

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Titulación: **GRADUADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

Itinerario: **Tecnologías Energéticas**

PROYECTO FIN DE GRADO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL Y DEL MEDIO
AMBIENTE

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO A UNA FLOTA DE
AUTOBUSES PÚBLICOS URBANOS: LA CIUDAD DE MADRID COMO CASO
DE ESTUDIO

INÉS PEÑA MAJOR

JULIO 2018

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Titulación: **GRADUADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

Itinerario: **Tecnologías Energéticas**

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO A UNA FLOTA DE
AUTOBUSES PÚBLICOS URBANOS: LA CIUDAD DE MADRID COMO CASO
DE ESTUDIO

Realizado por

Inés Peña Major

Dirigido por:

Javier Pérez Rodríguez

Agradecimientos

Lo primero quiero agradecer a mi tutor toda la dedicación y tiempo que ha puesto en el trabajo, así como la ayuda que siempre he recibido y todo lo que me ha enseñado.

También me gustaría agradecer a mis padres por haberme inculcado hacer siempre lo que me apasionase y por todo el apoyo que me han dado. A Alejandro, a mi abuela, a Diana por estar ahí todos estos años y a mi primo Migue por su ayuda.

En definitiva a todas aquellas personas que me han acompañado durante los años de la carrera y me han apoyado y ayudado siempre que han podido.

ÍNDICE DEL DOCUMENTO N°1: MEMORIA

Acrónimos	XI
Especies químicas.....	XIII
Resumen	XIV
Abstract.....	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo y Alcance	4
1.2 Antecedentes	5
2. METODOLOGÍA.....	7
2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	7
2.1.1 Normativa.....	8
2.1.2 Fases del ACV.....	8
2.2 Caso de estudio: la ciudad de Madrid.....	11
3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CASO DE ESTUDIO.....	23
3.1 Objetivo y alcance	23
3.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)	27
3.2.1 Ciclo de vida del vehículo: fase de fabricación y mantenimiento.....	27
3.2.2 Ciclo de vida del combustible: <i>well to tank (WtT)</i>	28
3.2.3 Ciclo de vida del combustible: <i>Tank to wheel (TtW)</i>	34
3.3 Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV).....	39
4. Resultados.....	41
4.1 Escenario actual (2014)	41
4.2 Escenario diésel	50
4.3 Escenario GNC	59
4.4 Escenario eléctrico. MixEléctrico 2016.....	67
4.5 Escenario renovable	75
5. Conclusiones.....	81

5.1	Comparación de escenarios	81
5.2	Valoración de impactos ambientales, sociales y económicos.....	87
6.	Líneas futuras de investigación	93
7.	Bibliografía.....	95

INDICE DOCUMENTO N°2: ESTUDIO ECONÓMICO

1.	Programación temporal.....	97
2.	Presupuesto.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas del ciclo de vida de un producto. Fuente: Rodríguez et al., 2015.	7
Figura 2: Zonas establecidas por el Estudio del Parque circulante 2013. Fuente: AM, 2013.	14
Figura 3: Evolución de las emisiones de GEI por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.	14
Figura 4: Evolución de las emisiones de NO _x por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.	15
Figura 5: Evolución de las emisiones de SO ₂ por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.	15
Figura 6: Evolución de las emisiones de NH ₃ por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.	16
Figura 7: Evolución de las emisiones de COVNM por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.	16
Figura 8: Evolución de las emisiones de CO por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.	17
Figura 9: Evolución de las emisiones de PM _{2.5} por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.	17
Figura 10: Evolución de las emisiones de CO ₂ en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.	19
Figura 11: Evolución de las emisiones de CH ₄ y N ₂ O en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.	19
Figura 12: Evolución de las emisiones de CO y NO _x en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.	20
Figura 13: Evolución de las emisiones de PM _{2.5} en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.	20
Figura 14: Diagrama de flujo del ACV de un autobús. Fuente: García et al., 2012.	24
Figura 15: Líneas de autobuses de la EMT sobre las zonas definidas. Fuente: AM, 2013.	24
Figura 16: Distribución de la producción de energía eléctrica año 2016. Fuente: REE 2016.	33
Figura 17: Árbol de decisión para las emisiones de escape del transporte por carretera. Fuente: EEA, 2016.	35

Figura 18: Contribución por fases al impacto de cambio climático del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 19: Peso de contaminantes en el escenario actual, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 20: Contribución por fases al impacto de ozono troposférico del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 21: Peso de contaminantes en el escenario actual, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 22: Contribución por fases al impacto de acidificación del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 23: Peso de contaminantes en el escenario actual, acidificación. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 24: Contribución por fases al impacto de eutrofización del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 25: Emisiones en el escenario actual por contaminante, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 26: Contribución por fases al impacto de material particulado del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 27: Emisiones en el escenario actual por contaminante, material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 28: Contribución por fases al impacto de cambio climático del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 29: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 30: Contribución por fases al impacto de ozono troposférico del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 31: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 32: Contribución por fases al impacto de acidificación del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 33: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, acidificación. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 34: Contribución por fases al impacto de eutrofización del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.....	56

Figura 35: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 36: Contribución por fases al impacto de material particulado del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 37: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 38: Contribución por fases al impacto de cambio climático del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 39: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 40: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 41: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 42: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de acidificación. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 43: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, acidificación. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 44: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 45: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 46: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 47: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 48: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de cambio climático. Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 49: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 50: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 51: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.....	70

Figura 52: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de acidificación. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 53: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, acidificación. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 54: : Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 55: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 56: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 57: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 58: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de cambio climático. Fuente: Elaboración propia.....	75
Figura 59: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 60: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 61: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 62: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de acidificación. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 63: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, acidificación. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 64: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 65: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.....	79
Figura 66: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	79
Figura 67: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, material particulado. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 68: Comparación de impacto de cambio climático entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	81

Figura 69: Comparación de impacto de ozono troposférico entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	82
Figura 70: Comparación de impacto de acidificación entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	83
Figura 71: Comparación de impacto de eutrofización entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	84
Figura 72: Comparación de impacto de material particulado entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 73: Agrupación de los escenarios según su contribución a los impactos. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 74: Diagrama de Gantt. Fuente: Elaboración Propia.	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Distribución de los recorridos realizados en la ciudad de Madrid por tipo de vehículo y por zona. Fuente: AM,2013.	13
Tabla 2:Emisiones totales del sector transporte en el municipio de Madrid. Fuente AM, 2015.	18
Tabla 3: Descripción de escenarios. Fuente: Elaboración propia.	25
Tabla 4: Balance energético de la EMT, 2014. Fuente: AM, 2014a.	28
Tabla 5: Recorridos escenario actual, 2014. Fuente: AM, 2014b.	28
Tabla 6: Factores de emisión empleados en la fase WtT. Fuente: MAPAMA,2016 y EEA, 2016.	33
Tabla 7:Factores de emisión. Fuente: EEA, 2016.	36
Tabla 8: Emisiones de CO ₂ por consumo de combustible. Fuente: EEA, 2016.	37
Tabla 9: Emisiones de SO ₂ por consumo de combustible. Fuente: EEA, 2016.	37
Tabla 10: Consumos de combustible por tecnología (g combustible/km). Fuente: EEA, 2016.	37
Tabla 11: Factores de emisión de CH ₄ de la fase TtW. Fuente: COPERT 4.11.3	38
Tabla 12: Descripción de las categorías de impacto. Fuente: EC-JRC-IES, 2012.....	40
Tabla 13: Emisiones asociadas a la fabricación de un autobús. Fuente: SimaPro8.4.0. (Pré, 2018).	41
Tabla 14: Emisiones asociadas al mantenimiento de un autobús. Fuente: SimaPro8.4.0. (Pré, 2018).	41

Tabla 15: Consumos de energía eléctrica y térmica de toda la flota de autobuses de la EMT en 2014. Fuente: EMT, 2014a.	42
Tabla 16: Emisiones procedentes del consumo de energía eléctrica y térmica en fase WtT. Fuente: MAPAMA, 2016.	42
Tabla 17: Emisiones de la fase TtW de toda la flota de la EMT del año 2014. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 18: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario actual. Elaboración propia.	43
Tabla 19: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.	45
Tabla 20: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.	46
Tabla 21: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 22: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 23: Emisiones asociadas a la fase WtT. Flota diésel EURO VI. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 24: Emisiones de la fase TtW. Flota diésel EURO VI. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 25: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 26: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 27: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 28: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.	56
Tabla 29: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.	57
Tabla 30: Emisiones asociadas a la fase WtT. Flota GNC tecnología EEV Fuente: Elaboración propia.	59
Tabla 31: Emisiones de la fase de uso. Flota GNC tecnología EEV. Fuente: Elaboración propia.	59

Tabla 32: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 33: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 34: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 35: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 36: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 37: Emisiones asociadas a la fase WtT. Flota Eléctrica. Mix de generación España (2016). Fuente: Elaboración propia.	67
Tabla 38: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.....	68
Tabla 39: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.....	69
Tabla 40: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.....	70
Tabla 41: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.....	71
Tabla 42: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 43: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.....	75
Tabla 44: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 45: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.....	77
Tabla 46: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.....	78
Tabla 47: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 48: Datos para la comparación de impacto de cambio climático entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	81

Tabla 49: Datos para la comparación de impacto de ozono troposférico entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	82
Tabla 50: Datos para la comparación de impacto de acidificación entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	83
Tabla 51: Datos para la comparación de impacto de eutrofización entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	84
Tabla 52: Datos para la comparación de impacto de material particulado entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	85
Tabla 53: Presupuesto total. Fuente: Elaboración propia.....	99

Acrónimos

ACV: análisis de ciclo de vida

AENOR: asociación española de normalización y certificación

AM: ayuntamiento de Madrid

CE: comisión europea

CEE: comunidad económica Europea

CNG: *compressed natural gas*

DPF: filtro de partículas diésel

ECE: *economic commission for Europe*

EEV: *enhanced environmental-friendly vehicles*

EGR: válvulas de recirculación de gases de escape

EICV: Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida

EMEP/EEA: *European monitoring and evaluation programme/European environment agency*

EMT: empresa municipal de transportes de Madrid

ETSII: escuela técnica superior de ingenieros industriales

FLC: *fuel life cycle*

GEI: gases de efecto invernadero

GHG: *greenhouse gases*

GNC: gas natural comprimido

ICV: inventario del ciclo de vida

ILCD: *international reference life cycle data system*

IPCC: panel intergubernamental contra el cambio climático

ISO: *international organization for standardization*

LCA: *life cycle assessment*

OECC: oficina española de cambio climático

OMS: organización mundial de la salud

PCI: poder calorífico inferior

REE: red eléctrica española

SCR: catalizador de reducción selectiva

SNAP: selected nomenclature for air pollution

TFG: trabajo fin de carrera

TtW: *tank to wheel*

UPM: universidad politécnica de Madrid

VLC: *vehicle life cycle*

WtT: *well to tank*

Especies químicas

CH₄: metano

CO: monóxido de carbono

CO₂: dióxido de carbono

COVNM: compuestos orgánicos volátiles no metánicos

H₂SO₄: ácido sulfúrico

HNO₃: ácido nítrico

N₂O: óxido nitroso

NH₃: amoníaco

NO_x: óxidos de nitrógeno, NO₂ y NO medidos como NO₂

O₃: ozono

PM: material particulado

PM_{2,5}: material particulado con diámetro aerodinámico equivalente inferior a 2,5 micras

RCO: radicales de CO

SO₂: dióxido de azufre

SO_x: óxidos de azufre, SO₂ y SO medidos como SO₂

Resumen

Este trabajo evalúa los impactos ambientales asociados a una flota de autobuses urbanos, bajo diferentes escenarios y mediante la metodología ACV. Se han escogido cinco escenarios: escenario 2014; escenario todo diésel; escenario todo gas natural y dos escenarios eléctricos. Dentro de éstos se distingue uno en el que la electricidad proviene del mix de generación en España y otro cuya electricidad proviene de fuentes 100% renovables.

Los impactos estudiados son: cambio climático, ozono troposférico, acidificación, eutrofización y material particulado.

Las etapas consideradas son el ciclo de vida del vehículo (fases de fabricación y mantenimiento) y el ciclo de vida de la fuente energética (producción y uso).

Abstract

This project researches environmental impacts of a urban bus fleet under different scenarios and through the LCA methodology. Five scenarios have been chosen: Scenario 2014; a scenario with the entire diesel fleet; a scenario with the entire CNG (Compressed Natural Gas) fleet and two scenarios with the entire electric fleet. These describe two situations: one where the electricity comes from a mixed generation process in Spain and another where the electricity is entirely obtained from renewable sources.

The impacts studied are: climate change, tropospheric ozone, acidification, eutrophication and particulate because these are the most relevant in the transport sector.

The stages considered are the life cycle of the vehicle (VLC) and life cycle of the energy source (FLC).

1. INTRODUCCIÓN

La actividad humana ha dejado su huella durante miles de años sobre la naturaleza, pero no ha sido hasta la llegada de la revolución industrial cuando esta influencia pasa a ser global afectando en la actualidad a la propia pervivencia de la vida en el planeta.

La revolución industrial que se inició en la segunda mitad del siglo XVIII en Gran Bretaña cambió la manera de producción e influyó en todos los aspectos de la vida de los humanos y de la Tierra en su conjunto. Además, apareció otra huella generada por los seres humanos como consecuencia de la forma de producción industrial. Esta huella se refiere a aquellos cambios que directa e indirectamente se provocan en el medio ambiente, en sus recursos naturales o en sus procesos fundamentales de funcionamiento que puedan producir en el futuro repercusiones apreciables en los mismos.

Existen numerosos impactos tipificados producto de las diversas actividades humanas industriales. En este trabajo solo se han cuantificado algunos de ellos relacionados con el sector del transporte rodado y más concretamente los impactos asociados a la flota de autobuses públicos urbanos de la ciudad de Madrid.

Desde la revolución industrial se ha ido incrementado la actividad económica de los países gracias a la tecnología y a la innovación, sin embargo, estos avances se han visto acompañados por el aumento de la cantidad de contaminantes emitidos al medio ambiente así como su peligrosidad o agresividad.

Por esta razón es cada vez más importante que dicho avance vaya de la mano de mejoras relativas a la protección del medio ambiente. Es necesario un cambio progresivo en los diferentes sectores económicos, hacia un escenario más sostenible y respetuoso con el medio ambiente y con las generaciones futuras. Para caminar en esta dirección se necesitan métodos que sean capaces de cuantificar y evaluar adecuadamente los impactos para poder posteriormente trabajar para minimizarlos o incluso eliminarlos.

El método escogido en este trabajo para evaluar los impactos ambientales asociados a la flota de autobuses urbanos de Madrid es la metodología denominada "Análisis de Ciclo de Vida" (ACV). Con esta metodología se pueden evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o actividad durante su ciclo de vida completo, es decir

desde su fabricación hasta su eliminación incluyendo las fases intermedias de uso y mantenimiento.

En el caso de un autobús se tienen en cuenta dos grandes conjuntos de procesos: el ciclo de vida del vehículo y el ciclo de vida de la fuente energética que utiliza dicho vehículo. El ACV es una metodología científica que nos da información sobre la "amigabilidad medioambiental" del producto, proceso o actividad que se está estudiando. Se desarrolla bajo las normas ISO 14040 e ISO 14044 que establecen los principios, marco, requerimientos y guías de ejecución de los estudios de ACV.

