totalidad del PIB indio, siendo representada empleando los componentes LMDI (aditivo). En la figura

4.4 LDMI descomposición de los factores emisores de CO₂ en India

se puede comprobar cómo el sector primario tiene un aumento en la contribución, aunque pequeño, durante todo el período estudiado para ambos componentes. Su contribución a la intensidad energética también es ligeramente positiva, pero al comparar con los otros dos sectores, se aprecia que hay mucho margen de mejora en el sector primario. En cuanto al sector industrial, su contribución a la actividad aumenta rápidamente durante todo el período, presentando una notable aceleración a partir de 2005. Sin embargo, su término de intensidad energética comenzó a aumentar, para posteriormente disminuir hasta estabilizarse y, finalmente, registran una caída moderada. En cuanto al sector servicios, una vez más, su contribución a la actividad también aumenta de manera constante, aunque más lenta que la del sector industrial. Su aporte de intensidad energética muestra una disminución constante al principio, similar al sector industrial, pero desde el año 2000 en adelante, la reducción en las emisiones debida a este factor crece a un ritmo mucho más rápido.

4.5 Intensidad de emisiones en los 6 mayores emisores

La intensidad de las emisiones es un indicador para cuantificar el nivel de las emisiones de CO₂, de manera independiente al crecimiento económico. De hecho, este es el criterio utilizado en la NDC de China e India, como se puede apreciar en las respectivas NDC de la *Tabla 1.2*. No hay duda de que una NDC basada en la intensidad de las emisiones es, con mucho, más fácil de cumplir para un país en desarrollo que una basada en los niveles de emisión, dada la fuerte relación demostrada por este trabajo y la bibliografía existente, entre las emisiones y el crecimiento económico. De acuerdo con la *Figura 4.5.1*, hay dos conjuntos separados de países. Por un lado, EEUU, la UE y Japón, que presentan un valor relativamente pequeño, en constante disminución a lo largo de la serie estudiada y, por otro lado, China, India y Rusia, que presentan una evolución completamente distinta, con un valor inicial más elevado, pero con una disminución global más abrupta, aunque también presenta períodos específicos de aumento. Durante los últimos años, India, Rusia, Japón y la UE han mostrado cierta estabilización de sus niveles, mientras que EEUU y especialmente China presentan una clara tendencia a la baja. En todo caso destaca en el final de la serie histórica estudiada que, China, India y Rusia presentan un nivel de intensidad de emisiones de CO₂ más de cuatro veces superior al mostrado por la UE, Japón o los Estados Unidos.

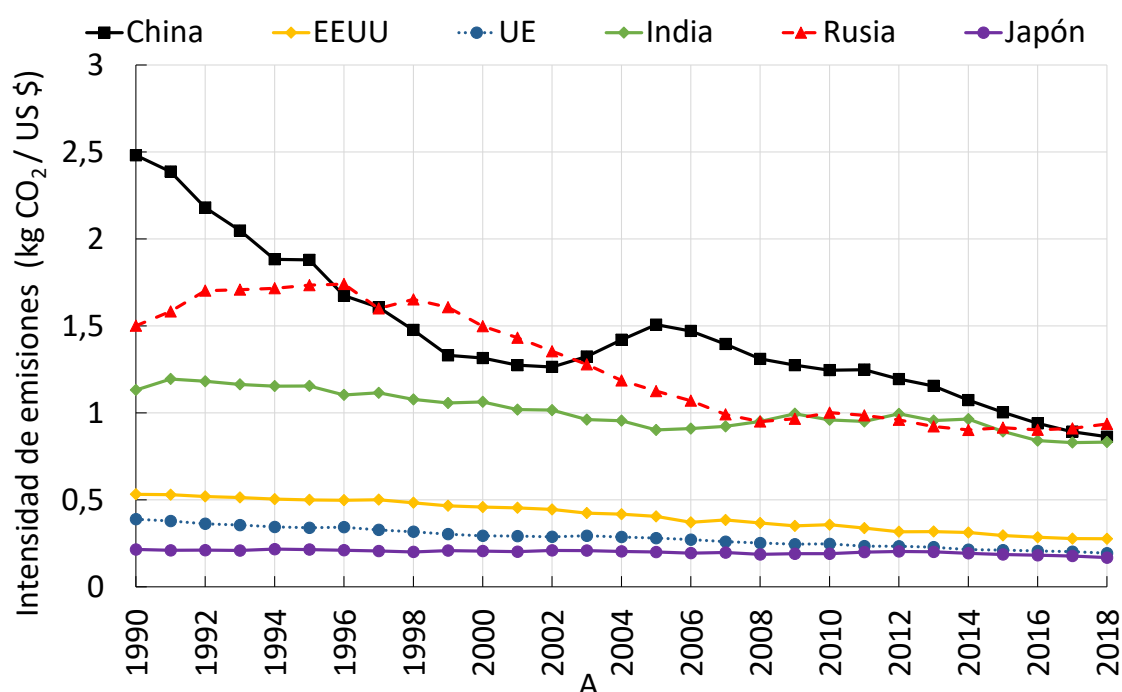


Figura 4.5.1: Evolución de la intensidad de emisiones en los 6 países con mayor emisión de GEI.

4.5 Intensidad de emisiones en los 6 mayores emisores

Profundizando en los valores mostrados por la *Figura 4.5.1*, encontramos al principio de la serie temporal una intensidad de emisión de 2,48 kgCO₂/US\$ (1990), mientras que las emisiones de Rusia le hacían alcanzar una intensidad de emisiones de 1,5 kgCO₂/US\$ (1990). En la parte baja de la intensidad de emisiones se situaba Japón, con una relación entre sus emisiones y PIB de 0,21 kgCO₂/US\$ (1990), seguida por los 0,49 y 0,53 kgCO₂/US\$ (1990) de la UE y EEUU respectivamente. En ese momento de serie histórica, las emisiones de India la hacían alcanzar una relación de 1,13 kgCO₂/US\$ (1990).

La intensidad de emisiones registrada en 2005 es un indicador clave para la consecución de los objetivos fijados por sus NDC en India y China, dado que ambas sociedades han fijado el citado año como referencia a la hora de marcar sus objetivos de reducción. Para el citado año, China disponía de una relación entre sus emisiones y PIB de 1,51 kgCO₂/US\$ (2005), mientras que India registraba 1,09 kgCO₂/US\$ (2005).

En el momento final de la serie histórica, la intensidad de emisiones en China se había visto reducida hasta los 0,86 kgCO₂/US\$ (2018), lo que significa una reducción del 42,7%, cercana a conseguir con la presente evolución la cuota fijada del 60% antes de 2030. Todo esto, con un incremento en la emisión total resultante del país del 122,4%, dado que China en el intervalo entre 2005-2018 ha pasado de emitir 3292 GtCO₂ a emitir 7322,7 GtCO₂. En ese mismo intervalo, las emisiones de India se han visto aumentadas en un 245%, pasando de emitir 501,2 GtCO₂ (2005), a emitir 1729,4 GtCO₂ (2018), con una reducción en el indicador intensidad de emisiones del 7,8%.

4.6 Intensidad de emisiones en India y su proyección hasta 2030

Como ya se ha mencionado, la intensidad de emisión es un concepto muy útil para caracterizar el desempeño relativo de una economía con respecto a las emisiones de CO₂, sobre todo, para aquellos países en desarrollo que no quieren renunciar a seguir incrementando su PIB. De hecho, la India ha establecido un objetivo voluntario de reducción de su intensidad de emisión del 33 – 35% en 2030, con respecto al valor en 2005 [9]. En la *Figura 4.6.1* se muestra la evolución de la intensidad de emisión y, además, el valor separado para cada uno de los tres sectores económicos estudiados. Lo primero que se muestra claramente es la reducción continua de la intensidad de las emisiones durante todo el período, que es compatible con la meta de reducción fijada.

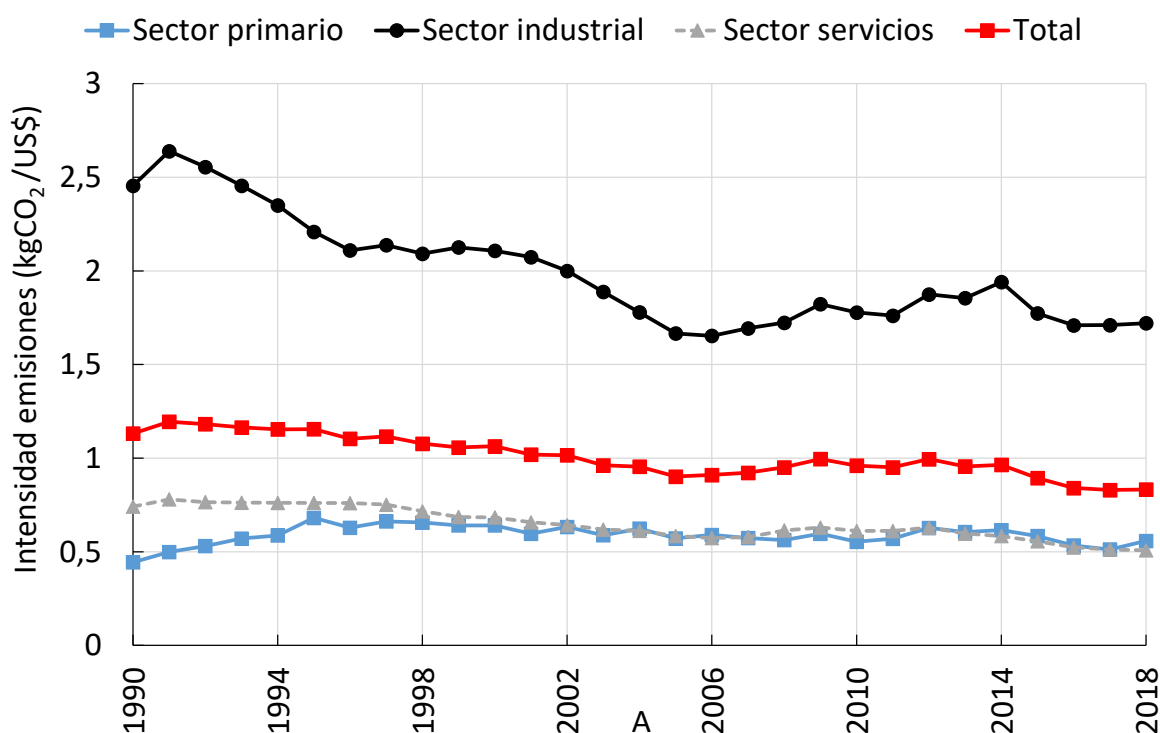


Figura 4.6.1: Evolución de la intensidad de emisiones en los distintos sectores de India.

Los tres sectores económicos presentan una disminución sostenida de similar proporción, aunque el sector primario mostró un cierto aumento al inicio del período, alcanzando un máximo histórico de 0,66 kgCO₂/US\$ (1997). El sector industrial se caracteriza por un valor que es aproximadamente 2,5 veces el de los sectores primario y de servicios. Por lo tanto, una vez más, se demuestra que el sector industrial es el principal contribuyente al valor de la intensidad de las emisiones, debido a su gran tamaño relativo y al gran empleo de carbón

4.6 Intensidad de emisiones en India

como fuente de energía, pese a la notable reducción mostrada por el mismo, que partía con una intensidad de emisiones de 2,45 kgCO₂/US\$ (1990), para alcanzar un máximo de 2,64 kgCO₂/US\$ (1991), para descender a lo largo de la serie histórica hasta alcanzar los 1,67 kgCO₂/US\$ (2018), nivel similar al mínimo registrado de 1,65 kgCO₂/US\$ (2006).

La evolución de la intensidad de las emisiones en India muestra que el país está acometiendo reformas para reducir las emisiones de CO₂ a través de la implementación de nuevas tecnologías que afrontan al problema desde dos perspectivas, por un lado, se facilita el empleo de fuentes energéticas más eficientes en cuanto a las emisiones, mediante el empleo de combustibles que aportan la misma energía que los reemplazados, pero con menor coeficiente de emisión y por otro lado, mediante la instalación de más fuentes de energía renovable. Sin embargo, todavía hay mucho espacio para la mejora, de hecho, la intensidad de emisión de la India sigue siendo cuatro veces la que registra Europa.

Para estimar el grado de cumplimiento de los compromisos indios en su NDC, se definieron en el apartado 3.8 *Escenarios* 4 escenarios para estimar la evolución de los principales factores generadores de la emisión de CO₂. Estos indicadores se han modelado hasta el año 2030, empleando para ello las ecuaciones (16-19), siendo preciso un modelado previo de las fuentes analizadas.

Tabla 4.1: Coeficientes estimados para la formulación del PIB empleando mínimos cuadrados en las funciones (11)-15).

Variable	Q ^a (a _i)	I (b _i)	TB (c _i)	E _{imp} (d _i)	C (f _i)
I ^a	-0,3184				
TB ^a	-2,3906				4,4064
Ca ^a	1,9516	0,9229			
E _{imp} ^b	1,486 * 10 ⁵		-3,821 * 10 ⁵		3,831 * 10 ⁶
RN ^b	-5,411 * 10 ⁶	-3,679 * 10 ⁷	7,339 * 10 ⁶	48,4768	

^a Q, I, TB, C están dados 10⁹ US\$

^b E_{imp} y RN están dados en ktoe.

4. RESULTADOS

La *Tabla 4.1* muestra el resultado resumido del valor de mejor ajuste de las variables para toda la serie temporal, obtenida tras la aplicación de mínimos cuadrados a las funciones a emplear para el modelado del comportamiento del sistema a futuro (ver 3.8 *Escenarios*). Como se puede apreciar el valor de a_5 , que ajusta el aporte de renovables, resulta negativo, debiéndose a la fuerte inversión inicial que se ha realizado en el campo de las energías renovables que, aun no habiendo alcanzado el tiempo de amortización, ofrecerá resultados a largo o medio plazo, con evidentes perjuicios a la formación inicial de capital en el momento de realizar la inversión. El resto de variables resultan de influencia positiva en la formación del PIB, con la excepción de las variables a_2 y a_1 . La variable a_2 modela la balanza comercial, debiéndose precisar que este indicador comercial para India es negativo, dado que en toda la serie histórica disponible (1960 – 2018), las importaciones del país han superado a las exportaciones, manteniéndose esta tendencia, que se puede encontrar en otros países como es el caso de EEUU.

Chien y Hu en [33] sugieren que la variable a_4 , Importación de energía, debe ser de influencia positiva en la formación del PIB, dado que esta importación de energía sugiere un sistema productivo en auge, que agota la producción interna de energía y precisa de fuentes externas para abastecer su demanda. En el estudio realizado, a_4 ha reafirmado el estudio anteriormente citado, dado que ha seguido esta tendencia, mostrando un coeficiente positivo para la formación del PIB.

Tal y como se precisó en el apartado 3.7 *Modelo de validación y verificación*, se ha realizado un test para comprobar la robustez del modelado realizado. La *Tabla 4.2* muestra los resultados de la realización del test de control, empleando para ello la función (21). La aplicación del método de control ha sido posible gracias a los datos conocidos en el periodo histórico y los valores resultado del modelo empleado para ese mismo periodo. En ella se aprecia el bajo nivel de error absoluto tras la aplicación a las funciones PIB y emisiones de CO₂. Este test ha sido realizado tomando como referencia los datos de ambas variables facilitados por el Banco Mundial, frente a la obtenida como resultado de la aplicación del método, ecuaciones (16) y (17).

Tabla 4.2: Resultados de la aplicación del método MAPE en las principales variables del sistema

Variable	MAPE (%)
PIB	0.797
CO ₂	2.772

4.6 Intensidad de emisiones en India

La *Figura 4.6.2* muestra el grado de ajuste alcanzado por el modelado realizado del PIB, en ella se pueden apreciar los datos de la serie histórica, así como a los valores calculados.

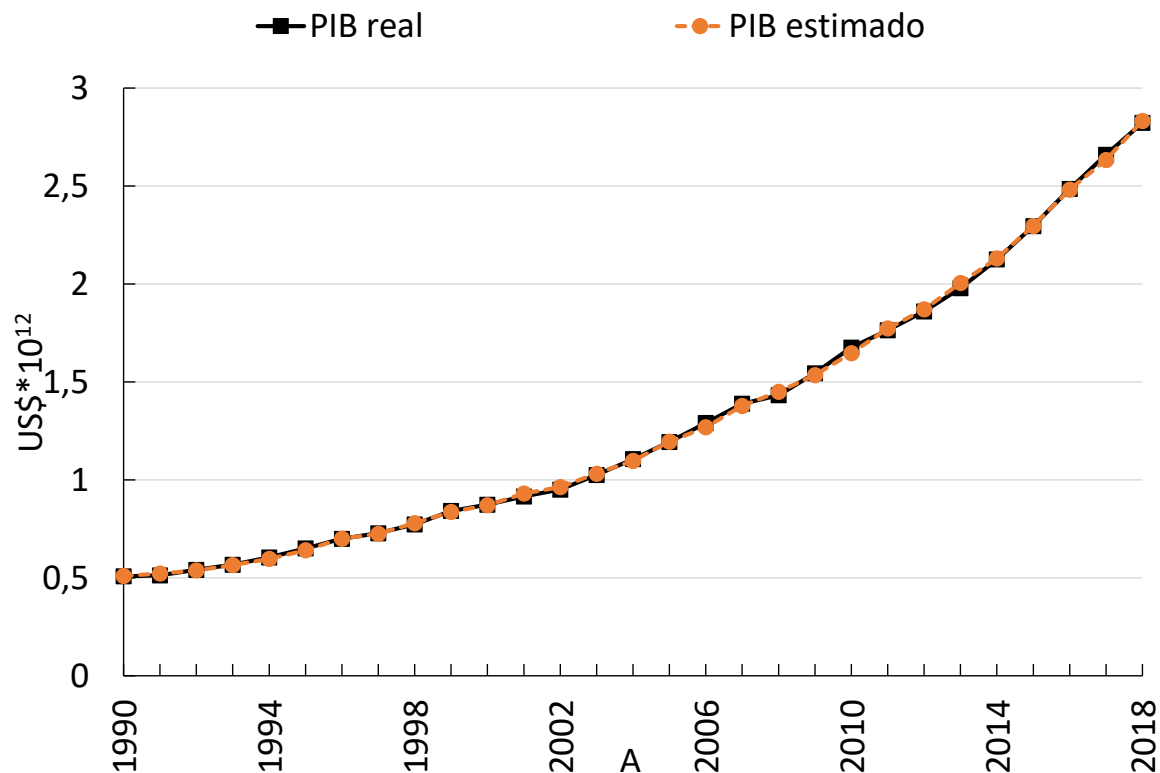


Figura 4.6.2: Evolución histórica del PIB comparada con los valores del modelo

Tras la aplicación del modelado y la extrapolación, han sido extraídos los datos de emisiones de CO_2 y PIB, para de esta manera, poder calcular la intensidad de emisiones de India hasta 2030. En el escenario 1, el modelo empleado ha extrapolado a un dato de PIB de $6,46 \cdot 10^{12}$ US\$ (2030), ligeramente por encima del valor de PIB pronosticado por el gobierno indio mediante su NDC en 2015. Este hecho permite apreciar el fuerte progreso económico que experimenta el país en los últimos años. La emisión muestra igualmente una fuerte evolución, alcanzando para el escenario base un valor anual de 4,67 Gt de CO_2 (2030), lo que supone un aumento del 713,6 % con respecto a 1990. El segundo de los escenarios muestra una disminución de estos valores, dado que está programado para alcanzar un PIB para 2030 de $6,31 \cdot 10^{12}$ US\$, lo que supone una disminución con respecto al escenario 1. Para el escenario 2 las emisiones pasarán a ser de 4,55 Gt de CO_2 (2030).

Los niveles de emisión descritos para los escenarios 1 y 2 están modelados para seguir la tendencia mostrada por el país en implantación de energías libres de emisiones, por tanto, no se han aplicado medidas extras a las ya mostradas por el comportamiento del sistema,

4. RESULTADOS

que ya muestra una evolución notable en la implantación de renovables. En ninguno de los citados escenarios se cumple el nivel de intensidad de emisiones comprometido mediante al NDC de India.

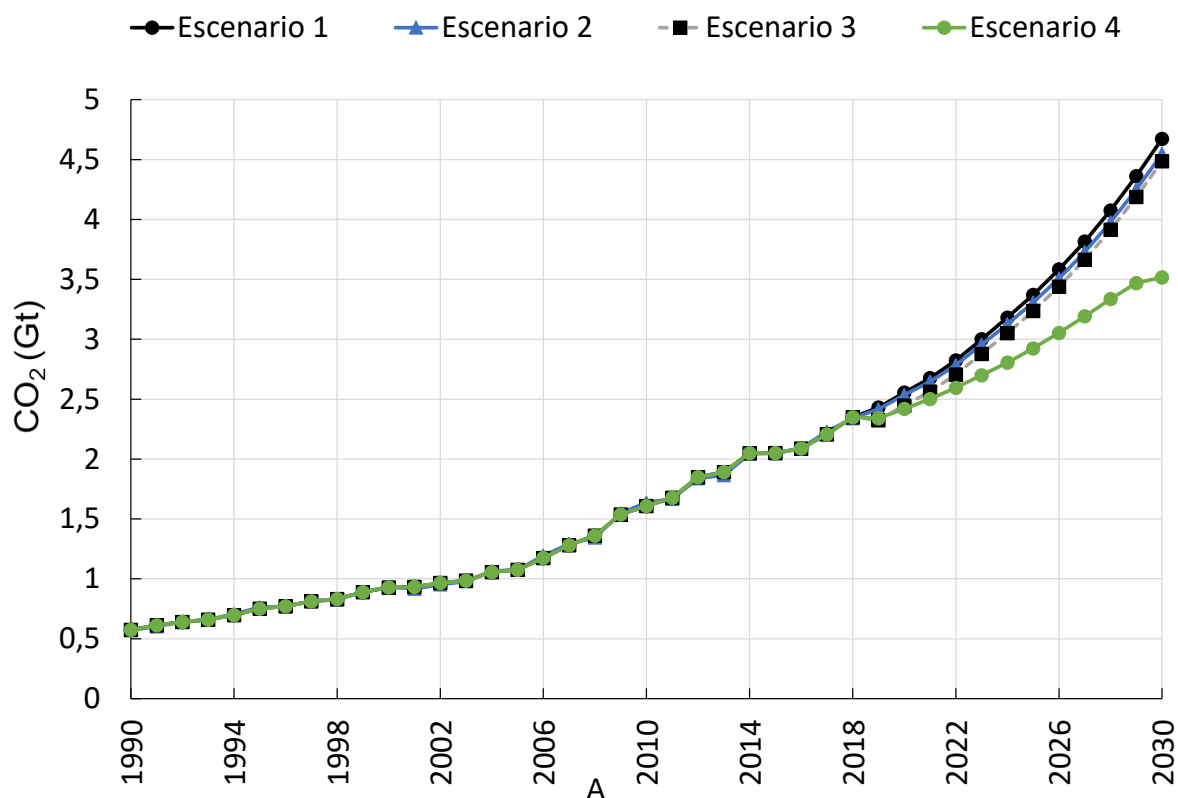


Figura 4.6.3: Evolución del indicador emisión de CO2 dentro de los cuatro escenarios propuestos.