Los impactos que se van a estudiar son: cambio climático, acidificación, eutrofización terrestre, formación de ozono troposférico y formación de material particulado, que son aquellos relacionados directamente con las emisiones a la atmósfera. Se estudian dichos impactos por ser los más relevantes dentro de los generados por el sector del transporte por carretera.

El cambio climático es el cambio del clima de la Tierra producido por el aumento de la concentración de ciertas sustancias, los gases de efecto invernadero (GEI), entre las que destacan CO_2 , N_2O y CH_4 . Estas sustancias alteran el equilibrio radiactivo de la atmósfera y producen el efecto invernadero, debido a que absorben parte de la radiación que se refleja de la superficie y que debería salir de la atmósfera.

El cambio climático es uno de los problemas más preocupantes que se debe afrontar en el siglo XXI. En 2014 el IPCC (Panel Intergubernamental contra el Cambio Climático) acreditó la existencia del cambio climático y su vinculación con la actividad humana. Ha aumentado la temperatura de la atmósfera y el océano, ha subido el nivel del mar, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido. Los glaciares se derriten y solo recuperan una parte de su volumen congelado, flores y árboles cambian sus periodos de floración y algunas especies animales han sufrido cambios de comportamiento (IPCC, 2014).

La acidificación proviene de compuestos ácidos como el dióxido de azufre (SO_2), el amoníaco (NH_3) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), que se transforman en ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3) al entrar en contacto con el agua de la atmósfera. Posteriormente caen en forma de lluvia ácida acidificando el suelo, los hábitats acuáticos, atacando a la flora y corroyendo los materiales y edificaciones.

La eutrofización es el incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provocan la proliferación de algas y micro algas, reduciendo la cantidad de oxígeno disuelto. Este impacto es considerado uno de los procesos de contaminación mas importante en los ecosistemas acuáticos, producido principalmente por la acumulación de compuestos nitrogenados.

Respecto a la formación de ozono troposférico hay que destacar que el ozono formado en la troposfera es un oxidante fotoquímico y un contaminante secundario porque no se emite directamente, sino que se genera a partir de una serie de reacciones complejas con otros contaminantes primarios. La radiación ultravioleta (más intensa en zonas cálidas) rompen las moléculas de NO_x liberando oxígeno que reacciona con los COVNM (compuestos orgánicos volátiles no metánicos formados principalmente por hidrocarburos) formando radicales libres RCO que finalmente llevan a la aparición de ozono (O_3) troposférico. Ambos precursores, NO_x y COVNM son típicos de atmósferas urbanas contaminadas producidos en la combustión de hidrocarburos procedentes del sector del tráfico rodado entre otros.

Por último, se considera material particulado (PM) a una mezcla compleja y generalmente reactiva de pequeños compuestos inquemados que permanecen en suspensión. Las partículas que tienen mayor impacto sobre la salud de las personas, son las $\text{PM}_{2,5}$ (material particulado con un diámetro aerodinámico equivalente inferior a 2,5 micras) porque son capaces de entrar al torrente sanguíneo. En este trabajo se han considerado dos fuentes de emisión de material particulado durante la fase de uso del vehículo: el propio procedente de la combustión de los combustibles de los autobuses, y el producido por el desgaste de neumáticos y frenos y abrasión del pavimento, que depende únicamente del peso del vehículo, además del producido en la fase de fabricación del vehículo. También contribuyen a dicho impacto la emisión de CO , NO_x , NH_3 y SO_2 , por intervenir en la formación de material particulado secundario.

1.1 Objetivo y Alcance

El objetivo de este trabajo es la comparación de diferentes escenarios, relativos a la flota de autobuses de la ciudad de Madrid, evaluando los impactos generados por cada uno de ellos. Con este trabajo se busca obtener las conclusiones necesarias para valorar cuáles son las mejores vías para encaminarse hacia una flota de autobuses lo menos contaminante posible y para ello se han definido cinco escenarios: el escenario actual; un escenario en el que todos los autobuses fuesen diésel, en concreto de la tecnología EURO VI por ser ésta la tecnología presente en los vehículos que se venden en la actualidad; otro escenario con toda la flota de autobuses de GNC (gas natural comprimido) y por último dos escenarios con autobuses eléctricos para contrastar las diferencias con el transporte convencional, es decir enfrentar combustibles fósiles a una movilidad eléctrica. El primero de ellos supone que la electricidad consumida procede de la generación eléctrica en España en el año 2016: 41,8% de fuentes renovables, 22,9% de energía nuclear, 14,4% carbón, 10,5% ciclo combinado y 10,4% cogeneración (*REE, 2016*). En el segundo de los escenarios eléctricos se supone que toda la energía proporcionada fuese de origen renovable.

1.2 Antecedentes

En el año 2012 se presentó el trabajo "*Comparison of Life Cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas, biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system*" (García et al., 2012) donde se comparaba el consumo y las emisiones de tres tecnologías de autobuses de la EMT (Empresa Municipal de Transportes de Madrid) con distintos carburantes: autobús de GNC; autobús 80% diésel + 20% biodiésel y autobús 100% biodiésel. Además, se proponían tres tratamientos post combustión:

- EGR (válvulas de recirculación de gases de escape)+DPF (filtro de partículas diésel).
- SCR (catalizador de reducción selectiva)+ Urea (agente reductor).
- Catalizador de tres vías.

El uso del biodiésel reduce las emisiones de GEI en la fase de uso del autobus, puesto que dichas emisiones no computan por considerarse la combustión de la biomasa balance neutro de carbono, si no se utiliza ningún terreno para la obtención de la biomasa. Sin embargo, si se destina terreno para la obtención de biomasa aumentan las emisiones de GEI en la fase del combustible (WtT, Well to Tank) contrarrestando los efectos positivos del uso del biodiésel. El aumento de la demanda de terrenos de cultivo para obtener biocombustibles podría llegar a ser un problema al competir con terrenos de cultivo para productos de alimentación, por ello que García et al. (2012) concluye que es necesario implementar estrictos criterios de sostenibilidad en el uso de la tierra para producir materias primas destinadas a la producción de biocombustibles.

Como se ha podido concluir en García et al. (2012) los biocombustibles no son la mejor solución para reducir el impacto de GEI si la biomasa no es de origen residual. Por esta razón en el presente trabajo fin de grado se van a estudiar los impactos producidos por distintas tecnologías actuales de autobuses de la EMT para concluir cuales son mejores en materia de reducción de impactos tanto en cambio climático como en el resto de impactos mencionados anteriormente.

Con estos antecedentes y según el nuevo "Plan de Calidad del aire de Madrid" (AM, 2017), parece acertado estudiar los impactos asociados a la flota de autobuses de Madrid

antes de que se comenzaran los procesos de renovación de tecnologías y compararlos con los escenarios futuros posibles a medio y largo plazo de acuerdo con dicho plan.

2. METODOLOGÍA

2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una metodología que tiene como objetivo evaluar la huella medioambiental de un producto, proceso, servicio o actividad durante su ciclo de vida completo, es decir los cambios que directa e indirectamente se provocan en el medio ambiente, en los recursos naturales o en sus procesos fundamentales de funcionamiento que puedan producir en el futuro repercusiones apreciables en los mismos. El ACV de un producto, de lo que se ocupa este trabajo, evalúa el impacto desde la fabricación del producto hasta su eliminación, pasando por la fase de uso y mantenimiento. En concreto en este trabajo se va a aplicar el ACV tanto al ciclo de vida del vehículo como al ciclo de vida de la fuente energética que utiliza dicho vehículo.

De forma genérica, el análisis de ciclo de vida de un producto implica (Rodríguez *et al.*, 2015):

- Identificar y cuantificar la energía y materias primas utilizadas para posteriormente calcular las emisiones al medio ambiente.
- Evaluar los impactos ambientales potenciales atribuibles al producto.
- Interpretar los impactos ambientales en base a los objetivos del estudio y valorar las oportunidades de mejora del perfil medioambiental del producto.

Dichas etapas quedan gráficamente representadas en la *Figura 1*:

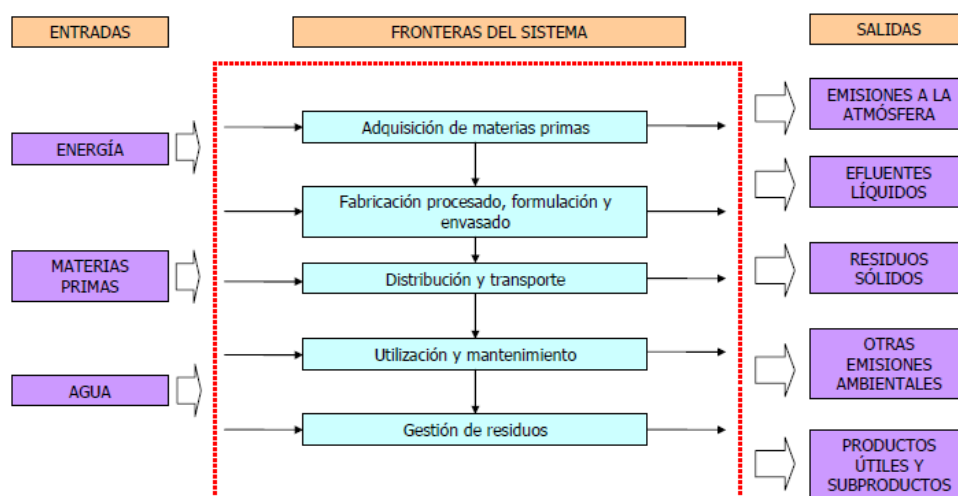


Figura 1: Etapas del ciclo de vida de un producto. Fuente: Rodríguez *et al.*, 2015.

2.1.1 Normativa

El ACV es una metodología internacional que se rige por las normas ISO 14040:2006 (Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia, ISO, 2006a) y 14044:2006 (Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices, ISO, 2006b). Dichas normas son adoptadas en España por AENOR (asociación española de normalización y certificación) como UNE-EN ISO 14040 y UNE-EN ISO 14044, respectivamente.

2.1.2 Fases del ACV

De acuerdo a las normas ISO, todo estudio de ACV debe estar formado por cuatro fases (Rodríguez *et al.*, 2015):

- Definición del objetivo y el alcance.
- Inventario del Ciclo de Vida (ICV).
- Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV).
- Interpretación de resultados.

En primer lugar, se define con claridad el objetivo y alcance del estudio, estableciendo con precisión el diagrama de flujo del ciclo de vida del producto o proceso, las fronteras del sistema, la delimitación geográfica y temporal, los parámetros y datos requeridos, las hipótesis de partida y las limitaciones del estudio con objeto de asegurar la transparencia y posibilidad de repetición del mismo y, por tanto, delimitando el marco dentro del cual las conclusiones del trabajo tienen validez.

Una parte esencial de la definición del objetivo y alcance del estudio es la definición de la unidad funcional la cual se utilizará como parámetro de referencia de los datos a recoger durante un ACV. Debe ser una unidad de medida fácilmente identificable y cuantificable a lo largo de todas las etapas.

En esta primera fase del ACV, también es importante conocer las razones por las que se hace el estudio, el público al que va dirigido y la utilidad de las conclusiones obtenidas.

El ICV es la fase en la que se realiza la identificación, recopilación y cuantificación de las entradas y salidas medioambientalmente relevantes al sistema descrito en el diagrama de flujo del ciclo de vida del producto (entradas -recursos energéticos y

materias primas utilizadas- y salidas -emisiones al aire-), refiriendo en todo momento los datos a la unidad funcional definida anteriormente.

La siguiente fase de EICV consiste en transformar los datos y resultados del ICV en una medida de los impactos medioambientales potenciales de la unidad funcional. Se entiende por impacto medioambiental cualquier cambio en el medio ambiente, tanto perjudicial como beneficioso sobre el equilibrio medioambiental, la salud o el bienestar humano.

La EICV a pesar de no tener una estructura única, de acuerdo a las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 consta de unos elementos obligatorios. Dichos elementos son (Rodríguez *et al.*, 2015):

- Clasificación: incluye la selección de categorías de impacto de acuerdo con el objetivo y el alcance del estudio. Y asignación de los resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas.
- Caracterización: conversión de los datos del ICV a indicadores de categoría de impacto, empleando modelos y factores de caracterización (factores de equivalencia).
- Normalización: cálculo de la magnitud de los resultados de los indicadores de categoría de impacto en relación con la información de referencia. Pretende estimar la contribución relativa respecto a un valor anual del impacto a una determinada escala (en este caso escala local). Es una etapa optativa, y en este trabajo no se ha considerado debido a que introduce criterios de valor, y por tanto es subjetiva.
- Valorización: consiste en la agregación de las diferentes categorías de impacto, tratando de reducir todos los indicadores de categoría a un único índice medioambiental que defina al producto, a través de una ponderación. Es una etapa optativa, y en este trabajo no se ha considerado debido a que introduce criterios de valor, y por tanto es subjetiva.

Finalmente, la última etapa del ACV es la interpretación de resultados en línea con el objetivo y alcance del estudio. En ella se resumen y discuten los resultados tanto del ICV como de la EICV de forma que las conclusiones a las que se hayan llegado sirvan de recomendación y faciliten la toma de decisiones futuras. Puede elaborarse un análisis

de mejoras donde se identifiquen y evalúen distintas medidas cualitativas o cuantitativas para reducir las cargas e impactos medioambientales asociados al sistema.

2.2 Caso de estudio: la ciudad de Madrid

La Oficina Española de Cambio Climático (OECC) dentro del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, propone tres grandes grupos de medidas para reducir los impactos asociados al sector del transporte por carretera (OECC, 2018):

- Medidas de fomento del trasvase modal en pasajeros y en mercancías:

El objetivo es trasvasar pasajeros y mercancías del modo de transporte más ineficiente, como la carretera, a otros modos más eficientes, como el transporte colectivo de viajeros y la bicicleta en el caso del transporte de pasajeros, y el transporte por ferrocarril y el barco, en el caso del transporte de mercancías.

- Medidas de fomento de combustibles alternativos en el transporte:

Destacan actuaciones destinadas a fomentar combustibles o modos de propulsión con menores niveles de emisiones por unidad de energía consumida en transporte, como el coche eléctrico, la pila de hidrógeno, los biocombustibles o el biometano.

- Medidas de fomento de la eficiencia en el transporte:

Las actuaciones de eficiencia energética en transporte tratan de mejorar la eficiencia de los vehículos en el transporte por carretera, así como hacer un uso más eficiente de los mismos.

En muchos campos de la industria y la tecnología se están realizando investigaciones y estudios para reducir la huella medioambiental. Estas innovaciones buscan mejorar la eficiencia, reducir la generación de residuos, disminuir las emisiones... En este mismo sentido el Ayuntamiento de Madrid propone un nuevo "Plan de Calidad del aire de Madrid" (AM, 2017) que mejore el transporte de la ciudad en términos de innovación medioambiental.

En "el Inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera en el Municipio de Madrid, 1999 - 2015" (AM, 2015) se recogen las emisiones de los contaminantes a la atmósfera procedentes de las actividades emisoras dentro de los límites geográficos de la ciudad. En él, las emisiones se clasifican de acuerdo a su origen y se agrupan de acuerdo a la nomenclatura SNAP (*selected nomenclature for air pollution*) en los siguientes grupos:

- Grupo G_01: Plantas de generación y transformación de energía (no se presentan dentro del municipio de Madrid).
- Grupo G_02: Plantas de combustión no industrial.
- Grupo G_03: Plantas de combustión industrial.
- Grupo G_04: Procesos industriales sin combustión.
- Grupo G_05: Extracción y distribución de combustibles fósiles y energía geotérmica.
- Grupo G_06: Uso de disolventes y otros productos.
- Grupo G_07: Transporte por carretera.
- Grupo G_08: Otros modos de transporte y maquinaria móvil.
- Grupo G_09: Tratamiento y eliminación de residuos.
- Grupo G_10: Agricultura.
- Grupo G_11: Otras fuentes y sumideros (Naturaleza).