La *Figura 4.6.3* muestra las emisiones resultantes tras la aplicación del modelo en los cuatro escenarios propuestos, mientras que la *Figura 4.6.4* muestra la evolución de la intensidad de emisiones resultante. En esta última se puede apreciar que ninguno de los tres primeros escenarios permite alcanzar los objetivos fijados en la NDC (marcados con líneas rojas horizontales), que consisten en reducir entre el 33-35% la intensidad de emisiones del año 2005, situada en 0,90 kgCO₂/US\$, lo que supone alcanzar una reducción inferior a 0,60-0,59 kgCO₂/US\$.

El escenario 3 implica un incremento del 10% anual a la cuota de energías libres de emisiones, aplicando una reducción de la misma magnitud en el empleo del carbón como combustible en plantas de generación eléctrica. Este modelado, como el conjunto de los realizados, se ha realizado ampliando las necesidades de energía eléctrica del país al ritmo tendencial mostrado en los últimos 6 años de la serie histórica, representando de este

4.6 Intensidad de emisiones en India

modo las necesidades energéticas futuras del país. Como se muestra en la *Figura 4.6.3*, las emisiones resultantes de la aplicación del escenario 3 suponen 4,49 Gt de CO₂ (2030), lo que representa una leve reducción de las emisiones.

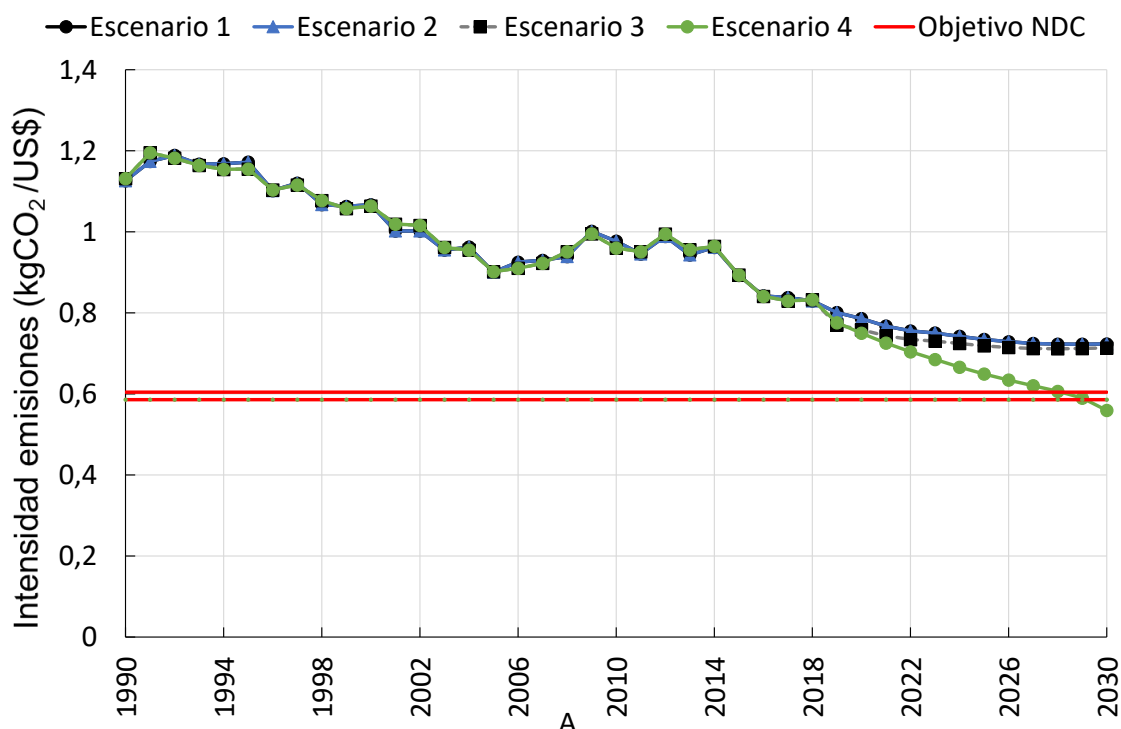


Figura 4.6.4: Evolución del indicador intensidad energética dentro de los cuatro escenarios propuestos.

La *Figura 4.6.4* constata que la única opción que da como resultado la consecución de la NDC india es la que modela el escenario 4, donde se aplica una reducción paulatina en las necesidades energéticas de plantas que generan electricidad por medio de carbón. Esta reducción ha sido calculada para dar respuesta a la introducción de la tecnología supercrítica, que permite alcanzar rendimientos mayores. La introducción de esta tecnología ha sido incorporada de manera escalonada, lo que permite modelar el cambio paulatino que el gobierno indio ha prometido aplicar a la totalidad de sus plantas. La emisión resultante en el escenario 4 se ha visto reducida con respecto al resto, mostrando un nivel de emisión de 3,52 Gt de CO₂ (2030), lo que supone una subida porcentual desde 2018 del 49,69 %. La intensidad de emisiones alcanzada permite el cumplimiento de la NDC india desde 2029, dado que para el citado año la intensidad de emisiones se verá reducida hasta alcanzar los 0,59 kgCO₂/US\$, alcanzando los 0,56 kgCO₂/US\$ (2030).

4.7 Análisis de causalidad de Granger

En esta sección, se analizará la causalidad de Granger entre pares de variables que aparecen en la identidad de Kaya, empleando para ello el test de Toda-Yamamoto. En concreto, las variables consideradas son las emisiones de CO₂, el PIB, la intensidad energética (INT), la energía aportada mediante fuentes libres de carbono (FLC), y la población (POB), que suponen diez pares de variables cuyas relaciones se estudian en ambos sentidos. Antes de realizar el análisis de causalidad de Granger, se debe analizar el orden de integración de las diferentes variables involucradas, empleando para ello las pruebas de Ng y Perron [114], empleado para probar en análisis de series de tiempo la hipótesis nula de que una serie es integrada de orden 1.

Tabla 4.3: Ng y Perron ^{a,b}.

	País	$\overline{M}Z_{\alpha}^{GLS}$	$\overline{M}Z_t^{GLS}$	$\overline{M}SB_{\alpha}^{GLS}$	ADF_{MAIC}^{GLS}
CO ₂	China	-12,201	-2,404	0,197	7,811
	EEUU	-27,058***	-3,657***	0,135***	3,491***
	UE	-3,637	-1,275	0,351	23,886
	India	-4,395	-1,480	0,336	20,710
	Rusia	-1,393	-0,674	0,485	47,345
	Japón	-6,460	-1,508	0,230	13,934
PIB	China	-60,947***	-5,412***	0,089***	1,983***
	EEUU	-4,483	-1,451	0,324	19,944
	UE	-3,142	-1,231	0,392	28,460
	India	-4,882	-1,433	0,294	17,928
	Rusia	-6,747	-1,832	0,271	13,508
	Japón	-9,069	-2,125	0,234	10,063
CFE	China	-2,561	-1,039	0,406	9,127
	EEUU	-4,947	-1,561	0,316	18,355
	UE	-4,519	-1,500	0,332	20,147
	India	-9,811	-2,173	0,222	9,463
	Rusia	-2,691	-1,017	0,378	29,245
	Japón	-3,896	-1,373	0,353	23,091
POB	China	-30,474***	-3,846***	0,127***	3,314***
	EEUU	-113,808***	-7,478***	0,066***	1,030***
	UE	-3,368	-1,209	0,359	25,319
	India	-49,686***	-4,881***	0,098***	2,333***
	Rusia	-0,016	-0,010	0,638	87,909
	Japón	-63,514***	-5,553***	0,087***	1,797***
INT	China	7,016	-1,862	0,265	13,001
	EEUU	4,281	-1,447	0,334	21,125
	UE	0,184	0,157	0,855	151,11
	India	6,073	-1,696	0,280	14,951
	Rusia	2,268	-0,998	0,440	36,979
	Japón	1,404	-0,621	0,442	41,907

^a *Nivel de significación del 10%, **Nivel de significación del 5%, *** Nivel de significación del 5%.

^b El MAIC es empleado para seleccionar el retraso de truncamiento autorregresivo, siendo k, como propone Perron and Ng [115]. Los valores críticos se tomarán de la tabla 1 de [114].

4.7 Análisis de causalidad de Granger

Los resultados del análisis se muestran en la *Tabla 4.3*, siendo posible, tras el test, concluir que la hipótesis nula de no estacionariedad no puede ser rechazada en la mayoría de los casos, independientemente del estadístico utilizado, excepto en el caso de la población. Por tanto, todas las series temporales son de tipo $I(1)$, excepto las emisiones de CO₂ en EEUU, PIB en China y población en China, India, Japón y EE. UU., que son de tipo $I(0)$.

El análisis de causalidad de Granger se realiza por separado para cada uno de los seis países considerados, y los resultados se presentan en la *Tabla 4.4* y la *Figura 4.7.1*, donde solo las conexiones estadísticamente significativas son mostradas, empleado para ello, el grosor de la línea de trazo como indicador del nivel de causalidad.

Tabla 4.4: Resultados de la aplicación del análisis de causalidad de Granger a las variables estudiadas.