Este trabajo se centra en el grupo G_07 que se refiere al transporte por carretera. El "Inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera en el Municipio de Madrid, 1999 - 2015" para calcular las emisiones del sector del transporte por carretera incluye "El Estudio del Parque Circulante de la ciudad de Madrid" (AM, 2013) y el modelo de tráfico de la ciudad de Madrid. El Parque Circulante se muestra la distribución de los recorridos realizados en la ciudad de Madrid por categoría de vehículo tal y como se recoge en la *Tabla 1*.

Tabla 1: Distribución de los recorridos realizados en la ciudad de Madrid por tipo de vehículo y por zona.
Fuente: AM,2013.

Sector	ZONAS					
	A	B	C	D	E	TOTAL Municipio
Turismos	72,57 %	84,79 %	81,82 %	84,79 %	82,08 %	80,70 %
Vehículos ligeros	4,73 %	8,49 %	8,63 %	8,49 %	8,41 %	7,72 %
Vehículos pesados	0,95 %	2,03 %	1,77 %	2,03 %	1,89 %	1,69 %
Autobuses	1,96 %	0,97 %	1,64 %	0,97 %	3,12 %	1,90 %
<i>Autobuses EMT</i>	<i>1,76 %</i>	<i>0,10 %</i>	<i>1,37 %</i>	<i>0,01 %</i>	<i>44,0 %</i>	<i>0,88 %</i>
<i>Autobuses no EMT</i>	<i>0,20 %</i>	<i>0,87 %</i>	<i>0,28 %</i>	<i>0,96 %</i>	<i>2,68 %</i>	<i>1,02 %</i>
Ciclomotores	0,52 %	0,00 %	0,67 %	0,00 %	0,20 %	0,35 %
Motocicletas	8,33 %	0,52 %	1,15 %	0,52 %	1,51 %	2,59 %
Taxis	10,93 %	3,21 %	4,32 %	3,21 %	2,79 %	5,05 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

En esta tabla se puede observar el peso que representan los recorridos realizados por la flota de autobuses de la EMT, por zonas, en el conjunto de todos los recorridos realizados dentro de la ciudad de Madrid, de acuerdo a AM (2015).

Las zonas mencionadas en la *Tabla 1* (A, B, C, D y E) hacen referencia a las descritas en la *Figura 2*.

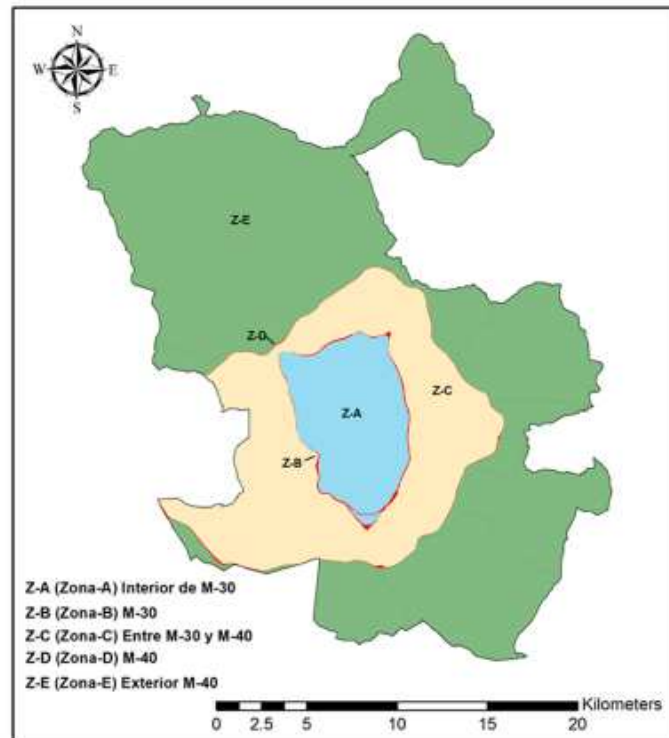


Figura 2: Zonas establecidas por el Estudio del Parque circulante 2013. Fuente: AM, 2013.

En la *Figura 3* se puede observar la evolución de las emisiones de GEI por sectores, es decir los contaminantes que contribuyen a la generación del impacto de cambio climático, en el periodo 1999 - 2015. Se observa en dicha gráfica que el grupo con mayor relevancia es el grupo G_07 (transporte por carretera).

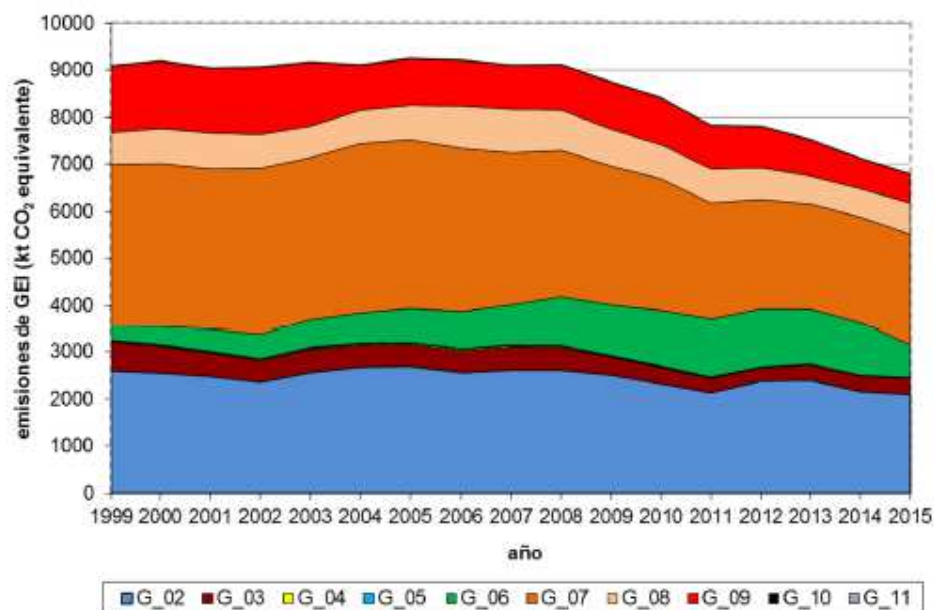


Figura 3: Evolución de las emisiones de GEI por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.

En 2015, el sector del transporte (G_07) generó el 35 % de las emisiones totales de GEI en la ciudad de Madrid. Éste junto con el sector de combustión no industrial, cuya contribución fue del 31 % (grupo G_02), fueron los principales grupos de actividad emisores de GEI en el municipio de Madrid. (Figura 3).

La evolución de las emisiones contaminantes a la atmósfera en el municipio de Madrid, relevantes en el seno del presente trabajo, se recogen en las Figuras 4,5,6,7,8 y 9.

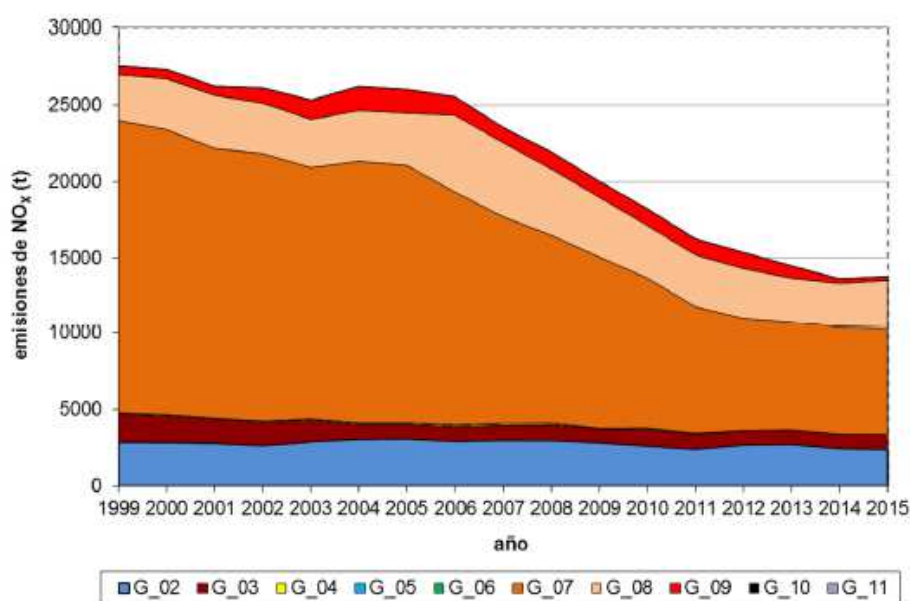


Figura 4: Evolución de las emisiones de NOx por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.

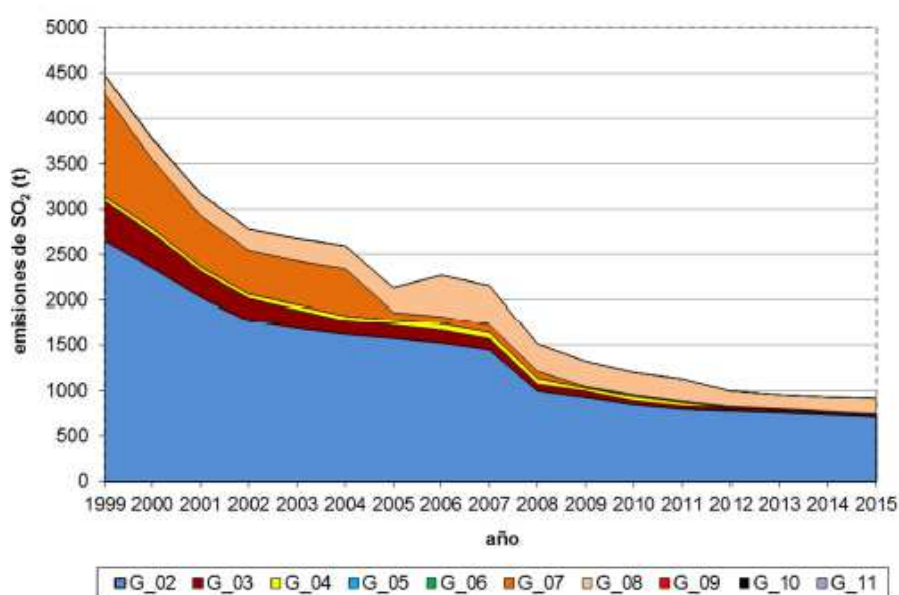


Figura 5: Evolución de las emisiones de SO2 por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.

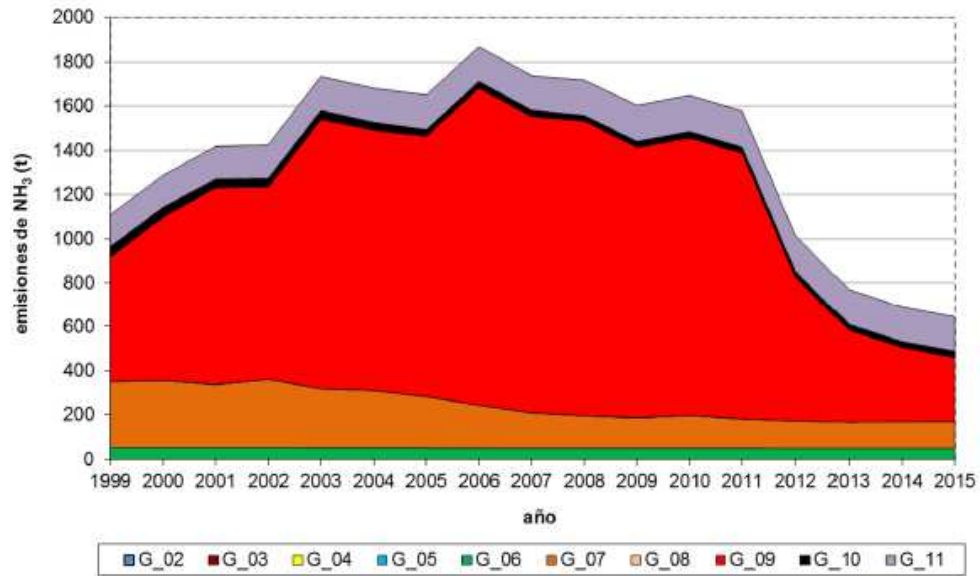


Figura 6: Evolución de las emisiones de NH₃ por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.

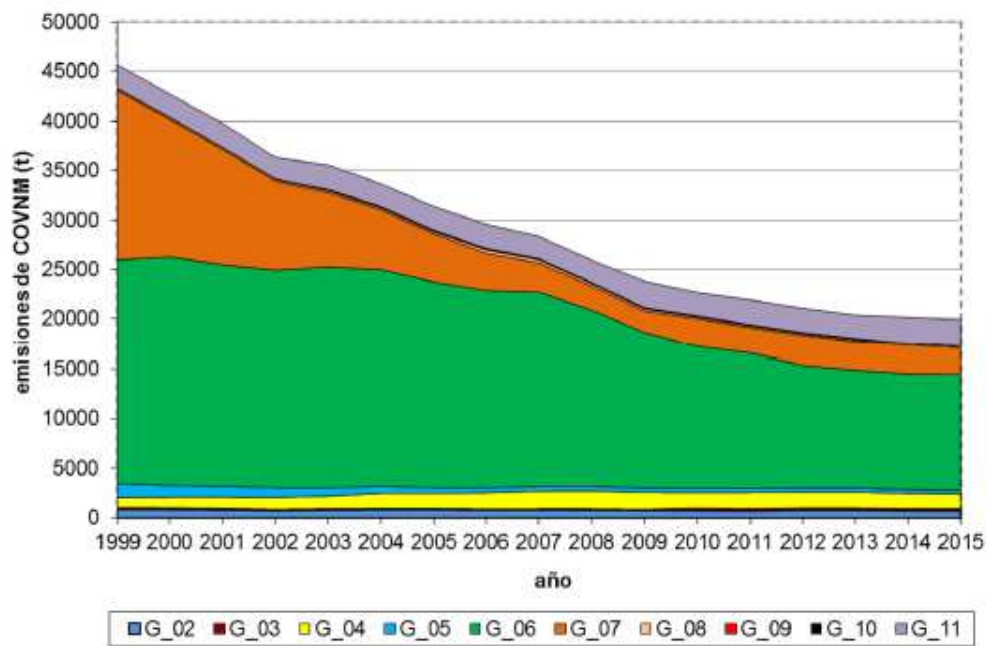


Figura 7: Evolución de las emisiones de COVNM por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.

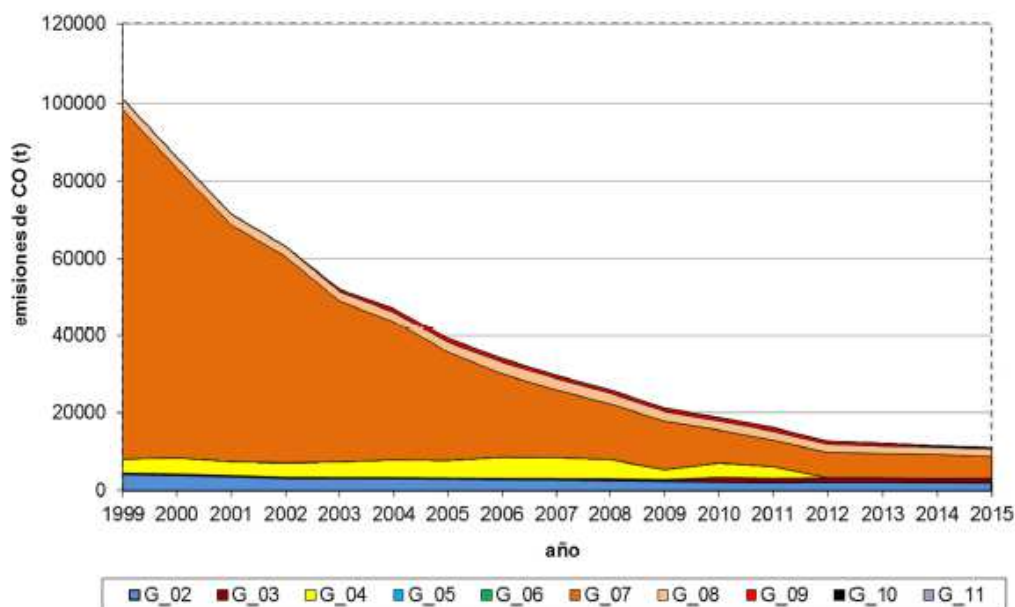


Figura 8: Evolución de las emisiones de CO por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.

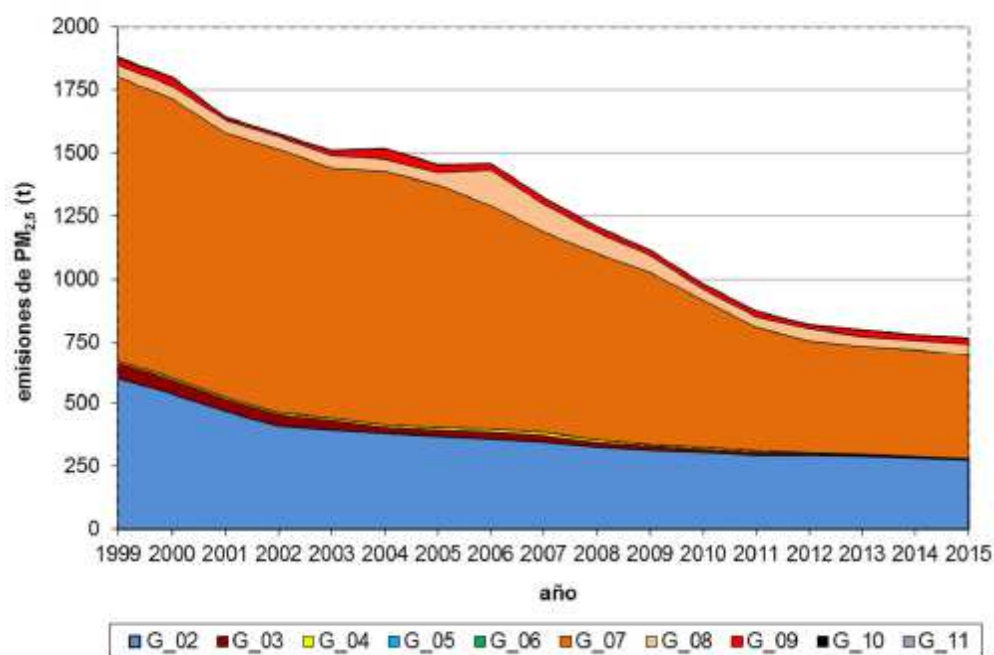


Figura 9: Evolución de las emisiones de PM_{2.5} por grupo de actividad. Fuente: AM, 2015.

Se puede observar en dichas gráficas que los contaminantes en los que el sector transporte es el más relevante son: NO_x, CO y PM_{2.5} además de los GEI.

En segundo lugar, conviene analizar el sector transporte por separado. Las emisiones contaminantes del sector según AM (2015) son las recogidas en la *Tabla 2* y representadas en las *Figuras 10, 11, 12 y 13*.

Tabla 2: Emisiones totales del sector transporte en el municipio de Madrid. Fuente AM, 2015.

Año	CH ₄	CO	CO ₂	COVNM	N ₂ O	NH ₃	NO _x	PM _{2,5}	SO ₂
	t	t	kt	t	t	t	t	t	t
1999	911	90 204	3 350	17 155	209	299	19 226	1 133	1 136
2000	796	74 794	3 386	13 876	218	305	18 740	1 111	757
2001	678	61 211	3 368	11 652	127	286	17 752	1 054	562
2002	613	53 345	3 489	9 011	130	309	17 612	1 050	477
2003	533	41 641	3 392	7 551	122	269	16 535	997	476
2004	494	35 745	3 554	6 045	120	261	17 221	1 011	509
2005	437	27 920	3 546	4 901	116	233	16 954	969	89
2006	373	21 423	3 424	3 773	111	195	15 319	892	86
2007	352	17 355	3 193	2 970	105	160	13 614	801	80
2008	327	14 283	3 071	2 409	104	147	12 388	744	77
2009	324	12 438	2 911	2 193	97	138	11 279	688	15
2010	188	8 432	2 765	2 810	89	148	9 887	590	17
2011	178	6 725	2 432	2 623	80	134	8 344	496	15
2012	139	6 536	2 299	2 924	83	126	7 380	450	14
2013	134	6 330	2 208	2 843	80	121	7 093	433	14
2014	133	6 234	2 213	2 863	81	122	7 012	428	14
2015	128	5 604	2 344	2 606	84	124	6 946	415	14

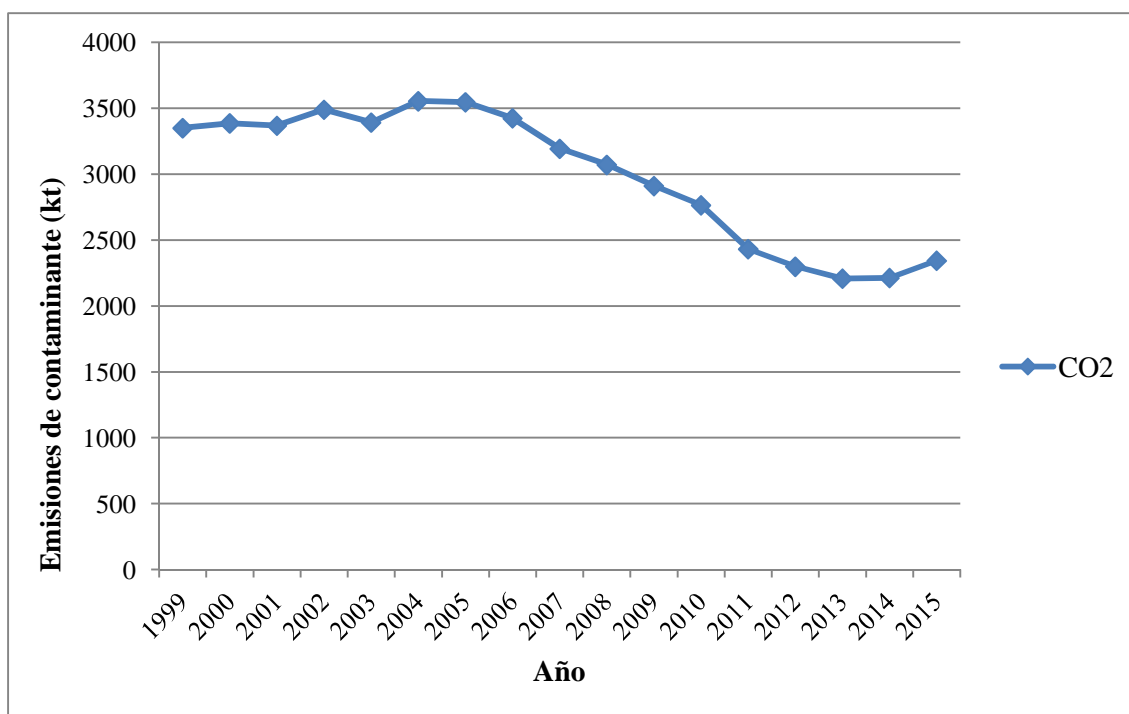


Figura 10: Evolución de las emisiones de CO₂ en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.

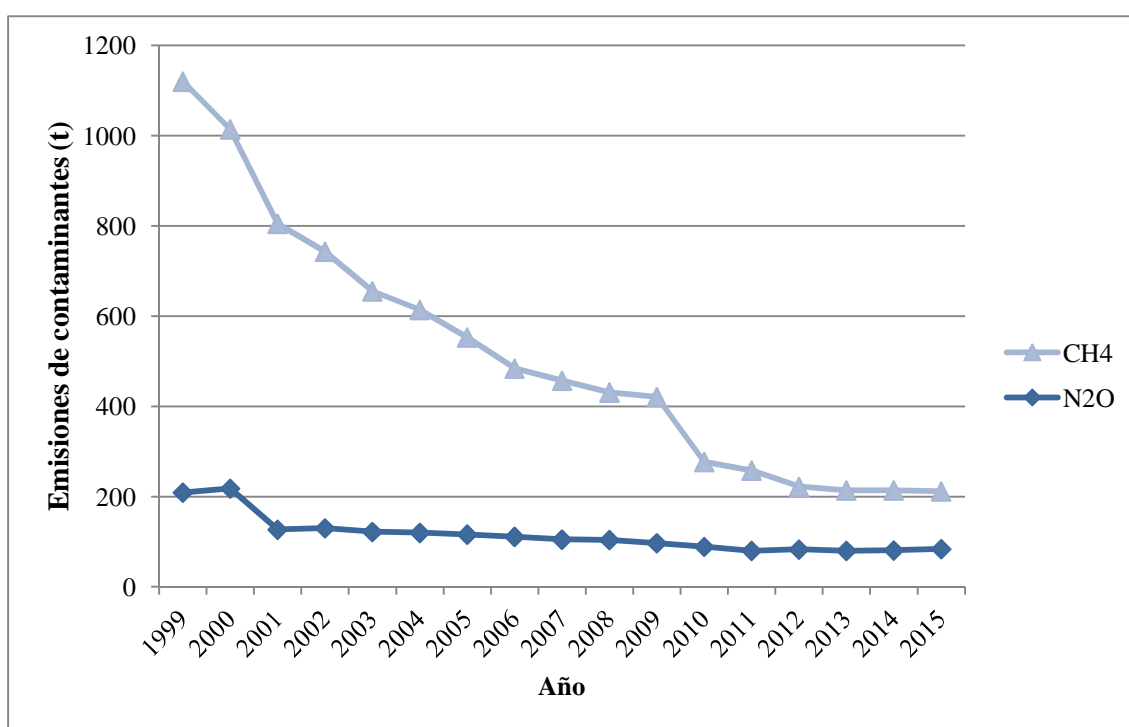


Figura 11: Evolución de las emisiones de CH₄ y N₂O en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.

En la *Figura 10* se puede observar que las emisiones de CO₂ en 2015 aumentaron un 6 % respecto a 2014. Esto se debe al incremento de los recorridos totales en un 7 %, lo

que supuso un aumento de las emisiones de GEI. Sin embargo, desde el año 1999, la reducción de los GEI ha sido del 31 %. Y como se ha visto en la *Figura 3* el sector transporte es el principal foco de emisión de GEI junto con el sector de combustión no industrial (G_02). (AM, 2015).

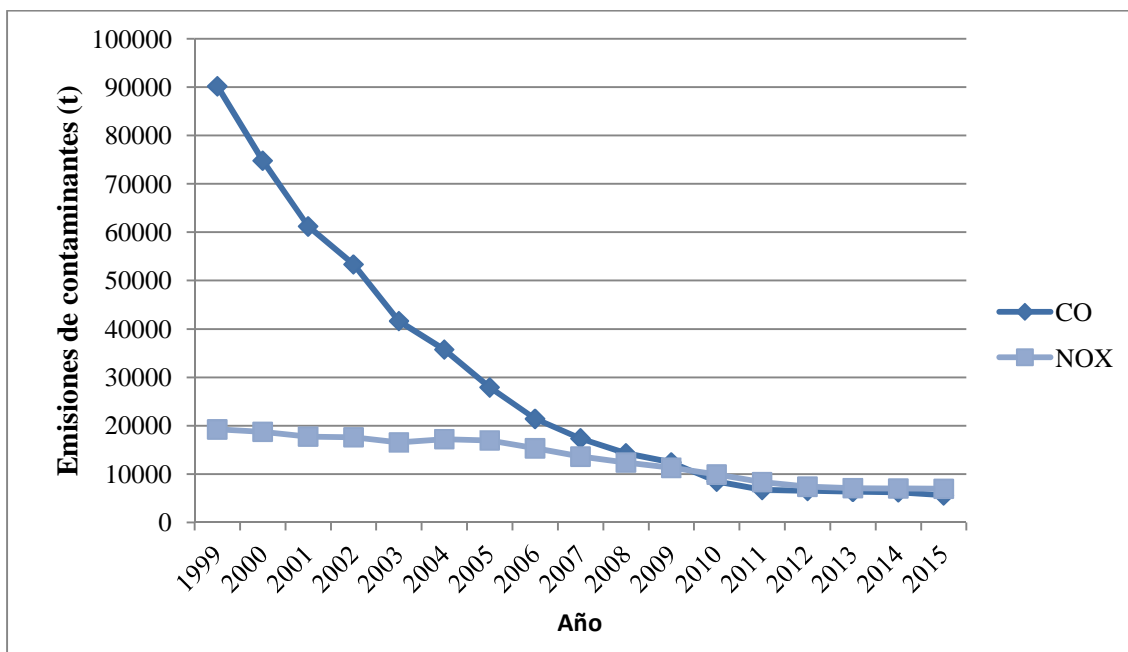


Figura 12: Evolución de las emisiones de CO y NO_x en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.

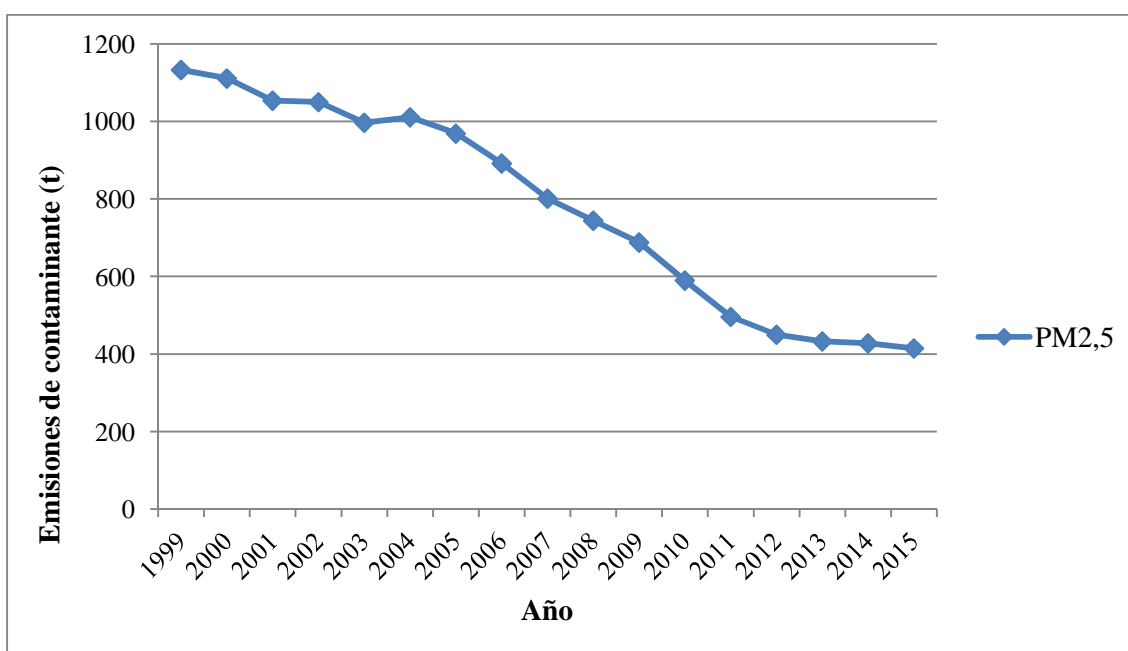


Figura 13: Evolución de las emisiones de PM2.5 en el sector del transporte rodado. Municipio de Madrid. Fuente: AM, 2015.