α	β	CHINA		EEUU		UE		INDIA		RUSIA		JAPÓN	
		$\alpha \rightarrow \beta$	$\alpha \leftarrow \beta$	$\alpha \rightarrow \beta$	$\alpha \leftarrow \beta$	$\alpha \rightarrow \beta$	$\alpha \leftarrow \beta$	$\alpha \rightarrow \beta$	$\alpha \leftarrow \beta$	$\alpha \rightarrow \beta$	$\alpha \leftarrow \beta$	$\alpha \rightarrow \beta$	$\alpha \leftarrow \beta$
CO ₂	PIB	2,773	6,007	4,468	2,080	0,187	0,000	0,000	0,001	1,841	4.969*	5.190*	2,772
CO ₂	FLC	0,779	1,279	4,372	0,721	0,124	6.470***	0,089	1,756	0,193	0,020	1,286	3,046
CO ₂	POB	0,136	1,777	0,778	2,388	11.799**	1,090	0,000	3,177	1,234	1,926	0,297	0,761
CO ₂	INT	2,981	3,253	16.294***	3,455	1,456	0,323	0,633	0,043	6.223*	4,759	58.450***	0,856
PIB	FLC	0,297	4,740	0,279	1,423	0,004	2,066	0,070	0,485	0,012	0,098	6,688	2,991
PIB	POB	0,036	1,119	2,167	3,809	10.739**	0,658	0,000	0,067	0,770	4,709	6,162	2,496
PIB	INT	1,805	3,528	11.785**	5,874	3.267*	0,095	0,128	0,025	12.439**	6,034	9.296**	1,715
FLC	POB	0,097	12.527**	0,369	1,295	0,917	3,310	0,000	11,638	0,472	0,943	0,672	2,145
FLC	INT	0,920	0,917	2,854	0,252	0,351	0,025	5.331**	0,445	0,012	0,004	2,286	1,771
POB	INT	20.086**	0,118	6,479	0,400	1,036	5,300	1,379	0,000	9.080**	9.308**	3,479	5,329

El análisis de los resultados por países revela diferentes conexiones, por ejemplo, se muestra para el caso de China que el consumo de energía procedente de fuentes libres de carbono y la intensidad energética están estadísticamente vinculados a la población, sin embargo, en los trabajos de Yilanci et al, [116], se encuentra que la inversión extranjera directa provoca el consumo de energía libre de emisión en China. Así mismo, en [117] se encuentra una relación causal bidireccional entre la energía hidroeléctrica y el consumo de energía y el crecimiento económico para China.

4. RESULTADOS

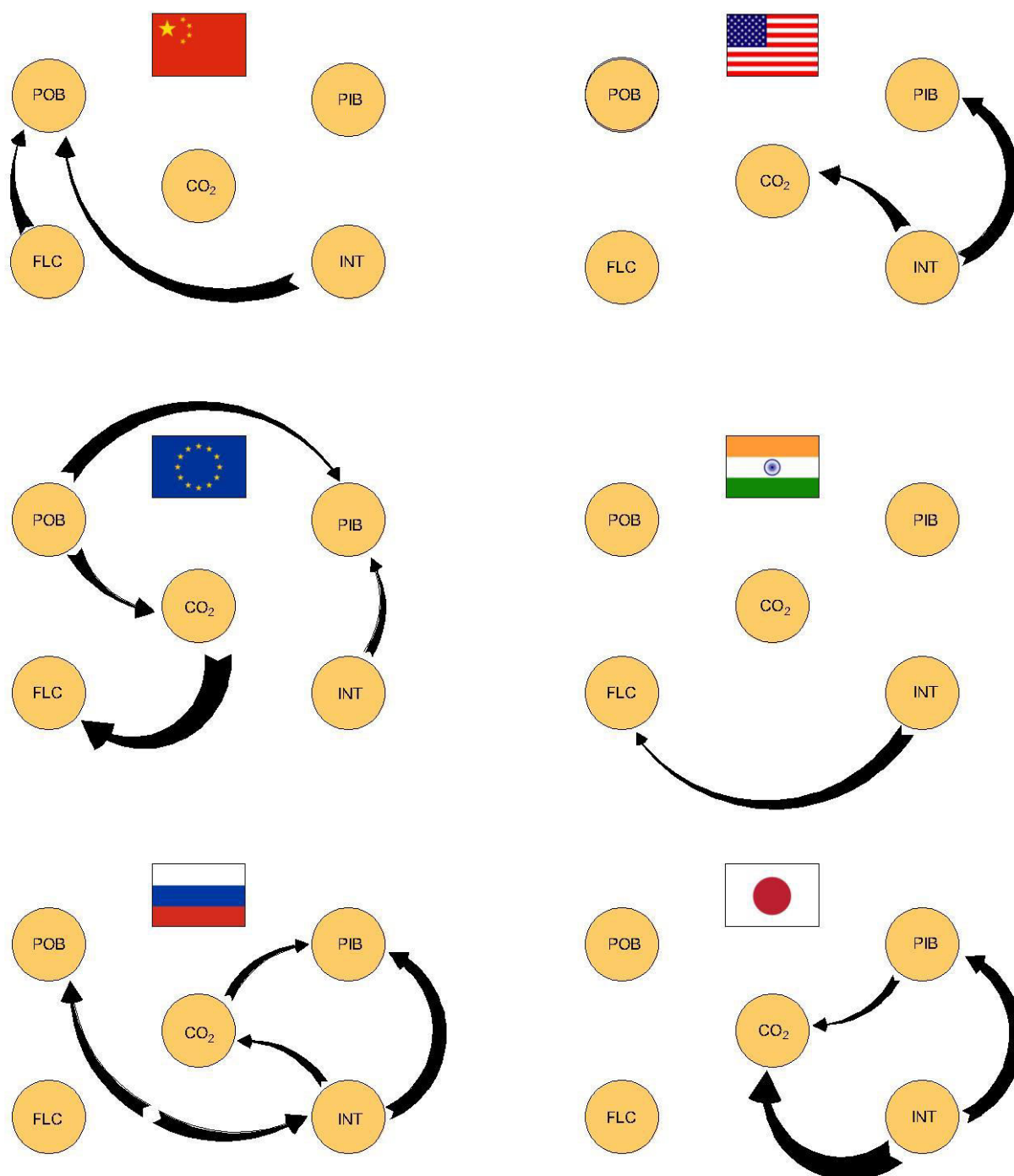


Figura 4.7.1: Relaciones de causalidad de Granger entre los indicadores analizados.

Estados Unidos muestra dos relaciones causales que parten de la intensidad energética, la primera con las emisiones de CO₂ y la segunda que la relaciona con el PIB. En [118], los autores analizan varios países desarrollados pertenecientes a la OCDE, sin mostrar para el caso de EEUU conexión entre las variables exploradas en este trabajo. En la UE, los

4.7 Análisis de causalidad de Granger

resultados de las pruebas de causalidad de Granger indican una relación causal entre las emisiones de CO₂ y la energía libre de carbono, otra entre la población y las emisiones de CO₂ y dos relaciones entre la intensidad energética y la población hacia el PIB. En [118], se estudian varios países de la UE y se establece una conexión bidireccional entre el consumo de energía y el PIB. En relación con la India, los resultados de la causalidad de Granger indican una causalidad de una sola vía que va desde la intensidad de la energía hasta el consumo de energía libre de carbono. El hallazgo relativo a Rusia revela que la intensidad energética tiene un vínculo causal con el PIB, el CO₂ y la población, siendo este último bidireccional. Igualmente, el PIB está relacionado con el CO₂. Finalmente, en Japón, los resultados muestran relaciones causales entre la intensidad energética y el PIB y las emisiones de CO₂, del mismo modo que ocurrió en Rusia, así como entre el PIB y las emisiones de CO₂.

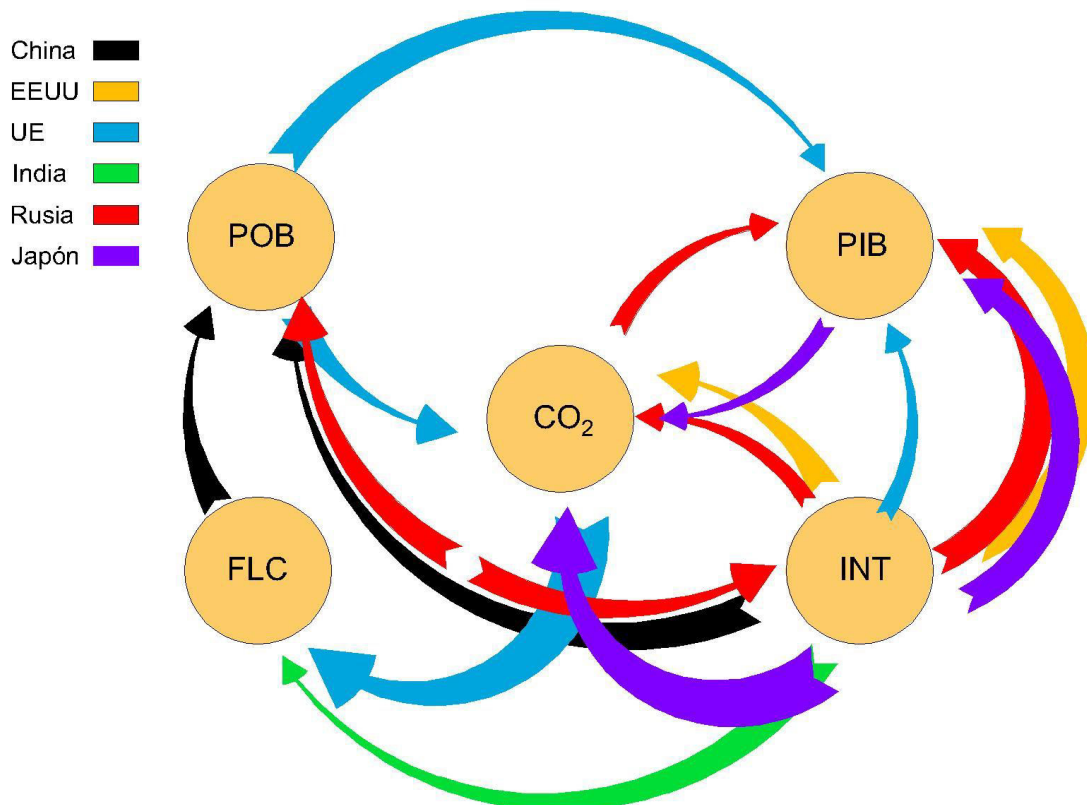


Figura 4.7.2: Relaciones de causalidad de Granger entre los indicadores analizados en el conjunto de sociedades.

Los resultados expuestos, pueden parecer un poco paradójicos porque no son el resultado obvio que se podría concluir a partir de la identidad de Kaya. Uno debería, sin embargo, tener en cuenta que la causalidad de Granger no significa una correlación entre las variables analizadas, sino que la primera variable se puede utilizar como un indicador significativo para pronosticar la segunda. Vale la pena mencionar que solo en un caso entre los

4. RESULTADOS

analizados, Japón, el PIB provoca una causalidad de Granger con las emisiones de CO₂, en tres casos, EEUU, Rusia y Japón, la intensidad energética causa emisiones de CO₂, y solo en un caso, la UE, la población causa emisiones de CO₂. Sin embargo, las emisiones de CO₂ causan consumo de energía libre de carbono en la UE. Vale la pena mencionar que, en cuatro países, EEUU, la UE, Rusia y Japón, la intensidad energética provoca una causalidad de Granger con el PIB. Estas conclusiones se extraen en la *Figura 4.7.2*, donde se trazan las causalidades de Granger estadísticamente significativas, si simultáneamente se muestran para los seis países.