En cuanto a la emisión del resto de contaminantes, recogidos en las *Figura 12 y 13*, para los que el sector de transporte por carretera es relevante (NO_x , CO, y $\text{PM}_{2,5}$), su reducción fue del 1, 10 y 3 % respectivamente, entre los años 2014 y 2015. Y en el periodo 1999-2015, las emisiones de NO_x se redujeron un 64 %, las de CO un 94 % , y las de $\text{PM}_{2,5}$ un 63 % .

La disminución de emisiones de los contaminantes estudiados en el periodo 1999- 2015 para el sector del transporte según el "Inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera en el Municipio de Madrid, 1999 - 2015" se debe a los siguientes factores (AM, 2015):

- Penetración de tecnologías con menores o nulas tasas de emisión por kilómetro recorrido (vehículos eléctricos o híbridos) y redistribución de los recorridos (estudio del Parque Circulante) hacia tipologías de vehículos (motocicletas y ciclomotores) y motorizaciones/tecnologías de combustión menos intensivas en consumo de carburante(distribución diésel/gasolina y por cilindrada).
- Mejoras asociadas al transporte público municipal, tanto en lo que concierne al sector del taxi como a los autobuses de la EMT:
 - Sector del taxi: las políticas municipales y autonómicas de promoción del vehículo híbrido y de otros combustibles alternativos tipo gases licuados del petróleo, han tenido gran acogida y su grado de penetración sigue aumentando (más de 3.200 taxis híbridos a 31 de diciembre de 2015).
 - EMT: ha priorizado la compra de vehículos de gas natural comprimido, teniendo además una pequeña flota de autobuses eléctricos.

A pesar de las grandes disminuciones de emisiones contaminantes, la ciudad de Madrid sigue superando en numerosas ocasiones los valores límite de concentración en el aire ambiente de diferentes contaminantes como el NO_2 u ozono troposférico, los cuales tienen como principal origen la quema de combustibles fósiles.

Para seguir por este camino de disminución de emisiones, el Ayuntamiento de Madrid, en referencia a la movilidad urbana, se ha planteado el compromiso de reducir el 50 % de las emisiones causadas por la movilidad urbana en 2030, con respecto a 2012, a partir del programa de "*Ampliación y renovación de la flota de la EMT hacia una flota 100% Eco, adquiriendo autobuses de elevadas prestaciones ambientales y sustitución*

progresiva de la flota actual, con el objetivo de alcanzar en 2020 una flota de 2000 autobuses en uso con categoría ECO o superior", entre otras medidas. (AM, 2017).

Cómo se ha podido ver, tanto la OECC como el Ayuntamiento de Madrid, incluyen en sus planes de reducción de emisiones, la sustitución de sistemas de propulsión convencionales por otros con menores niveles de emisiones por unidad de energía consumida. En este punto, es necesario un estudio sobre qué tecnologías o conjunto de tecnologías son las más adecuadas para dicho fin. En este trabajo se comparan distintos escenarios con diferentes tecnologías de autobuses para valorar cuáles producen menores emisiones atmosféricas, y por tanto son más adecuados de cara a la reducción del impacto ambiental. Además, la ciudad de Madrid puede servir como caso de estudio y como ejemplo extrapolable a otras ciudades de España y de Europa.

3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CASO DE ESTUDIO

3.1 Objetivo y alcance

En este trabajo se ha realizado el estudio de ACV de la flota de autobuses de la ciudad de Madrid, y se han diferenciado dos fases dentro del ACV:

- Análisis del ciclo de vida del vehículo: se ha evaluado la extracción de las materias primas, el acondicionamiento de las mismas, la fabricación de los distintos componentes que conforman el autobús y el transporte de los mismos, su mantenimiento y la eliminación del vehículo al final de la vida útil.

"Apartado (c) de la Figura 14".

- Análisis del ciclo de vida de la fuente energética (ciclo de vida del combustible). En el análisis de ciclo de vida de la fuente energética se han considerado dos sub-etapas:
 - Del pozo al tanque (*WtT, Well to Tank*): incluye las operaciones de extracción del combustible y su transporte hasta el depósito del vehículo. No se han tenido en cuenta la fabricación de las infraestructuras ni los procesos anteriores necesarios para dicha extracción.
 - Del tanque a la rueda (*TtW, Tank to Wheel*): representa la fase de uso de dicho combustible en el propio vehículo.

"Apartados (a) y (b) de la Figura 14".

El diagrama de flujo se representa en la *Figura 14*:

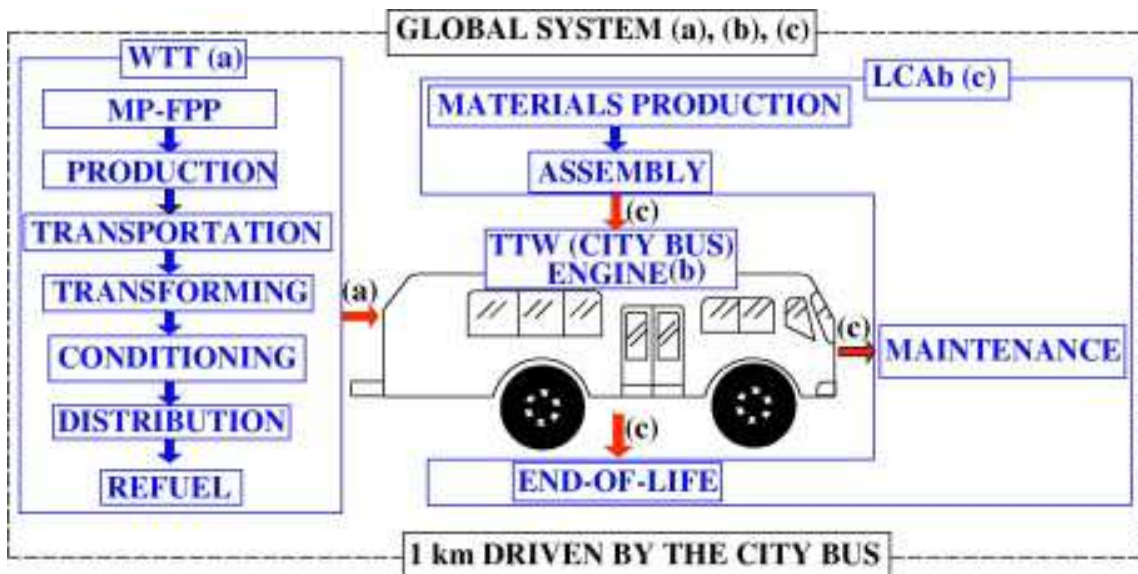


Figura 14: Diagrama de flujo del ACV de un autobús. Fuente: García et al., 2012.

El estudio se limita al municipio de Madrid y a los territorios recorridos por los autobuses de la EMT dentro del mismo. De acuerdo a AM, 2013, los recorridos de los autobuses se realizan en las 5 zonas en las que se divide el municipio: A (dentro de la M30), B (la M30), C (entre la M30 y la M40), D (la M40) y E (fuera de la M40), representadas en la *Figura 15*.

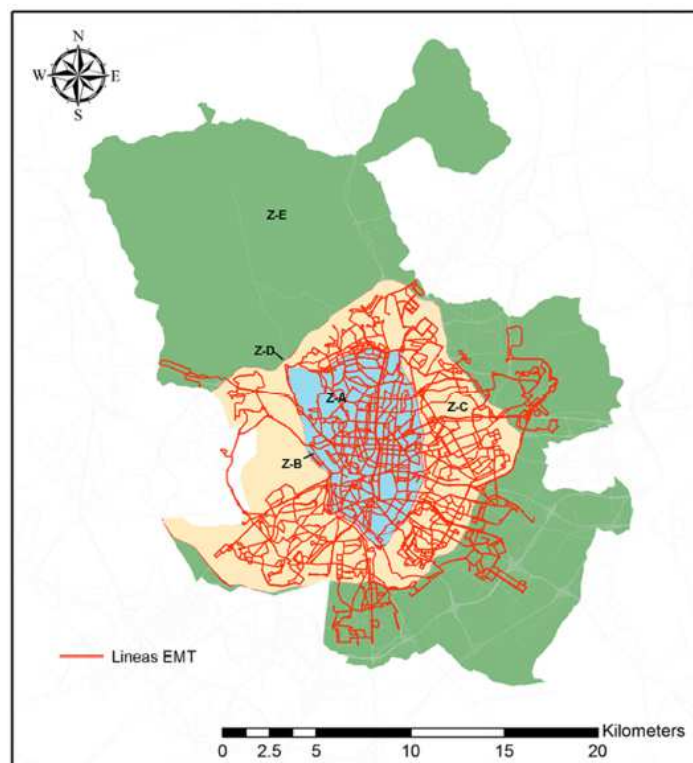


Figura 15: Líneas de autobuses de la EMT sobre las zonas definidas. Fuente: AM, 2013.

Siguiendo las normas y metodología definidas anteriormente, en este trabajo se propone un ACV comparativo entre 5 escenarios de tecnologías distintas para la flota de autobuses de la EMT en la ciudad de Madrid. Estos escenarios se detallan en la *Tabla 3*.

Tabla 3: Descripción de escenarios. Fuente: Elaboración propia.

ESCENARIOS		DESCRIPCIÓN
Actual		Escenario formado por la flota de autobuses de la EMT del año 2014. Incluye: 216 autobuses EURO III, 331 diésel EURO VI, 547 diésel EURO V, 793 GNC de tecnología EEV y 20 autobuses eléctricos
Diésel		Escenario formado por una flota de 1907 autobuses, todos de la tecnología diésel EURO VI
GNC		Escenario formado por una flota de 1907 autobuses, todos de la tecnología EEV de gas natural comprimido
Eléctrico	MixEléctrico	Escenario formado por una flota de 1907 autobuses, todos eléctricos cuya energía consumida proviene del mix de producción de energía eléctrica de España en 2016
	Renovable	Escenario formado por una flota de 1907 autobuses, todos eléctricos cuya energía consumida proviene únicamente de fuentes renovables

En el primer escenario se considera la flota de autobuses del año 2014 con el objeto de caracterizar la situación de partida para posteriormente compararla con los demás escenarios que buscan la mejora de las prestaciones medioambientales y en concreto la disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera por dicho servicio público.

Se han considerado los escenarios de tecnologías completamente diésel y completamente GNC para construir una situación en la cual no se hubiesen cambiado los combustibles fósiles convencionales, pero sí se hubiesen hecho mejoras en los vehículos.

También se han considerado dos escenarios eléctricos, para contrastar las diferencias de impacto entre la situación actual, los combustibles convencionales y la electricidad como fuente de energía, teniendo en cuenta las limitaciones que se comentan a continuación.

Unidad funcional

La unidad funcional es un parámetro de referencia que sirve para comparar los resultados de cada escenario con el resto.

En este trabajo se toma como unidad funcional el conjunto de la flota de autobuses que prestan servicio en la ciudad de Madrid al año. Así, se evalúa el impacto asociado a los 1907 vehículos que componen la flota en un año, prestando el mismo servicio que en el año de referencia, e introduciendo la posible vida útil de los distintos vehículos considerados en los distintos escenarios.

Finalidad del trabajo

El trabajo tiene como finalidad completar un TFG (Trabajo Fin de Grado), por lo que el público al que va dirigido son la comunidad académica y el Ayuntamiento de Madrid, debido a que las conclusiones pueden servir para valorar que escenario es el más adecuado para reducir aquellos impactos con gran relevancia en el sector del transporte y además, mejorar la calidad del aire en la ciudad de Madrid.

El objetivo final del trabajo reside en presentar las mejores alternativas para un futuro más sostenible para la ciudad de Madrid en términos de movilidad pública, sin embargo, existen algunas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta para no confundir los resultados.

Limitaciones

En primer lugar, no se han considerado las emisiones asociadas a los procesos anteriores a la propia producción de la fuente energética, ya sean combustibles fósiles o electricidad.

El escenario que contempla vehículos que consumen electricidad procedente de una generación 100% renovable, se ha propuesto con objeto de observar la disminución del impacto si se contase con un mix eléctrico 100% renovable. Aunque no se han definido las tecnologías que lo formarían ni en qué proporción.

Por falta de información, el ciclo de vida del vehículo se ha considerado igual en todos y cada uno de los escenarios planteados, lo que, sin duda, es una importante limitación. Existen grandes diferencias en el proceso de fabricación, dado que, por ejemplo, no se han tenido en cuenta las emisiones asociadas a la fabricación de las baterías de los autobuses eléctricos, tampoco las diferencias entre un autobús diésel o de gas natural.

Se han utilizado documentos oficiales tanto para los factores de emisión como para el parque circulante de años distintos y no se han tenido en cuenta las pequeñas diferencias

que se hayan podido producir de un año para otro. Y con respecto a los factores de emisión, en el caso del SO₂, algunos documentos se referían a SO_x en vez de SO₂. El SO_x considera las emisiones de SO₂ y SO medidas como SO₂. En el trabajo se han considerado todas las emisiones de SO_x como SO₂.

Por último, es de vital importancia mencionar que se han comparado tecnologías de reducción de emisiones no equivalentes para todos los combustibles. Mientras que para el diésel existen datos de la última tecnología EURO VI, para el gas natural no. Para los autobuses de GNC se han utilizado los factores de emisión de la tecnología EEV ("*Enhanced Environmental-Friendly Vehicles: vehículos ecológicamente mejorados*") introducida en 2009, 4 años anterior a la tecnología EURO VI.

3.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

3.2.1 Ciclo de vida del vehículo: fase de fabricación y mantenimiento

Esta parte del ICV contabiliza las emisiones que se producen en la fabricación y el mantenimiento de un autobús durante toda su vida útil.

Esta fase contabiliza las emisiones propias de la fabricación del vehículo, es decir, los materiales y el consumo de energía que se originan en dicha fase. También incluye las emisiones que se producen en el desmantelamiento del autobús. El mantenimiento incluye todas aquellas operaciones realizadas en toda su vida útil. Para obtener todos los datos referidos a la unidad funcional "flota de autobuses año", solo habría que dividir los datos de emisiones en la fase de fabricación y mantenimiento del vehículo por el valor de vida útil de los vehículos, establecida en 8,1 años según *AM (2013)*.

Para la obtención de los datos referentes a las emisiones relacionadas con la fabricación y mantenimiento del vehículo se ha utilizado el programa *SimaPro 8.4.0. (Pré, 2018)*. SimaPro es una herramienta informática que se utiliza para la realización de ACV y para ello cuenta con distintas bases de datos como *EcoInvent*, con gran cantidad de información sobre emisiones de distintos procesos unitarios.

Se han diferenciado dos procesos unitarios, uno para la fabricación del autobús y otro para su mantenimiento. De dicha herramienta informática, se han obtenido los valores de emisión de CH₄, N₂O, CO₂, CO, COVNM, NO_x, SO₂ y PM_{2,5}, causantes de los impactos ambientales considerados en este trabajo.