En la figura se puede apreciar fácilmente que el PIB es la variable con más causas Granger, siendo apuntada por seis indicadores distintos, mientras que la intensidad energética es la que genera más causas de Granger, resultando diez relaciones entre los países analizados. Es particularmente interesante la causalidad de Granger entre la intensidad energética y PIB (cuatro de los seis países), lo que demuestra la importancia de la intensidad energética, no solo para moderar las emisiones de CO₂ como se ha mostrado en secciones anteriores, sino también para determinar el valor del PIB.

En general, los resultados están solo parcialmente de acuerdo con [119], donde se muestran una fuerte relación de causalidad bidireccional entre las emisiones de CO₂ y la energía no renovable. Además, otra relación bidireccional se presenta entre el sector servicios hacia las emisiones de CO₂ y entre el PIB y la energía no renovable. también es de interés comparar los hallazgos obtenidos con los presentados para un panel de 25 países africanos [120], donde se obtienen una causalidad a largo y corto plazo del PIB y las emisiones de carbono. Además, también se encuentra causalidad a corto plazo de las emisiones de carbono al PIB y, finalmente, se obtiene una causalidad a corto plazo entre el PIB y la electricidad renovable. En el grupo de países ASEAN más China se obtiene una relación de causalidad bidireccional entre industrialización y degradación ambiental [121], que está relacionado con la conexión causal presentada por este trabajo entre el PIB y las emisiones de CO₂, aunque en la presente tesis, esta conexión solo se observa para Rusia y Japón, pero no de forma bidireccional.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES 220

5.1 IMPLICACIONES POLÍTICAS. 224

"Una nación que no puede controlar sus fuentes de energía no puede controlar su futuro".
Barack Obama.

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se pormenorizarán las conclusiones que esta tesis permite obtener, después del análisis de los principales factores detrás de las emisiones de CO₂ en India. Como primera conclusión se puede afirmar que el mayor contribuyente al aumento de las emisiones es el término de actividad económica, sobre todo en el sector industrial, mientras que la principal reducción de emisiones de CO₂ proviene del término de la intensidad energética de la industria y, especialmente, del sector servicios, que es similar a la conclusión a la que llega Henriques y Kander [122]. En la *Figura 4.4.2* también se puede apreciar que la contribución del término mix energético es positiva, es decir, contribuye al aumento de las emisiones, mientras que se esperaría que tuviera un efecto negativo al aporte global, como ocurre en otros países estudiados por este trabajo. Por tanto, se puede afirmar que, el efecto del uso de energías renovables es aún pequeño, teniendo este sector mucho margen para la mejora. La magnitud obtenida por el indicador que modela el mix energético indica claramente que el aumento en la capacidad total de generación de energía a partir de fuentes renovables no ha sido suficiente para compensar las emisiones de energías no renovables, siendo estas las principales razones:

- El consumo total de energía ha crecido mucho más rápido que el uso de energías renovables. Este enorme crecimiento en el consumo de energía es una consecuencia del crecimiento económico y demográfico de la India, sumado a la creciente urbanización e industrialización del país, que ha incrementado exponencialmente la demanda de servicios municipales, tales como energía, vivienda, transporte, agua y tratamiento de residuos.
- La energía renovable de nueva instalación no garantiza el funcionamiento continuo de estas instalaciones. El tema crítico no es el de la capacidad de generación, sino la generación real, es decir, las horas de operación de las instalaciones de generación renovables, que son pocas en comparación con las horas de uso de las centrales eléctricas de combustibles fósiles, como sugiere Andrew, R., [123]. Por ejemplo, en 2017, el factor de operación de las centrales eléctricas basadas en energías renovables en India, en promedio, estuvo alrededor del 30%, en comparación con las plantas eléctricas de carbón, que operaron un 60%. Como consecuencia, habría sido más eficiente formular el NDC de la

5. CONCLUSIONES

India en términos de meta energética de “consumo final de energía” y no en términos de “capacidad de energía eléctrica instalada”.

En esta tesis se ha calculado la evolución temporal de las emisiones de CO₂ separadas por sectores económicos y tipo de combustible mediante el empleo de la identidad de Kaya. De los valores extraídos de la aplicación de la citada identidad se puede concluir que las emisiones del sector industrial son las más importantes, seguidas del sector servicios y, en menor proporción, del sector primario. En cuanto a los combustibles, el carbón es, con diferencia, el principal contribuyente a las emisiones de CO₂ en los tres sectores, presentando un aumento constante durante todo el período. Las emisiones de tipo de carbón están encabezadas por el de tipo bituminoso, que representa el 77,6 , 66,2 y 78,8% de las emisiones totales de tipo carbón en los sectores primario, industrial y servicios, respectivamente. Además, el análisis del impacto de las energías renovables en el mix energético de la India arroja un resultado llamativo, dado que, la participación de las renovables en el mix energético de los tres sectores ha disminuido constantemente, pasando de un 48% en 1990 a un 25,5% en 2018. Sin embargo, se han producido grandes avances en el uso de energías renovables, aumentando considerablemente la cantidad de energía renovable utilizada. La razón obvia es el gran aumento en el consumo total de energía demandada, que ha crecido mucho más rápido que el uso de energías renovables, además de la bajada en el empleo de fuentes tradicionales de energía, como la biomasa, en favor de electricidad o derivados del petróleo.

Los resultados clave de esta tesis provienen del análisis LMDI. El primer resultado es que la emisión de CO₂ creció enormemente durante el período estudiado, suponiendo un incremento con respecto a 1990 de 1723 MtCO₂. La razón principal de este crecimiento hay que buscarla en el rápido desarrollo económico experimentado por India, que se refleja en el aumento del PIB, que ha pasado en el periodo estudiado desde $0,51 * 10^{12}$ US\$ (1990) a los $2,82 * 10^{12}$ US\$ (2018), lo que ha supuesto una emisión derivada de esta subida de 1549 MtCO₂. El segundo factor con una contribución positiva es el término de población, que representa 530 MtCO₂. Por lo tanto, la población no es la principal fuente de aumento de las emisiones de CO₂, como se podría esperar en un país con una población que ha crecido en el periodo estudiado un 54,8%, lo que supone un incremento poblacional de $479,3 * 10^6$ habitantes. El tercer factor con contribución positiva es el término mix energético, que representa 329 MtCO₂. Aunque esta contribución parece pequeña en comparación a las anteriormente mencionadas, en la mayoría de los países estudiados por esta tesis es negativa, como los casos de la UE con un -752 MtCO₂, EEUU con un -518 MtCO₂ o Rusia con un -137 MtCO₂, lo que supone para estos países una reducción de la emisión total como consecuencia del cambio en los combustibles empleados, y el impacto de las energías libres de emisiones en el mix energético. En el caso de India, este impacto aún es pequeño y, de hecho, la participación de las energías renovables en la combinación energética ha disminuido continuamente durante el período estudiado. Finalmente, el factor con una contribución negativa es el término referido a la intensidad energética, que

ha venido cayendo rápidamente durante todo el período, incluso con cierta aceleración durante la última década. El último término estudiado, el relativo a la estructura económica, presenta una contribución casi inapreciable. En resumen, el principal factor que contribuye al crecimiento de las emisiones es el término de actividad, en particular, en el sector industrial. El factor principal que contribuye a la reducción de emisiones es el término de intensidad energética, en particular, en el sector servicios y en menor medida en el sector industrial.

De los datos obtenidos como resultado de la aplicación del análisis de causalidad de Granger, se puede concluir que las fuentes de energía libres de emisiones presentan una relación causal con la intensidad energética en India. Esta relación con la intensidad energética, que relaciona la energía empleada para generar el PIB, en cada sector productivo estudiado, es la única relación de causalidad de este tipo encontrada en los países analizados. En concreto, la intensidad energética está relacionada fuertemente con el PIB, presentando relación de causalidad en EEUU, Japón, Rusia y UE, sin representar esta relación una sorpresa, dado que la causalidad de Granger solo implica que el comportamiento de una variable puede emplearse para predecir la otra de forma fiable, estando la intensidad energética relacionada con el PIB, dado que tiene a este indicador como denominador. Son más sorprendentes los casos que relacionan la intensidad energética con las emisiones de CO₂, presentes en el mismo grupo de países a excepción de la UE, esto es, EEUU, Japón y Rusia, que relacionan una intensidad de emisiones, en descenso a lo largo de la serie temporal, en cada uno de los países, con una emisión resultante de CO₂, igualmente en descenso en cada uno de ellos. La única relación de causalidad que permite predecir el comportamiento del PIB mediante el empleo de la población se da en la UE, esta relación parece lógica al tratarse de una economía con fuerte participación del sector servicios, siendo igualmente lógica la relación de causalidad entre la población y el CO₂, dado que se ha demostrado que el principal factor que genera emisiones es el término de actividad económica. La única relación de causalidad manifestada entre el PIB y las emisiones de CO₂, se da en Japón, donde existe otra relación sobre las emisiones de CO₂ que parten desde la intensidad energética, siendo esta última relación de mayor orden que la primera.

Otra parte fundamental de los objetivos de la presente tesis es predecir el cumplimiento de los compromisos fijados por India mediante su NDC. Tal y como se expuso en el apartado *4.6 Intensidad de emisiones en India y su proyección hasta 2030*, serán precisas, a la vista de los datos, la implementación de la totalidad de las soluciones propuestas por India mediante su NDC, dado que se demuestra insuficiente la introducción de renovables al ritmo fijado, como única solución al problema, siendo la alternativa conjunta, esto es, la suma de la incorporación de renovables, con la introducción de una mayor eficiencia en la totalidad de las plantas de generación eléctrica mediante carbón, con la incorporación paulatina de la tecnología supercrítica, la única alternativa factible para alcanzar el fin

5. CONCLUSIONES

perseguido. Es preciso reflexionar en este punto que, la consecución de los objetivos marcados por India en su NDC pueda lograrse, dentro de un escenario similar al modelado por el escenario 4 pero, aun así, el país estará emitiendo 3,52 Gt de CO₂ (2030), lo que supone una subida porcentual desde 2018 del 49,69 %, lo que está lejos de cualquier mejora razonable en las emisiones del país. El único aspecto positivo del escenario de cumplimiento de la NDC, es que marca un camino que permite apreciar signos de estancamiento en las emisiones en los últimos años extrapolados, permitiendo aventurar la cercanía con la etapa de máximos de la curva de Kuznets medioambiental.

5.1 IMPLICACIONES POLÍTICAS.

India es ahora el cuarto mayor emisor de CO₂ del mundo, y podría convertirse en el futuro en el mayor, superando incluso a China, EEUU y la UE. Esta situación se dará a pesar de los grandes esfuerzos del país para mitigar las emisiones, porque confluyen una desmesurada población, con una de las economías que está creciendo más rápido en el mundo, necesitando, por tanto, una gran cantidad de energía para mantener sus tasas de crecimiento económico anual por encima del 7%. Teniendo en cuenta que el aumento del PIB per cápita parece ser un aspecto positivo en sí mismo, a pesar del aumento de las emisiones de CO₂, es necesario promover aquellos factores que puedan compensar el aumento natural de las emisiones debido al aumento de la riqueza. India está en una posición privilegiada para cumplir con su NDC, independientemente de su crecimiento económico, porque sus metas se definen en relación con el valor del PIB, despejando de esta manera del cumplimiento de los compromisos al factor que, como ya se ha expuesto, es el principal generador de emisiones. Un buen ejemplo es el valor objetivo para el cumplimiento de la NDC, definido por la intensidad de emisión para 2030 que se estableció en una reducción del 33 – 35% respecto al valor de 2005, lo que supone reducir este indicador por debajo de los 0,60-0,59 kgCO₂/US\$. La intensidad de emisiones estimada para 2030, calculada en esta tesis, es de aproximadamente 0,56 kgCO₂/US\$, lo que le permite alcanzar los niveles requeridos, previo cumplimiento de las medidas de eficiencia y de implantación de tecnologías libres de emisiones de carbono descritas en el escenario 4, que modela las principales medidas comprometidas por el gobierno indio en su NDC. Sin embargo, ninguno de los objetivos de la NDC está relacionado con la evolución del PIB, ni se refiere a ninguna reducción específica de emisiones. Este desacoplamiento de los objetivos climáticos del PIB hace casi inviable conseguir una reducción real de las emisiones de CO₂.