3.2.2 Ciclo de vida del combustible: *well to tank (WtT)*

Esta fase contabiliza las emisiones asociadas a las operaciones de obtención, distribución y transporte de la fuente de energía consumida hasta la llegada de la unidad de energía a la disposición del ciudadano. Es decir, aquellas asociadas a la extracción del combustible y su transporte hasta el depósito del vehículo para el caso del diésel y GNC, y en el caso de la electricidad las emisiones asociadas a las centrales de producción de energía eléctrica al transformar la energía primaria en la electricidad que llega a los autobuses.

Para calcular las emisiones de esta fase se necesitan los datos de consumo de GNC, diésel, energía eléctrica y de cómo son producidos, junto con sus factores de emisión.

En primer lugar se calculan los consumos energéticos asociados a las operaciones de obtención, transporte y distribución de las fuentes energéticas consumidas por los autobuses. Estos consumos se calculan a partir de los datos del balance energético de la EMT (AM, 2014a) y los recorridos de la flota de autobuses en 2014 (AM, 2014b). Estos datos están recogidos en las *Tablas 4 y 5* respectivamente:

Tabla 4: Balance energético de la EMT, 2014. Fuente: AM, 2014a.

Balance energético			
	Fuente energética		
Autobuses	Gasóleo	GNC	Electricidad
	Litros	Kilogramos	kWh
	30 297 256	22 964 337	351 353

Tabla 5: Recorridos escenario actual, 2014. Fuente: AM, 2014b.

Tecnología	Nº de vehículos	Recorrido (km)
EURO III	216	11 547 105
EURO IV	331	18 491 709
EURO V	547	42 031 602
EEV	793	33 025 898
Eléctrico	20	328 917
TOTAL	1 907	105 425 233

Con los datos de las *Tablas 4 y 5* se calculan los consumos en términos energéticos de la fase WtT, tal y como se recoge a continuación:

GNC y Diésel

El consumo energético en la fase WtT se calcula según la *Ecuación 1*:

$$\text{Consumo en la fase WtT} = \text{PCI} \cdot \text{M} \cdot \text{Ratio consumo WtT}$$

(*Ecuación 1*)

Donde:

PCI: Poder calorífico inferior del combustible (MJ/kg).

M: Masa del combustible (kg).

Ratio consumo WtT: energía consumida desde la extracción del combustible hasta su llegada al depósito del vehículo. Es decir, la energía que se consume en las operaciones WtT para que al depósito llegue 1 MJ de combustible.

En el caso del GNC:

- PCI (GNC) = 48,59 MJ/kg (*EMT, 2014a*)
- Masa (M) = 229 64 337 kg/año (*EMT, 2014a*)
- Ratio consumo WtT = 0,14MJ de energía/MJ GNC (*López et al., 2009*)

Por tanto el consumo energético en la fase WtT del GNC en el escenario actual, según la *Ecuación 1* es: 156,22 TJ/año. De este consumo energético, se supone que la mitad se corresponde con energía térmica y la otra mitad con energía eléctrica. A su vez, se supone que la energía térmica se produce por combustión de gasóleo en calderas de combustión.

Para el escenario con toda la flota GNC el cálculo de consumo de energía, esta vez toda térmica se hace mediante una relación entre el valor de energía consumida en la fase WtT (156,22 TJ/año) y los recorridos asociados a los autobuses GNC en el escenario actual según la *Ecuación 2*:

$$\frac{C793}{R793} = \frac{x}{R1907}$$

(*Ecuación 2*)

Donde:

C793: Consumo de energía de los 793 autobuses EEV del escenario actual: 156,22 TJ/año (AM, 2014a).

R793: Recorrido de los 793 autobuses EEV en el escenario actual: 33 025 898 km/año (AM, 2014b).

R1907: Recorrido total de todos los autobuses (igual para todos los escenarios): 105 425 233 km/año (AM, 2014b).

x : Es el consumo de energía de toda la flota GNC: 498,7 TJ/año.

En el caso del diésel:

- PCI (diésel) = 43,33MJ/kg (EMT, 2014a)
- Ratio consumo WtT = 0,119 MJ de energía/MJ diésel (López et al., 2009)

Para transformar el volumen de diésel de la *Tabla 4* para el escenario actual en unidades de masa se utiliza la *Ecuación 3*:

$$M = V \cdot \rho$$

(Ecuación 3)

Donde:

M: masa de combustible (kg)

V: Volumen (L)

ρ : Densidad (kg/L)

- Densidad (ρ) = 0,845 kg/L (AM, 2014a)
- Volumen (V) = 30 297 265 L (AM, 2014a)
- Masa (M) = 25 601 189 kg

Por tanto, el consumo energético asociado a la fase WtT para el diésel al año según la *Ecuación 1* y la *Ecuación 3* en el escenario actual es: 132 TJ/año. En este caso también se supone que la mitad de ese consumo corresponde a energía térmica y la otra mitad a energía eléctrica.

Para el escenario con toda la flota diésel el cálculo de consumo de energía, otra vez toda térmica se hace mediante una relación entre el valor de energía consumida en la fase WtT (132 TJ/año) y los recorridos asociados a los autobuses diésel en el escenario actual, con la *Ecuación 4*:

$$\frac{C1094}{R1094} = \frac{x}{R1907}$$

(*Ecuación 4*)

Donde:

C1094: Consumo de energía térmica por los 1904 autobuses diésel: 132 TJ/año (*AM, 2014a*).

R1094: Recorrido de los 1904 autobuses diésel (todas las tecnologías) en el escenario actual: 72 070 416 km/año (*AM, 2014b*).

R1907: Recorrido total de todos los autobuses (igual para todos los escenarios): 105 425 233 km/año (*AM, 2014b*).

x : Es el consumo de energía de toda la flota diésel EURO VI: 193,1 TJ/año.

Energía eléctrica

El consumo de electricidad por parte de los autobuses se obtiene de 3 maneras distintas para los 3 escenarios que incluyen tecnologías eléctricas (escenario actual, escenario renovable y escenario MixEléctrico).

➤ Escenario actual:

En este escenario no es necesario calcular el consumo de electricidad por parte de los autobuses eléctricos en el escenario actual puesto que es un dato del balance energético de la EMT del año 2014. Dicho consumo es 351 353 kWh. (*AM, 2014a*). Este dato es un dato de consumo, con lo cual debería incluirse en la fase TtW, sin embargo, no emite emisiones en dicha fase sino que las emite en el proceso de generación de la energía eléctrica y por tanto se va a incluir en la fase WtT y se va a contabilizar junto con la energía eléctrica correspondiente a la mitad del consumo energético del diésel y GNC.

➤ Escenario renovable

El escenario renovable no computa ninguna emisión de ningún contaminante en la fase WtT ni en la fase TtW debido a que se considera que toda la energía eléctrica es de origen renovable (salvo la emisión de PM en la fase TtW, debido a la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento).

➤ Escenario MixEléctrico:

Para el escenario con toda la flota eléctrica cuyo origen de la electricidad es el mix de tecnologías de 2016 (representado en la *Figura 16*), se van a necesitar el dato de consumo de electricidad de los autobuses del año 2014, (como ya se ha dicho en el escenario actual este consumo se produce en la fase TtW aunque no se emita ningún contaminante, sino que los contaminantes se emiten en la fase WtT), los recorridos del año 2014 (*Tablas 4 y 5*). Se calcula la energía eléctrica necesaria al año mediante la *Ecuación 5*:

$$\frac{C20}{R20} = \frac{x}{R1907}$$

(*Ecuación 5*)

Donde:

C20: Consumo eléctrico para los 20 autobuses eléctricos: 351 353 kWh/año (*AM, 2014a*)

R20: Recorrido total por los 20 autobuses eléctricos: 328 917 km/año (*AM, 2014b*)

R1907: Recorrido total de todos los autobuses: 105 425 233 km/año (*AM, 2014b*)

x : Es el consumo de energía de toda la flota eléctrica: 405,4 TJ/año.

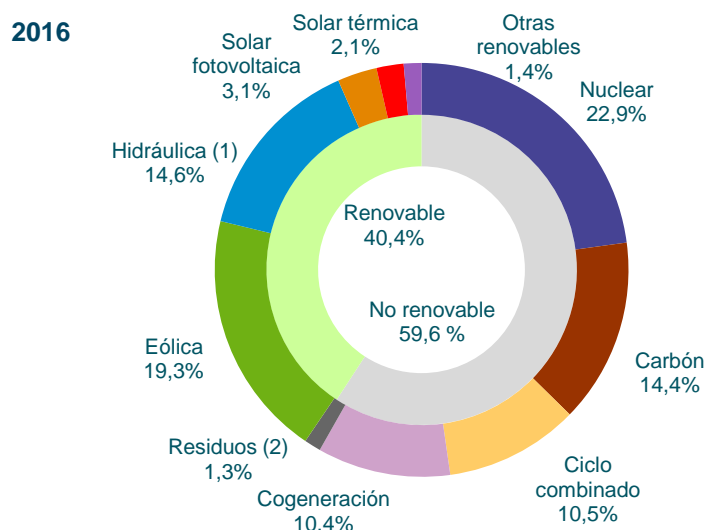


Figura 16: Distribución de la producción de energía eléctrica año 2016. Fuente: REE 2016.

En este momento, con los datos obtenidos de consumo, se calcularían las emisiones de la fase WtT, dentro del ciclo de vida del combustible, para todos los escenarios considerados a partir de la *Ecuación 6*:

$$\text{Emisiones} = \text{Consumo energético de la fase WtT} \cdot \text{Factores de emisión}$$

(Ecuación 6)

Donde:

Consumo energético de la fase WtT: consumo de energía en MJ/año según la fuente energética.

Factores de emisión: datos de la recogidos en la *Tabla 6* (g/MJ consumido).

Tabla 6: Factores de emisión empleados en la fase WtT. Fuente: MAPAMA,2016 y EEA, 2016.

Combustible	Factores de emisión									
	(g/MJ consumido)	SO _x	NO _x	COVNM	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM _{2,5}
Energía eléctrica		0,173	0,265	0,0122	0,0276	0,062	82,147	0,0021	-	0,006
Energía térmica		0,047	0,01	0,015	0,00017	0,01	73	0,0007	-	0,005

3.2.3 Ciclo de vida del combustible: *Tank to wheel (TtW)*

La fase de uso (TtW) se refiere a la fase en la que los autobuses transforman la energía de la fuente energética en energía mecánica.

En esta ocasión los datos de factores de emisión se han obtenido de la Agencia Europea del Medio Ambiente concretamente de su libro guía 2016, metodología EMEP/EEA (*European Monitoring and Evaluation Programme/European Environment Agency*) (EEA, 2016), y del programa COPERT 4.11.3.

De acuerdo a EEA (2016), para este tipo de vehículos (con peso superior a 3,5 toneladas con motores diésel) las emisiones se reglamentaron por primera vez en 1988 con la introducción del Reglamento ECE 49. Los vehículos (o más bien, los motores) que cumplen con ECE 49 y anteriores se clasifican como 'convencionales'. La Directiva 91/542 / CEE trajo dos conjuntos de límites de emisión reducidos, válidos de 1992 a 1995 EURO I y de 1996 a 2000 EURO II.

La Directiva 1999/96 / CE, implemento otro límite EURO III, válida a partir del año 2000 que introdujo una reducción del 30% de todos los contaminantes en relación con EURO II. La misma Directiva incluía en 2005 el límite EURO IV y en 2008 el límite EURO V.

Los estándares EURO V son muy estrictos, y requieren una reducción de NO_x de más del 70% y una reducción en PM de más del 85% en comparación con los estándares de EURO II. Esto se logra con el ajuste del motor y los catalizadores de oxidación para el control de PM, y la reducción catalítica selectiva (SCR) para el control de NO_x.

Los últimos límites de emisión del nivel EURO VI se han aplicado desde el período 2013/14. Estos requieren una reducción del 50% en PM y una reducción adicional del 80% en NO_x sobre EURO V, con la adición de un ciclo de arranque en frío, lo cual requiere el uso de filtros de partículas diésel, ajuste del motor, EGR para bajar las emisiones de NO_x a la salida del motor, y un post-tratamiento específico de los gases de escape de NO_x, (generalmente SCR, utilizando urea como agente reductor).

En el caso de los autobuses propulsados por GNC solo se ha tenido en cuenta la tecnología EEV ("*Enhanced Environmental-Friendly Vehicles*: vehículos ecológicamente mejorados") introducidos en 2009. (EEA, 2016)

En esta fase se van a incluir las emisiones de material particulado procedentes de la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento. Estas emisiones solo dependen del peso del vehículo y por consiguiente se podrían incluir en la fase de fabricación del vehículo, sin embargo, se emiten en la fase TtW cuando los autobuses circulan por la calzada. Por este motivo se van a incluir en la fase de uso del combustible (TtW)

En esta metodología se pueden obtener los factores de emisión de acuerdo a tres aproximaciones distintas, en función de la calidad y el nivel de desagregación de la información disponible: TIER 1, TIER 2 y TIER 3. La *Figura 15* muestra los criterios que rigen la selección de uno u otro. Se han usado los tres métodos en función de la información disponible. Cuando se disponía de información muy detallada y específica se ha utilizado TIER 3. En este trabajo solo se ha podido utilizar para el CH₄. Para el resto de contaminantes, salvo el CO₂ y SO₂, se ha podido utilizar TIER 2. Y por último el TIER 1 se ha usado para el caso de CO₂ y SO₂ dado que sus emisiones dependen del combustible y no tanto de la tecnología por lo que es suficiente el nivel de desagregación TIER 1.

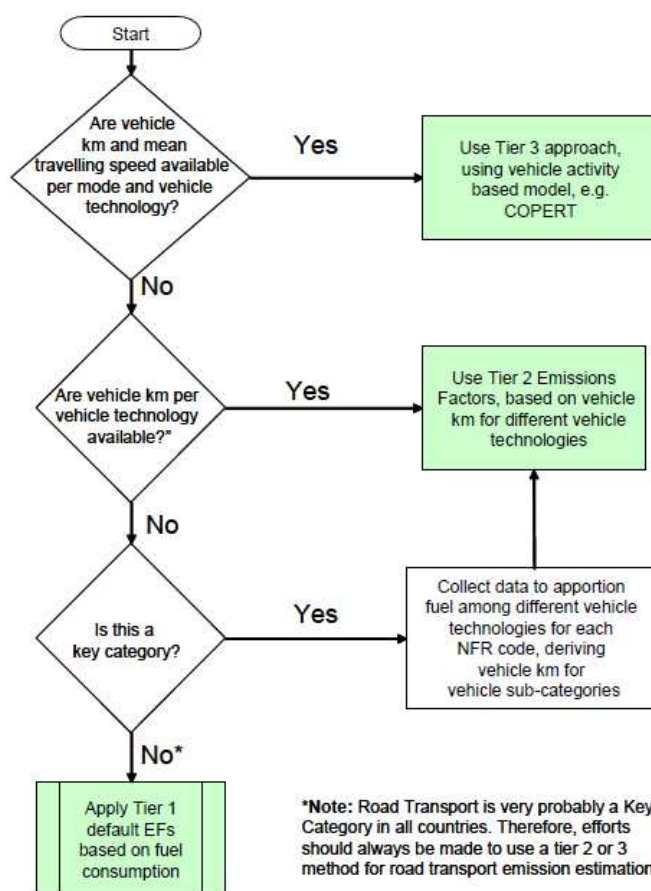


Figura 17: Árbol de decisión para las emisiones de escape del transporte por carretera. Fuente: EEA, 2016.