Para tal fin, la primera recomendación es implementar más restrictivas políticas que desalienten el uso del carbón, por ejemplo, a través de una política fiscal adecuada para inducir una contribución negativa del término mix energético. Hasta ahora, el gran aumento en el uso de energías renovables no ha podido compensar el crecimiento del consumo total de energía. Por tanto, es obligatorio cubrir las nuevas necesidades energéticas con energías libres de emisiones de carbono (incluida la nuclear) o, al menos, con una aportación creciente en gas natural (que tiene un factor de emisión mucho menor que el carbón), para conseguir una reducción real de las emisiones de CO₂.

Una segunda recomendación se refiere a la intensidad energética, que está estrechamente ligada a la tecnología utilizada para transformar la energía primaria en los diferentes sectores. Según los datos aportados por este estudio, la intensidad energética ha tenido un comportamiento muy adecuado durante el periodo estudiado contribuyendo negativamente a las emisiones de CO₂. Parece que esta tendencia es bastante natural en el

5. CONCLUSIONES

sistema económico indio, especialmente en los sectores de la industria y de servicio, pero no en el primario (ver *Figura 4.4.3*). Por lo tanto, vale la pena promover una transformación tecnológica en el sector primario que pueda contribuir efectivamente a una reducción más rápida de la contribución de la intensidad energética. En resumen, como se sugiere en [124], la promoción de tecnologías energéticamente eficientes es muy deseable.

Otra de las recomendaciones, es la de moderar el crecimiento de la población ya que, si bien su efecto no es tan grande como el término de actividad, su contribución representa más del 30,7% del incremento total durante el período 1990-2018, esperándose que a medida que el PIB per cápita suba, esta contribución se haga mayor.

En este sentido se formula la siguiente mejora, referida a la creciente demanda de vehículos que registra el país. Este sector, que crece de manera exponencial, es uno de los más grandes del mundo, haciendo pasar el consumo de diésel en el sector transportes, principal combustible en el país, desde los 13,05 Mtoe (1990) a los 60,4 Mtoe (2018), registrándose un incremento de similar proporción en la gasolina que se acerca al diésel con un consumo de 28,3 Mtoe (2018). La extrapolación de estos datos a 2030, permite apreciar una demanda de estos combustibles exclusiva del sector transportes de 95,6 y 88,9 Mtoe (2030) para el diésel y la gasolina, respectivamente. Este incremento, elevará notablemente las emisiones derivadas del sector transporte, sin contar este sector, con ninguna medida reguladora en la NDC de India. Por lo expuesto se hace necesaria la implantación de programas de electrificación del transporte, empleo de biocombustibles o la acción conjunta de ambas medidas, que mitigue la emisión total resultante, que será futuro problema del país.

El conjunto de soluciones aportadas sin duda reduciría las emisiones resultantes en India que, pese a todo, probablemente cumpla con las metas establecidas en su NDC para 2030. Sin embargo, para un avance más rápido en la dirección correcta, habría sido más eficiente formular los compromisos en su NDC en términos de reducción de emisiones netas, como lo ha hecho, un gran número de países entre los que se encuentran los estudiados por esta tesis, EEUU, la UE, Japón o Rusia. No obstante, India ha formulado sus objetivos en términos de intensidad de emisiones (emisiones/PIB) y la capacidad total de generación de energía libre de emisiones. Esta estrategia, como se ha explicado anteriormente, no garantiza una disminución de las emisiones, porque una política basada en el cumplimiento de una energía instalada en plantas renovables, se verá sin duda afectada, al no estar funcionando la mayor parte del tiempo, debido a la falta de viento, a la nocturnidad u otros factores derivados de la energía empleada. Es de suma importancia, por tanto, que la comunidad internacional apoye los esfuerzos de países en desarrollo como es el caso de India, para de esta manera combatir el Cambio Climático en dos aspectos principales. Por un lado, financiar proyectos de mitigación de emisiones de CO₂ que en la mayoría de los casos reportarán ingresos más importantes que si se invirtieran en países desarrollados y, por otro, transferir la tecnología más avanzada en materia de producción de energía libre de carbono. Si el grupo de países desarrollados no considera seriamente estos dos aspectos,

5.1 IMPLICACIONES POLÍTICAS

las NDC de los países en vías de desarrollo, como India, se convertirán en papel mojado y el objetivo de mantener la temperatura global por debajo de 1,5°C o tan solo 2°C, se convertirá en una pesadilla.

REFERENCIAS

- [1] M.-D. V., P. Zhai y H. Pörtner, «Global warming of 1.5°C,» Intergovernmental Panel on Climate Change., Geneva, 2019.
- [2] T. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia y V. Bex, «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group,» Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [3] K. K. Rigaud, A. de Sherbinin, B. Jones, J. Bergmann, V. Clement, K. Ober, J. Schewe, S. Adamo, B. McCusker, S. Heuser y A. Midgley, «Groundswell : Preparing for Internal Climate Migration,» World Bank Group, Washington, DC, 2018.
- [4] IPCC, «Resumen para Responsables de Políticas,» Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [5] B. Mundial, «Datos,» 2021. [En línea]. Available: <http://data.worldbank.org/>. [Último acceso: 15 1 2022].
- [6] IEA, «Japan 2021 Eneegy Policy Review,» International Energy Agency, Paris, 2021.
- [7] IEA, «United States 2019 review,» IEA Publications, Paris, 2019.
- [8] IEA, «IEA Data Services homepage,» International Energy Agency, 1 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/>. [Último acceso: 7 enero 2022].
- [9] I. Gobierno, «India's Intended Nationally Determined Contribution,» 2015.
- [10] K. Nicol, «Status of advanced ultra-supercritical pulverised coal technology,» *IEA Clean Coal Centre*, nº ISBN 978-92-9029-549-5, Diciembre 2013.
- [11] U. Nations, «NDC Registry,» [En línea]. Available: <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx>. [Último acceso: 4 Abril 2022].
- [12] C. Jason, N. Rauch y F. Ying, «The Plight of Green GDP in China,» *Consilience: The Journal of Sustainable Development*, nº 3, pp. 102-116, 2010.
- [13] G. Vitelli, «The Morphology of US five crisis after 1970,» *Economía UNAM*, vol. 8, nº 23, mayo 2011.
- [14] H. Mintzberg, «How productivity killed American Enterprise,» *Mintzberg*, 2007.
- [15] E.G. RUSSKOVA, I.V. MITROFANOVA, O.YU. VATYUKOVA, N.P. IVANOV, V.V. BATMANOVA «STRUCTURAL CHANGES IN THE GDP OF RUSSIA IN 1995-2015,» *Regional and Sectoral Economic Studies*, vol. 17, nº 1, 2017.
- [16] S. Sharil, K. Manpreet, S. Preeti y S. Sukhmani, «A Study of Relationship and Impact of Foreign Direct Investment on Economic Growth Rate of India,» *International Journal of Economics and Financial Issues*, nº ISSN: 2146-4138, 29 agosto 2020.

- [17] T. Gulzara, S. Huaping, H. Muhammad, K. Yusheng y A. N. Muhammad, «Trade liberalization, FDI inflows economic growth and environmental sustanaibility in Pakistan and India,» *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, vol. 2, nº 112, 8 agosto 2018.
- [18] world population review, «world population review,» [En línea]. Available: <https://worldpopulationreview.com/>. [Último acceso: 4 Abril 2022].
- [19] G. Peng, L. Song, E. JCarlton, J. Qingwu, W. Jianyong, W. Lei y J. V. Remais, «Urbanisation and health in China,» *The Lancet*, Vols. %1 de %2379, Issue 9818,, nº ISSN 0140-6736, pp. 843-852, 2012.
- [20] Y. Kaya., «Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios,» IPCC Energy and Industry Subgroup, Paris, 1990.
- [21] A. Robalino-López, A. Mena-Nieto, J. E. García-Ramos, «System dynamics modeling for renewable energy and CO2 emissions: A case study of Ecuador.,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 20, pp. 11-20, 2014.
- [22] M. Gene, Grossman y K. Alan B., «ENVIRONMENTAL IMPACTS OF A NORTH AMERICAN FREE TRADE AGREEMENT,» *NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH*, nº 3914, 1991.
- [23] N. Shafik y S. Bandyopadhyay, «Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence,» *World Bank Publications*, vol. 904, 1992.
- [24] D. I. Stern, «The rise and fall of the environmental Kuznets curve,» *Elsevier*, vol. 32, nº 8, pp. 1419-1439, 2004.
- [25] D. Soumyananda, «Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey,» *Ecological economics*, vol. 49, nº 4, pp. 431-455, 2004.
- [26] P.-O. Johansson y B. Kristrom, «On a clear day you might see an environmental Kuznets curve,» *Environmental and Resource Economics*, vol. 37, nº 1, pp. 77-90, 2007.
- [27] P. Emilio y S. Alfredo, «Inequality in CO2 emissions across countries and its relationship with income inequality: a distributive approach,» *Energy policy*, vol. 34, nº 14, pp. 1762-1772, 2006.
- [28] U. Soytaş y R. Sari, «Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets,» *Energy economics*, vol. 25, nº 1, pp. 33-37, 2003.
- [29] G. Altinay y E. Karagol, «Electricity consumption and economic growth: evidence from Turkey,» *Energy economics*, vol. 27, nº 6, pp. 849-856, 2005.
- [30] G. Sajal, «Electricity consumption and economic growth in India,» *Energy policy*, vol. 30, nº 2, pp. 125-129, 2002.
- [31] A. Robalino-López, A. Mena-Nieto, J. E. García-Ramos, A. Golpe, «Studying the relationship between economic growth, CO2 emissions, and the environmental Kuznets curve in

REFERENCIAS

- Venezuela (1980-2025),» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 602-614, 2015.
- [32] A. Robalino-López, A. Mena-Nieto, J. E. García-Ramos, A. Golpe «System dynamic modelling and the environmental Kuznets curve in Ecuador (1980-2025),» *Energy Policy*, vol. 67, pp. 923-931, 2014.
- [33] T. Chien y J.-L. Hu, «The dynamic links between CO2 emissions, economic growth and coal consumption in China and India,» *Energy*, vol. 35, pp. 3605-3615, 2007.
- [34] V. Andreoni, S. Galmarini, «Drivers in CO2 emissions variation: A decomposition analysis for 33 world countries,» *Energy*, vol. 103, pp. 27-37, 2016.
- [35] D. Shuang, Z. Ming y H. Wei, «Decomposing the decoupling of CO2 emission from economic growth in BRICS countries.,» *Nat. Hazards*, vol. 2, nº 84, pp. 1055-1073, 2016.
- [36] C. K.-H. y B.W. Ang, «Decomposition of Aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined divisia index method.,» *Energy Journal*, vol. 18, pp. 59-73, 1997.
- [37] B.W. Ang y F. Liu, «A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation,» *Energy*, vol. 26, pp. 537-547., 2001.
- [38] B.W. Ang, «The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide.,» *Energy Policy*, vol. 33, pp. 867-871, 2005.
- [39] S. Henriques y A. Kander, «The modest environmental relief resulting from the transition to a service economy,» *Eco. Econ.*, vol. 30, pp. 271-282, 2010.
- [40] W. Qiang y L. Rongrong, «Drivers for energy consumption: A comparative analysis of China and India,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, nº ISSN 1364-0321, pp. 954-962, 2016.
- [41] T. Kanitkar, R. Banerjee y T. Jayaraman, «Impact of economic structure on mitigation targets for developing countries.,» *Energy for Sustain. Development*, vol. 26, pp. 56-61, 2015.
- [42] F. Lima, N. M. Lopes, J. Cunha y A. Lucena, «. Driving forces for aggregate energy consumption: A cross-country approach Renew.,» *Sustain. Energy*, vol. 68, pp. 1033-1050, 2017.
- [43] S. Solaymani, «CO2 emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: The case of transport sector,» *Energy*, vol. 168, pp. 981-1001, 2019.
- [44] S. Voigt, C. E. De, M. Schymura y E. Verdolini, «Energy intensity developments in 40 major economies: Structural change or technology improvement?,» *Energy Econ*, vol. 41, pp. 47-62, 2014.
- [45] D. Kangyin, J. Hongdian, S. Renjin y D. Xiucheng, «Driving forces and mitigation potential of global CO2 emissions from 1980 through 2030: Evidence from countries with different income levels,» *Science of The Total Environment*, vol. 649, nº ISSN 0048-9697, p. 335–343, 2019.

- [46] K. Lean y H. Ehigiamusoe, «Effects of energy consumption, economic growth, and financial development on carbon emissions: evidence from heterogeneous income groups.,» *Environ. Sci. Pollut.*, vol. 26, p. 22611–22624, 2019.
- [47] U. E. Kizito, H. ., Hooi y R. Smyth, «The moderating role of energy consumption in the carbon emissions-income nexus in middle-income countries.,» *Applied Energy*, vol. 261, p. 114215, 2020.
- [48] M. González-Torres, L. Pérez-Lombard, J.F. Coronel, I.R. Maestre, «A cross-country review on energy efficiency drivers.,» *Applied Energy*, vol. 289, nº ISSN 0306-2619, p. 116681, 2021.
- [49] S. Borowiecki, H. Teives y J. Karol, «The drivers of long-run CO2 emissions in Europe, North America and Japan since 1800.,» *Energy Policy*, vol. 101, nº ISSN 0301-4215, p. 537–549, 2017.
- [50] H. Minjie, L. Ruzi, Y. Wanhai, L. Yaobin y L. Chien-Chiang, «Spatiotemporal evolution of decoupling and driving forces of CO2 emissions on ecomic growth along the Belt and Road,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, nº ISSN 0959-6526, p. 123272, 2020.
- [51] R. Inglesi-Lotz, «Decomposing the South African CO2 emissions within a BRICS countries context: Signalling potential energy rebound effects,» *Energy*, vol. 147, nº ISSN 03605442, pp. 648-654, 2018.
- [52] S. Li, J. Meng, H. Zheng, N. Zhang, J. Huo, Y. Li y D. Guan, «The driving forces behind the change in energy consumption in developing countries,» *Environmental Research Letters*, vol. 16(5), nº doi: 10.1088/1748-9326/abde05, p. 054002, 2021.
- [53] A. Fragkos y P. Marcucci, «Drivers of regional decarbonization through 2100: A multi-model decomposition analysis,» *Energy Economics*, nº ISSN 01409883, 2015.
- [54] S. Dai, M. Zhang y W. Huang, «Decomposing the decoupling of CO2 emission from economic growth in BRICS countries,» *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, vol. 84(2), p. 1055–1073, Noviembre 2016.
- [55] M. Kahia y B. J. Montassar, «The interdependence between CO2 emissions, economic growth, renewable and non-renewable energies, and service development: evidence from 65 countries.,» *Climatic Change*, vol. 162(2), p. :193–212, 2020.
- [56] D. Durusu-Ciftci, U. Soytaş y S. Nazlioglu, «Financial development and energy consumption in emerging markets: Smooth structural shifts and causal linkages,» *Energy Economics*, vol. 87, nº ISSN 0140-9883, p. 104729, 2020.
- [57] K. Baris, «A re-examination of causal relation between economic growth and energy consumption: Evidence from 91 countries,» *Economics Bulletin*, vol. 37(2), p. 790–805, 2017.
- [58] U. Aydin y P. M. Korkut, «Testing the EKC hypothesis for the top six hydropower energy-consuming countries: Evidence from Fourier Bootstrap ARDL procedure,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 264, nº ISSN 0959-6526, p. 121699, 2020.

REFERENCIAS

- [59] R. Md. Saifur, N. Abu Hanifa Md., S. Farihana, A. Mohamed, S. G. Chan, R. I. Che y P. Sajeda, «Efficient energy consumption in industrial sectors and its effect on environment: A comparative analysis between G8 and Southeast Asian emerging economies,» *Energy*, vol. 97, nº ISSN 0360-5442, pp. 82-89, 2016.
- [60] S. A., K. Sanjay, A. K. y D. Mousumi, «Estimating the causal relationship between electricity consumption and industrial output: ARDL bounds and Toda-Yamamoto approaches for ten late industrialized countries,» *Heliyon*, vol. 5(6), nº ISSN 2405-8440, p. e01904, 2019.
- [61] Y. Veli, O. Onder y S. G. Muhammed, «The asymmetric effects of foreign direct investment on clean energy consumption in BRICS countries: A recently introduced hidden cointegration test,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, nº ISSN 0959-6526, p. 117786, 2019.
- [62] E. Aslan y A. Yildirim, «Energy consumption and economic growth nexus for 17 highly developed oecd countries: Further evidence based on bootstrap-corrected causality tests,» *Energy Policy*, vol. 51, nº ISSN 0301-4215, p. 985–993, 2012.
- [63] M. Asif y T. Muneer, «Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies,» *Science Direct*, vol. 11, p. 1388–1413, 2005.
- [64] Chimate Data Org, «Chimate Data Org,» Chimate Data Org, 19 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/>. [Último acceso: 19 Febrero 2022].
- [65] EIA, «U.S Energy Information Administration,» Gobierno de EEUU, 19 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/coal-and-the-environment.php>. [Último acceso: 19 Febrero 2022].
- [66] EPA, «Global Greenhouse Gas Emissions Data,» United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 2021.
- [67] D.G. Pugh, T. O'Doherty, A.J. Griffiths, P.J. Bowen, A.P. Crayford, R. Marsh, «Sensitivity to change in laminar burning velocity and Markstein length resulting from variable hydrogen fraction in blast furnace gas for changing ambient conditions,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, nº 8, pp. 3459-3470, 2013.
- [68] B. Milorad y M. Panos, «Energy saving does not yield CO2 emissions reductions: the case of waste fuel use in a steel mill,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, nº 11, pp. 963-975, 2000.
- [69] IEEJ, «Present State and Outlook of China's Coal Industry,» IEEJ, 2007.
- [70] A. Murthy y K. Narasimha, «LPG as a cookinf fuel option for India,» *Energy for Sustainable Development*, vol. VIII, nº 3, pp. 91-106, 2004.
- [71] M. Dhruv, B. Avdesh, P. Aditi, O. Ashish y R. Divya, «Consumer Buying Behaviour of Cars in India - A Survey,» de *International Conference on New Frontiers in Engineering, Science & Technology*, New Delhi, 2018.
- [72] naturalgas.org, «naturalgas.org,» 2014. [En línea]. Available: <http://naturalgas.org/overview/>. [Último acceso: 5 3 2022].

- [73] Statista, «statista,» statista, 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1288313/principales-paises-suministradores-de-gas-natural-a-la-union-europea/>. [Último acceso: 5 3 2022].
- [74] Directorate General of Hydrocarbons, «Petroleum Exploration and Production Activities,» Government of India, Dheli, 2007.
- [75] A. S. Anil Jain, «Natural Gas in India: An Analysis of Policy,» Oxford University Press, 2011.
- [76] I. Wind, «IEA Wind TCP Annual Report 2020,» International Energy Agency, 2020.
- [77] IRENA, «Renewable Capacity Statistics 2020,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- [78] IEA, « Renewables 2021,» IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>, 2021.
- [79] IEA, «IEA (2019), Offshore Wind Outlook,» IEA, Paris, 2019.
- [80] P. Bojek, «IEA (2021), Solar PV,» IEA, Paris, 2021.
- [81] IHA, «Advancing sustainable hydropower, Annual Report 2019-2020,» International hydropower association, London, 2020.
- [82] IHA, «hydropower Status Report,» IHA, London, 2019.
- [83] J. R. Centre, «Hydropower technology development report,» European Commission's science and knowledge service, Luxembourg, 2019.
- [84] IAEA, «Nuclear Power Reactors in the World,» International Atomic Energy Agency, Vienna, 2019.
- [85] IEA, «European Union 2020 Energy Policy Review,» International Energy Agency, Paris, 2020.
- [86] IEA, «Germany 2020,» International Energy Agency , Paris, 2020.
- [87] T. C. P. Bioenergy, «Implementation of bioenergy in China,» IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme (TCP), 2021.
- [88] S. E. Fajardo-Muñoz y G. J. Páez-Fajardo, «Fuel Oil heating time simulation to determine optimal pumping viscosity,» *Ingenius*, Vols. %1 de %2ISSN: 1390-650X, nº 16, pp. 43-50, 2016.
- [89] S. O. Sondès Kahouli, «Regional energy poverty reevaluated: A direct measurement approach applied to France and Japan,,» *Energy Economics*, vol. 102, nº ISSN 0140-9883, pp. 105491,, 2021.
- [90] L. L. Nicholas, P. Shonali, P. Pallav, N. Yu, N. B. Michael, C. Colin y S. Kirk R, «Kerosene subsidies for household lighting in India: what are the impacts?,» *Environmental Research*, vol. 11, nº 4, p. 044014, 2016.