Nivel de desagregación TIER 2

Los factores de emisión de los contaminantes CO, COVNM, NO_x, N₂O, NH₃ y PM_{2,5} se han obtenido de las tablas de TIER 2. Dichas emisiones se han calculado a partir de la *Ecuación 7*:

$$\text{Emisiones} = \text{FE} \cdot \text{Recorridos}$$

(*Ecuación 7*)

Donde:

Emisiones: representan las emisiones de los contaminantes en cuestión expresadas en (g/año)

FE: Factores de emisión de los diferentes contaminantes en (g/km). *Tabla 7. (EEA, 2016).*

Recorridos: recorridos según tecnologías recogidos en la *Tabla 5* en (km/año). (*EMT, 2014b*).

Tabla 7: Factores de emisión. Fuente: EEA, 2016.

Tecnologías		Factores de emisión					
		CO	COVNM	NO _x	N ₂ O	NH ₃	PM _{2,5}
		g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km
Autobús GNC	EEV	1,000	0,045	2,500	-	-	0,005
Autobús diésel	EURO II	2,440	0,463	10,700	0,120	0,029	0,220
	EURO III	2,670	0,409	9,380	0,001	0,029	0,207
	EURO IV	0,223	0,022	5,420	0,012	0,029	0,046
	EURO V	0,223	0,022	3,090	0,032	0,029	0,046
	EURO VI	0,223	0,220	0,597	0,040	0,029	0,002

La emisión de material particulado procedente de la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento se calcula con la *Ecuación 7*. Y en este caso los factores de emisión son iguales para todas las tecnologías, puesto que solo depende del peso del vehículo y en este trabajo se ha considerado el mismo vehículo para todos los escenarios. El factor de emisión es el siguiente: 0,0205 g/km recorrido (*EEA, 2016*).

Nivel de desagregación TIER 1

Los factores de emisión del CO₂ y SO₂ se han calculado con TIER 1, mediante la Ecuación 8:

$$FE^* = FE \cdot \text{Consumo}$$

(Ecuación 8)

Donde

FE*: factores de emisión de los diferentes contaminantes expresados en g/km.

FE: Factores de emisión de los diferentes contaminantes (Tabla 8) para el caso del CO₂ (en g CO₂/g combustible) y (Tabla 9) para el SO₂ (en g SO₂/g combustible).

Consumo: consumo de combustible por kilómetro recorrido (Tabla 10).

Tabla 8: Emisiones de CO₂ por consumo de combustible. Fuente: EEA, 2016.

Combustible	Factores de emisión
	g CO ₂ /g combustible
GNC	2,75
Diésel	3,14

Tabla 9: Emisiones de SO₂ por consumo de combustible. Fuente: EEA, 2016.

Combustible	Factores de emisión
	g SO ₂ /g combustible
GNC	7,25E-06
Diésel	7,97E-06

Tabla 10: Consumos de combustible por tecnología (g combustible/km). Fuente: EEA, 2016.

Combustible	Factor de consumo
	g combustible/km
GNC	500,0
Diésel	240,0

Para posteriormente calcular las emisiones según la *Ecuación 9*:

$$\text{Emisiones} = \text{FE}^* \cdot \text{Recorridos}$$

(*Ecuación 9*)

Donde:

Emisiones: representan las emisiones de los contaminantes en cuestión expresados en (g/año).

FE*: factores de emisión de los diferentes contaminantes expresados en g/km. (EEA, 2016)

Recorridos: recorridos según tecnologías expresados en (km/año) (EMT, 2014b)

Nivel de desagregación TIER 3

Y por último el factor de emisión correspondiente al CH₄ se ha obtenido mediante TIER 3 con el programa COPERT 4.11.3.

COPERT es un programa informático que calcula las emisiones de los contaminantes atmosféricos de acuerdo a los algoritmos de cálculo del TIER 3 de la metodología EMEP/EEA.

El valor de dicho factor de emisión expresado en g/km se recoge en la *Tabla 11*:

Tabla 11: Factores de emisión de CH₄ de la fase TtW. Fuente: COPERT 4.11.3

Tecnologías		Factor de emisión
		CH ₄ g/km
Autobús GNC	EEV	0,175
Autobús diésel	EURO II	0,175
	EURO III	0,175
	EURO IV	0,114
	EURO V	0,103
	EURO VI	0,175

3.3 Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV)

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este trabajo es analizar qué escenario o qué tecnología de autobús es la más respetuosa con el medio ambiente, es decir aquella que permita disminuir al máximo los impactos.

Una vez se recopilasen todos los datos de emisiones de todas las fases y para cada escenario, se procedería a su agrupación para calcular los impactos ambientales en las unidades equivalentes correspondientes. Para ello se ha utilizado la *Metodología ILCD 2011 Midpoint+* propuesta por la Unión Europea en 2011.

Las categorías de impacto que se han estudiado son: cambio climático, acidificación, eutrofización terrestre, formación de ozono troposférico y formación de material particulado porque son aquellas relacionadas con las emisiones de contaminantes atmosféricos más relevantes del sector de transporte rodado. Para cada impacto se reúnen los contaminantes asociados y se multiplican por los factores de caracterización correspondientes para convertir las emisiones de cada contaminante en la unidad de cada categoría de impacto.

La *metodología ILCD 2011 Midpoint+* indica cuales son los compuestos asociados a cada categoría de impacto junto con sus factores de caracterización y las unidades en las que se mide cada impacto (*Tabla 12*).

Tabla 12: Descripción de las categorías de impacto. Fuente: EC-JRC-IES, 2012.

Categoría de impacto	Unidad del indicador de categoría	Compuestos	Factor de caracterización (unidad del indicador de categoría/kg de contaminante)
Cambio climático	kg de CO ₂ equivalente	CO ₂	1
		CH ₄	25
		N ₂ O	298
Acidificación	moles de H ⁺ equivalente	NO _x	0,74
		NH ₃	3,02
		SO ₂	1,31
Eutrofización terrestre	moles de N equivalente	NO _x	4,26
		NH ₃	13,5
Formación de ozono troposférico	kg de COVNM equivalente	NO _x	1
		COVNM	1
Formación de material particulado	kg de PM _{2,5} equivalente	NO _x	0,00722
		NH ₃	0,667
		CO	0,000356
		PM	1
		SO ₂	0,0611

4. Resultados

4.1 Escenario actual (2014)

El escenario actual está formado por 216 autobuses de tecnología diésel EURO III, 331 EURO IV, 547 EURO V, 793 de GNC de tecnología EEV y 20 autobuses eléctricos.

En primer lugar, se van a recoger las emisiones propias del ACV del vehículo durante toda su vida útil según se ha calculado con el programa *SimaPro8.4.0*. (Pré, 2018) para un autobús. Se hace una distinción entre la fabricación del autobús y su mantenimiento durante toda la vida útil, y definidos según la unidad funcional en kg de contaminantes por flota de autobuses (1907 autobuses/año). Quedando recogidos en la *Tabla 13* y *Tabla 14* respectivamente.

Tabla 13: Emisiones asociadas a la fabricación de un autobús. Fuente: SimaPro8.4.0. (Pré, 2018).

Emisiones								
Fabricación								
t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	t/año	t/año
CO	COVNM	NO _x	N ₂ O	NH ₃	CO ₂	SO ₂	PM _{2,5}	CH ₄
61,48	8,54	20,55	0,216	0,609	7,348	34,43	29,85	26,2

Tabla 14: Emisiones asociadas al mantenimiento de un autobús. Fuente: SimaPro8.4.0. (Pré, 2018).

Emisiones								
Mantenimiento								
t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	t/año	t/año
CO	COVNM	NO _x	N ₂ O	NH ₃	CO ₂	SO ₂	PM _{2,5}	CH ₄
7,045	3,52	4,8	0,23	0,226	2,659	0,000728	4,57	8,51

En segundo lugar, se calculan las emisiones relativas a las sub-etapa WtT dentro de la fase del ciclo de vida del combustible y se expresa en términos de unidad funcional (emisiones totales de la flota/año).

Para ello se necesitan los datos de energía consumida eléctrica y térmica, mostrados en la *Tabla 15*.

Como ya se ha comentado el consumo de energía eléctrica por parte de los autobuses del escenario actual es un dato del balance energético de la EMT del año 2014. Dicho consumo es 351 353 kWh. (AM, 2014a). Este dato es un dato de consumo, con lo cual debería incluirse en la fase TtW, sin embargo, no genera emisiones en dicha fase sino que las emite en el proceso de generación de la energía eléctrica y por tanto se va a incluir en la fase WtT.

Por esta razón se distingue en las *Tablas 15 y 16* dos energías consumidas eléctricas. Una procedente del consumo propio de electricidad por los autobuses eléctricos (TtW) y la otra correspondiente a la mitad de la energía consumida por el GNC y diésel en la fase WtT.

Tabla 15: Consumos de energía eléctrica y térmica de toda la flota de autobuses de la EMT en 2014. Fuente: EMT, 2014a.

Energía consumida eléctrica WtT (TJ)	
	144,1
Energía consumida térmica (TJ)	
	144,1
Energía consumida eléctrica TtW (TJ)	
	1,27

Posteriormente se calculan las emisiones de la fase WtT (*Tabla 16*):

Tabla 16: Emisiones procedentes del consumo de energía eléctrica y térmica en fase WtT. Fuente: MAPAMA, 2016.

Emisiones									
	SO _x	NO _x	COV NM	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM _{2,5}
	t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	t/año	t/año
E. Térmica	6,77	1,44	2,16	0,0245	1,44	10,520	0,10	-	0,72
E. Eléctrica (WtT)	24,93	38,19	1,76	3,98	8,93	11,838	0,30	-	0,86
E. Eléctrica (TtW)	0,22	0,34	0,02	0,035	0,078	0,104	0,0026	-	0,01
SUMA	31,92	39,96	3,94	4,047	10,45	22,462	0,41	-	1,59

Y por último quedan las emisiones relativas a la fase de uso de la fuente energética por parte de los autobuses (TtW), *Tabla 17*:

Tabla 17: Emisiones de la fase TtW de toda la flota de la EMT del año 2014. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones									
Tecnología	CO	NMVOC	NO _x	N ₂ O	NH ₃	CO ₂	SO ₂	PM _{2,5}	CH ₄
	t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	kt/año	t/año
EURO III	30,8	4,72	108,31	0,01	0,33	10,913	0,06	2,164	2,02
EURO IV	4,12	0,41	100,23	0,22	0,54	17,477	0,09	2,162	2,10
EURO V	9,37	0,92	129,88	1,35	1,22	39,726	0,20	2,163	4,34
EEV	33,03	1,49	82,56	0,00	0,00	41,324	0,16	2,161	5,78
Eléctrico	-	-	-	-	-	-	-	2,161	-
TOTAL	77,35	7,54	420,98	1,58	2,09	109,440	0,50	10,811	14,24

Una vez calculadas todas las emisiones de cada una de las fases del ciclo de vida se procede al cálculo de impactos. Para ello los valores de emisiones relacionados con cada impacto se multiplican por los factores de conversión establecidos en la *Tabla 12* y finalmente se agrupan por fases de forma que se obtienen las unidades de impacto totales para cada uno.

Las emisiones en unidades de impacto se recogen en las *Tablas 18 a 22* y el peso de cada fase y de cada contaminante para cada impacto estudiado se expresa en las *Figuras 18 a 27*.

Cambio climático

Tabla 18: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario actual. Elaboración propia.

Emisiones de cambio climático (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
CH₄	26,2	8,5	14,2	4,037	25
N₂O	0,216	0,231	1,58	0,406	298
CO₂	7 347,9	2 658	109 440	22 462	1
TOTAL(t CO₂ eq)	8 067,41	2 940	110 266	22 684	

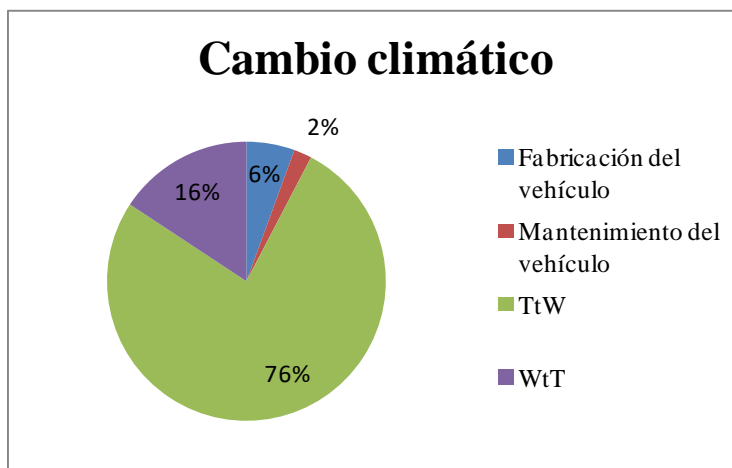


Figura 18: Contribución por fases al impacto de cambio climático del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

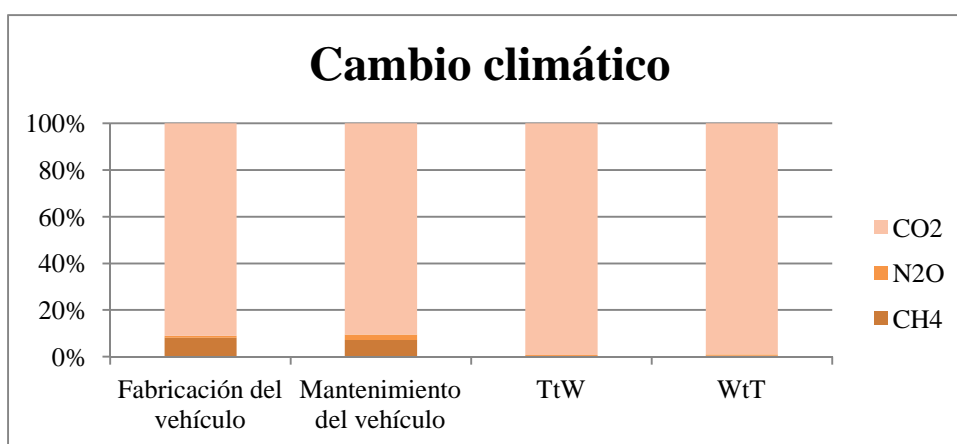


Figura 19: Peso de contaminantes en el escenario actual, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

La fase predominante del escenario actual en el cambio climático es la fase TtW, con un 76 % seguida de la fase WtT.

Y en la *Figura 19* se observa que el contaminante mayoritario en todas las fases es el CO₂. Porque a pesar de tener el menor factor de conversión, es el contaminantes más emitido en todas las fases.