REFERENCIAS

- [91] P. Shinoj, S. Raju, R. Chand, P. Kumar y S. Msangi, «Biofuels in India: Future Challenges,» *Policy Brief*, nº 11305, 2011.
- [92] A. D., W. Alison y G. Rachel, «The status and prospects of renewable energy for combating global warming,» *Energy Economics*, vol. 33, p. 584–593, 2011.
- [93] Y. Kaya y K. Yokobori, «Environment, Energy, and Economy: strategies for sustainability,» de *Conference on Global Environment, Energy, and Economic Development*, Tokyo, 1993.
- [94] T. B. Dalia Štreimikienė, «Kaya identity for analysis of the main drivers of GHG emissions and feasibility to implement EU “20–20–20” targets in the Baltic States,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, nº ISSN 1364-0321, pp. 1108-1113, 2016.
- [95] B. Ang, «LMDI decomposition approach: A guide for implementation,» *Energy Policy*, vol. 86, nº ISSN 0301-4215, p. 233 – 238, 2015.
- [96] C. Granger, «Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods,» *Econometrica*, vol. 37, nº 3, pp. 424-438, 1968.
- [97] H. Y. Yamamoto y T. Toda, «Statistical inference in vector autoregressions with possibly integrated processes,» *Journal of Econometrics*, vol. 66, nº 1, p. 225–250, 1995.
- [98] S. Juselius y K. Johansen, «Maximum likelihood estimation and inference on cointegration with applications to the demand for money,» *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, vol. 52, nº 2, p. 169–210, 1990.
- [99] Hector O. Zapata, Alicia N. Rambaldi, «Monte Carlo Evidence on Cointegration and Causation,» *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, vol. 59, nº 2, pp. 285-298, 1997.
- [100] G. Kim y I.-M. Maddala, «Unit Roots, Cointegration, and Structural Change,» *Cambridge University Press*, 1998.
- [101] H. P. M., S. Yongcheol y S. Richard J., «Bounds testing approaches to the analysis of level relationships,» *Journal of Applied Econometrics*, vol. 16, nº 3, pp. 289-326, 2001.
- [102] J. A. Mirza y S. Clarke, «A comparison of some common methods for detecting Granger noncausality,» *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 76, nº 3, pp. 207-231, 2006.
- [103] R. J. Hodrick y E. C. Prescott, «Postwar US business cycles: an empirical investigation,» *Journal of Money, credit, and Banking*, pp. 1-16, 1997.
- [104] H. Rob J. y K. Anne B., «Another look at measures of forecast accuracy,» *International Journal of Forecasting*, nº ISSN 0169-2070, pp. 679-688, 2006.
- [105] S. T. Henriques y K. J. Borowiecki, «The drivers of long-run CO2 emissions in Europe, North America and Japan since 1800,» *Energy Policy*, vol. 101, pp. 537-549, 2017.
- [106] I.-L. Roula, «Decomposing the South African CO2 emissions within a BRICS countries context: Signalling potential energy rebound effects,» *Energy*, vol. 147, pp. 648-654, 2018.

- [107] L. Shuping, M. Jing, Z. Heran, Z. Ning, H. Jingwen y L. Yuan, «The driving forces behind the change in energy consumption in developing countries,» *Environmental Research*, vol. 16, nº 5, 2021.
- [108] J. Dela-Vega, J. Gonzaga, L. L. Gan y N. Lopez, «Decomposition analysis of Japan's CO2 emissions,» *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1109, nº 1, 2021.
- [109] Y. Funabashi, B. I. Kushner, Y. Funabashi y B. Kushner, «Examining Japan's lost decades,» *Routledge: Taylor and Francis group*, 2016.
- [110] S. Paul y N. R. Bhattacharya, «CO2 emission from energy use in India: A decomposition analysis,» *Energy Policy*, vol. 32, pp. 585-593, 2004.
- [111] Y. Yeo, D. Shim, J.-D. Lee y J. Altmann, «Driving Forces of CO2 Emissions in Emerging Countries: LMDI Decomposition Analysis on China and India's Residential Sector,» *Sustainability*, vol. 7, nº 12, pp. 16108-16129, 2015.
- [112] B.W. Ang, «The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide.,» *Energy Polity*, vol. 33, nº ISSN 0301-4215, pp. 867-871, 2005.
- [113] M. Ma, X. Ma, W. Cai y W. Cai, «Carbon-dioxide mitigation in the residential building sector: A household scale-based assessment.,» *Energy Convers. Managemet.*, vol. 198, nº ISSN 0196-8904, 2019.
- [114] P. Perron y N. Serena, «Lag length selection and the construction of unit root tests with good size and power,» *Econometrica*, vol. 69, pp. 1519-1554, 2001.
- [115] P. Perron y N. Serena, «Useful modifications to some unit root tests with dependent errors and their local asymptotic properties,» *Rev Econom Stud*, vol. 63, nº 3, pp. 435-463, 1996.
- [116] V. Yilanci, O. Ozgur y M. S. Gorus, «The asymmetric effects of foreign direct investment on clean energy consumption in BRICS countries: A recently introduced hidden cointegration test,» *J Cleaner Prod*, vol. 237, nº ISSN 0959-6526, p. 117786, 2019.
- [117] K. P. Ugur y A. Mucahit, «Testing the EKC hypothesis for the top six hydropower energy-consuming countries: Evidence from Fourier Bootstrap ARDL procedure,,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 264, nº ISSN 0959-6526, p. 121699, 2020.
- [118] Y. Ertugrul y A. Alper, «Energy consumption and economic growth nexus for 17 highly developed OECD countries: Further evidence based on bootstrap-corrected causality tests,» *Energy Policy*, vol. 51, nº ISSN 0301-4215, pp. 985-993, 2012.
- [119] M. Ben Jebli y M. Kahia, «The interdependence between CO2 emissions, economic growth, renewable and non-renewable energies, and service development: evidence from 65 countries,» *Clim Change*, vol. 162, nº 2, pp. 193-212, 2020.
- [120] K. Ehigiamusoe, «A disaggregated approach to analyzing the effect of electricity on carbon emissions: Evidence from African countries,» *Energy*, vol. 6, pp. 1286-1296, 2020.

REFERENCIAS

- [121] E. K. Uyi, «The drivers of environmental degradation in ASEAN+China: do financial development and urbanization have any moderating effect?,» *Singapore Econ Rev*, nº 2050024, 2020.
- [122] K. A. Henriques S.T., «The modest environmental relief resulting from the transition to a service economy,» *Eco. Econ*, vol. 30, pp. 271-282, 2010.
- [123] R. Andrew, «Why Indias CO2 emissions grew strongly in 2017,» Carbon brief, 28 marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-indias-co2-emissions-grew-strongly-in-2017>. [Último acceso: 18 1 2022].
- [124] Q. Wang y R. Li, «Drivers for energy consumption: A comparative analysis of China and India,» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 954-962, 2016.
- [125] EPA, «Overview of Greenhouse Gases,» 2018.
- [126] WMO, «The state of the global climate in 2018,» World Meteorological Organization, Geneva, 2019.
- [127] 1. IEA, «CO2 Emissions From Fuel Combustion, Overview, 2018,» Agency International Energy, 2018.
- [128] WEF, «The number of cars worldwide is set to double by 2040,» World Economic Forum, 2016.
- [129] WEC, «Global Transport Scenarios 2050,» World Energy Council, 2012.
- [130] IEA, «Oil Market Report,» International Energy Agency , 2018.
- [131] S. Kuznets, «Economic Growth and Income Inequality,» *The American Economic Review*, vol. 45, nº 1, pp. 1-28, 1955.
- [132] Hyndman R, Koehler A, «Another look at measures of forecast accuracy,» *J Forecast*, pp. 22: 679-88, 2006.
- [133] S.-L. Ho, X. Min y N. G. Thong, «A comparative study of neural network and Box-Jenkins ARIMA modeling in time series prediction,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 42, nº 2-4, pp. 371-375, 2002.
- [134] A. Shadab, S. S. y A. S., «Box–Jenkins multiplicative ARIMA modeling for prediction of solar radiation: a case study,» *International Journal of Energy and Water Resources*, vol. 3, nº 4, pp. 305-318, 2019.
- [135] D. Kangyin, J. Hongdian, S. Renjin y D. Xiucheng, «Driving forces and mitigation potential of global CO2 emissions from 1980 through 2030: Evidence from countries with different income levels,» *Sci. of the Total Environ*, vol. 649, nº 335, 2019.

ANEXOS

Artículos publicados

ANEXOS: ARTÍCULOS PUBLICADOS

Los artículos que forman parte del apartado Anexos, debido a restricciones relativas a derechos de autor, han sido retirados de la tesis. En sustitución de los artículos ofrecemos la siguiente información: referencia bibliográfica, enlace a la revista y resumen.

- Ortega-Ruiz, G., Mena-Nieto, A., Golpe, A. A., & García-Ramos, J. E. (2022). CO2 emissions and causal relationships in the six largest world emitters. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 162, p. 112435). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112435>

Enlace al texto completo: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112435>

Resumen:

This paper aims to analyze and compare the driving forces of the carbon dioxide emissions of the six highest emitters of the world, namely, China, the United States of America, the European Union, India, Russia, and Japan, which are responsible for more than the 67% of the emissions, during the period 1990–2018. The analysis is based on an enlarged Kaya-LMDI decomposition, considering five driving forces and a Granger causality study. Both techniques allow us to disentangle the relationship among the different driving forces and how they change from country to country.

The main conclusion from the Kaya-LMDI analysis is that economic growth has been the main driving force that increases CO2 emissions, and to a much lesser extent, the increase in population in most of the six analyzed economies. On the other hand, energy intensity is the main factor for reducing CO2 emissions. Surprisingly enough, the end-use fuel-mix term seldom contributes to the decrease of the emissions, which proves that the use of renewable energy should still be actively promoted. It is worth highlighting the different behavior observed between the four developed countries and the two most populous developing ones, China and India.

The Granger-causality analysis suggests that energy intensity Granger causes GDP in the developed countries, energy intensity also Granger causes CO2 emissions in half of the countries and, GDP Granger causes CO2 emissions only in one case, Japan.

- Ortega-Ruiz, G., Mena-Nieto, A., & García-Ramos, J. E. (2020). Is India on the right pathway to reduce CO2 emissions? Decomposing an enlarged Kaya identity using the LMDI method for the period 1990–2016. In *Science of The Total Environment* (Vol. 737, p. 139638). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139638>

Enlace al texto completo: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139638>

Resumen:

Nowadays, India is the third-largest CO₂ emitter and energy consumer in the world, and, it is soon expected to surpass China as the most populated country. Therefore, it is of great interest to analyse how India is developing its energy transition to a lower-carbon economy. This work analyses the evolution of the main driving forces of CO₂ emissions in India during the period 1990–2016 through the use of an enlarged version of the Kaya identity, which establishes a link between CO₂ emissions, types of energy sources (16), size of the economic sectors (3) and value of the Gross Domestic Product. India's CO₂ emissions increased by 276% in the period under study, due to the rapid economic growth of India, which has been the dominating driving force contributing to the increase in CO₂ emissions by 241%, while the energy intensity has been the main one reducing them by approximately –47%. So far, the use of coal has supported the rapid economic growth and the contribution of renewable energy, although significant, is still short compared to the total amount of energy employed. Remarkably, the estimated value of the emission intensity for 2020 supposes a 26% reduction concerning the value in 2005. According to this result, India is on the right pathway to fulfil its Nationally Determined Contribution but not to reduce its net CO₂ emissions.