Ozono troposférico

Tabla 19: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de ozono troposférico (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
COVNM	8,54	3,52	7,54	3,94	1
NO _x	20,6	4,8	421	39,97	1
TOTAL(t COVNM eq)	29,1	8,32	428,5	43,9	

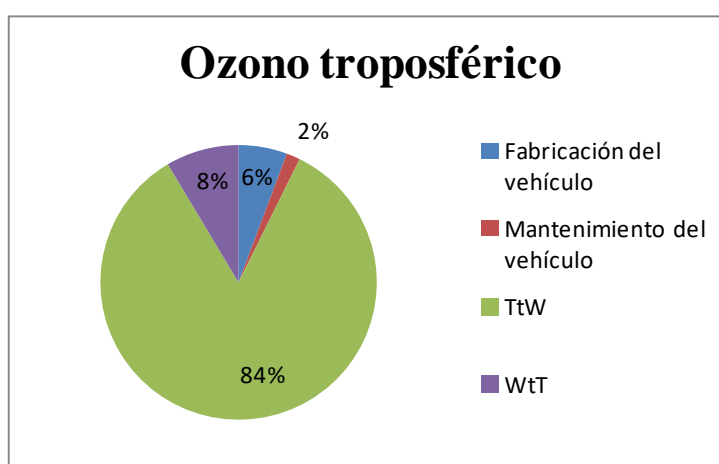


Figura 20: Contribución por fases al impacto de ozono troposférico del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

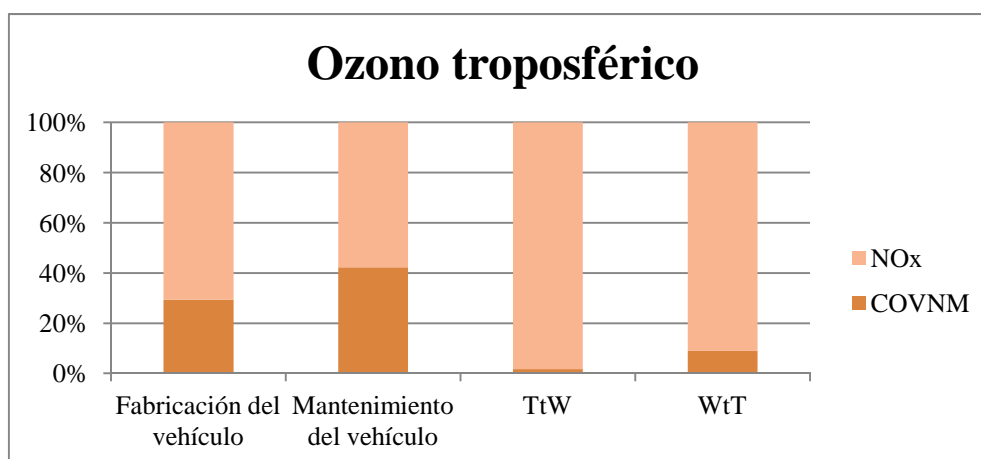


Figura 21: Peso de contaminantes en el escenario actual, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

En el impacto de ozono troposférico, la fase TtW contribuye en un 84 %, con lo cual sigue siendo la predominante. La *Figura 21* muestra que el NO_x es el contaminante

mayoritario aunque los COVNM suponen un 30 y 40 % en las fases de fabricación y mantenimiento del vehículo respectivamente.

Acidificación

Tabla 20: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Acidificación (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,6	4,8	420,98	39,97	0,74
NH₃	0,609	0,23	2,09	0	3,02
SO₂	34,43	0,00073	0,504	31,92	1,31
TOTAL(kmol H+ eq)	62,15	4,24	318,5	71,4	

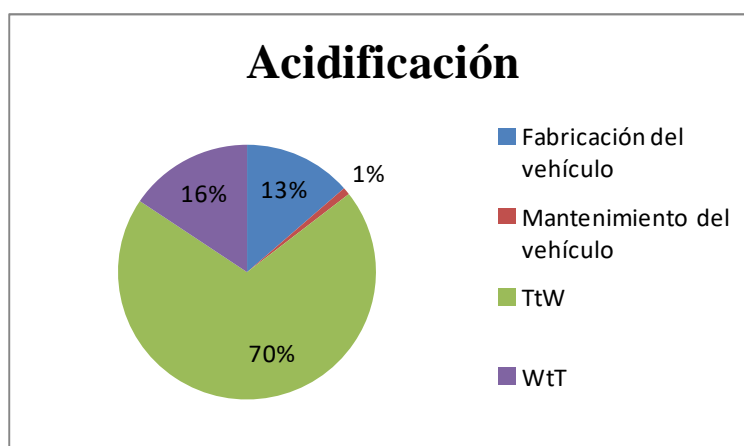


Figura 22: Contribución por fases al impacto de acidificación del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

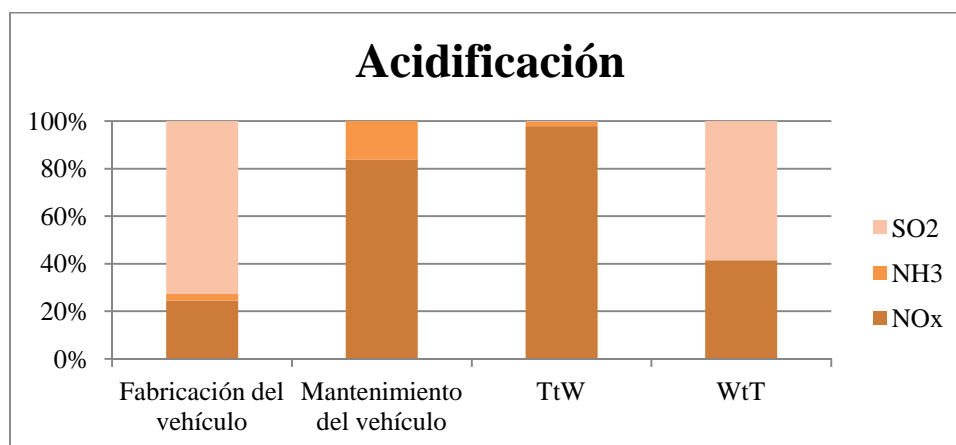


Figura 23: Peso de contaminantes en el escenario actual, acidificación. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al impacto de acidificación, la fase que más contribuye sigue siendo la fase TtW con un 70 % de contribución. Las fases de WtT y fabricación del vehículo se sitúan en el segundo puesto con un 16 y 13 % respectivamente.

El NO_x es el contaminante predominante en las fases de mantenimiento del vehículo y TtW a pesar de tener el menor factor de conversión. En la fabricación del vehículo el contaminante mayoritario es el SO_2 . Y en la fase WtT el SO_2 y NO_x .

Eutrofización

Tabla 21: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de eutrofización (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NH_3	0,61	0,23	2,09	0	13,5
NO_x	20,6	4,8	420,98	39,97	4,26
TOTAL(kmol N eq)	95,8	23,52	1 821,6	170,26	

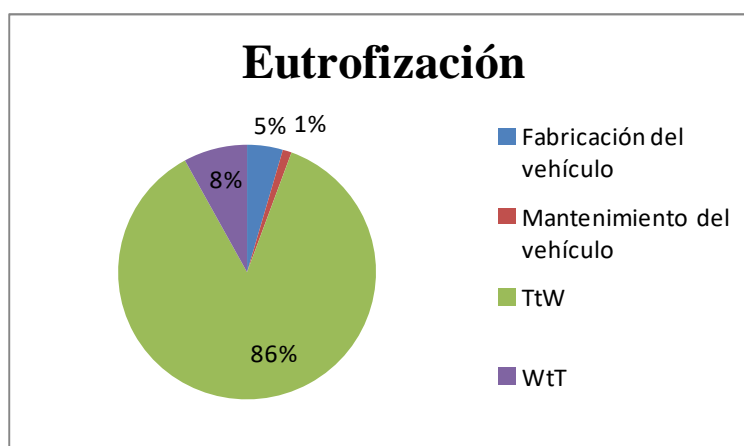


Figura 24: Contribución por fases al impacto de eutrofización del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

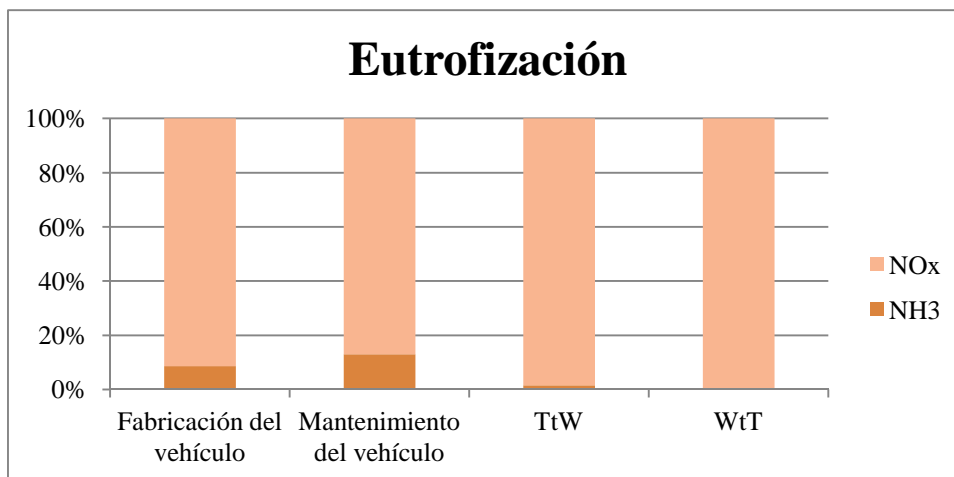


Figura 25: Emisiones en el escenario actual por contaminante, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.

La fase TtW alcanza el mayor porcentaje de contribución en el impacto de eutrofización llegando al 86 %. Además el contaminante principal es el NO_x en todas las fases debido a que se emite en mayor medida a pesar de que tiene un factor de conversión menor que el NH₃.

Material particulado

Tabla 22: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Material particulado (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	420,98	39,97	0,00722
NH₃	0,608	0,226	2,1	-	0,0667
SO₂	34,43	0,00073	0,504	31,92	0,0611
PM_{2,5}	29,85	4,57	2175,7	1,59	1
CO	7347,9	7,05	77,35	2,3	0,000356
TOTAL(t PM_{2,5} eq)	34,76	4,62	2178,9	3,83	

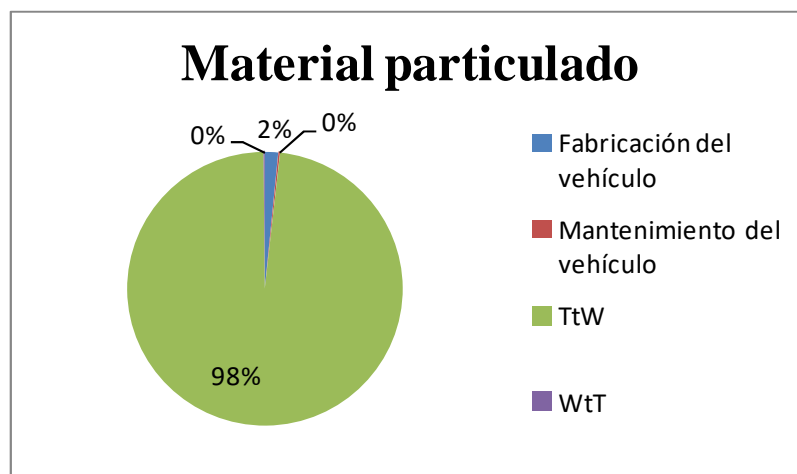


Figura 26: Contribución por fases al impacto de material particulado del escenario actual. Fuente: Elaboración propia.

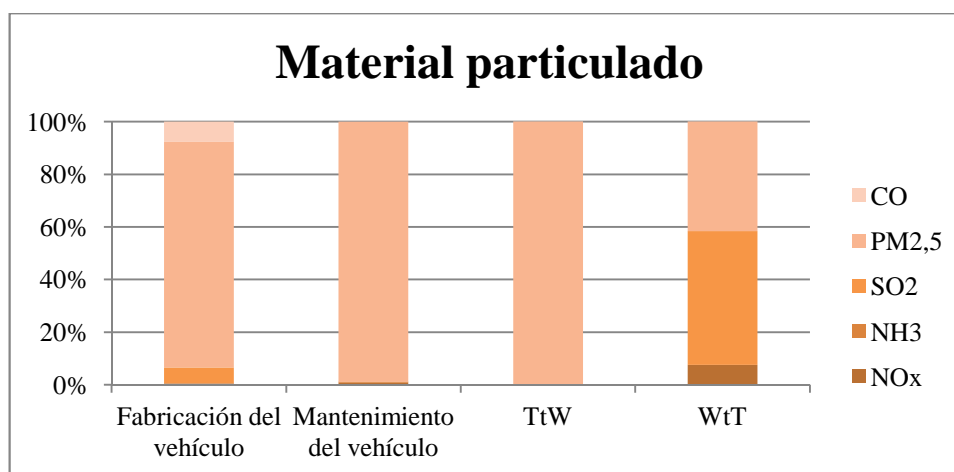


Figura 27: Emisiones en el escenario actual por contaminante, material particulado. Fuente: Elaboración propia.

En el material particulado la fase de uso es la mayoritaria debido a que se incluyen las emisiones de partículas procedentes de la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento, que como ya se ha comentado solo depende del peso del vehículo. Pero en este trabajo se han incluido en la fase TtW.

El contaminante mayoritario es PM_{2,5} salvo en la fase WtT, en la cual el mayor contaminante es el SO₂.

Se puede observar que en este escenario en todos los impactos estudiados, la fase TtW es la que más contribuye. Por otro lado la fase de mantenimiento es la que menos aporta, puesto que es la fase más pequeña en el tiempo. La fase WtT es relevante en los impactos climático y acidificación, pero no demasiado puesto que un 63,3 % de la energía tiene origen no fósil (Figura 16) y no produce emisiones contaminantes en dicha fase.

4.2 Escenario diésel

Este escenario está formado en su totalidad por autobuses diésel, es decir los 1907 autobuses que formaban la situación actual son diésel EURO VI.

En este escenario también se van a recoger las emisiones propias del análisis del ciclo de vida del vehículo durante toda su vida útil según se ha calculado con *SimaPro 8.4.0* (Pré, 2018) para un autobús. Aunque como ya se ha comentado, en todos los escenarios se va considerar el mismo modelo de autobús, por lo que las emisiones referentes a la fabricación y mantenimiento van a ser las mismas en todos los escenarios. Dichas emisiones se mantienen a lo largo de todos los escenarios y se han representado en las *Tablas 13 y 14*.

Para las emisiones de la fase de ciclo de vida del combustible, en este caso diésel, existe una diferencia con respecto al escenario anterior. En el escenario actual (2014) se ha considerado que la mitad de la energía consumida en la sub-etapa WtT se corresponde a energía eléctrica y la otra mitad a energía térmica. En este escenario como el único combustible es el diésel, se considera que toda la energía que se consume es energía térmica. Por lo que solo son necesarios los factores de emisión correspondientes a la energía térmica (*Tabla 6*).

La energía total consumida en la fase WtT para toda la flota de autobuses diésel EURO VI es 193,1 TJ. Las emisiones de dicha fase se calculan multiplicando el total de energía consumida por los factores de emisión de diésel de la *Tabla 6*. Los valores se representan a continuación:

Tabla 23: Emisiones asociadas a la fase WtT. Flota diésel EURO VI. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones								
t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	t/año	t/año
SO _x	NO _x	COVNM	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM _{2,5}
9,08	1,93	2,89	0,0338	1,93	14,1	0,135	-	0,97

Por último, se calculan las emisiones asociadas a la fase TtW de dicha flota (*Tabla 24*):

Tabla 24: Emisiones de la fase TtW. Flota diésel EURO VI. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones								
t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	kt/año	t/año
CO	COVNM	NO _x	N ₂ O	NH ₃	CO ₂	SO ₂	PM _{2,5}	CH ₄
23,5	23,2	62,9	4,2	3,1	101,02	0,5	2,16	18,4

Una vez calculadas todas las emisiones en la unidad funcional (flota de autobuses/año), se procede al cálculo de impactos tal y como se ha hecho en el escenario anterior.

Las emisiones en unidades de impacto se recogen en las *Tablas 25 a 29* y el peso de cada fase y de cada contaminante para cada impacto estudiado se expresa en las *Figuras 28 a 37*.

Cambio climático

Tabla 25: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de cambio climático (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
CH₄	26,2	8,51	18,45	0,032	25
N₂O	0,216	0,23	4,22	0,135	298
CO₂	7 348	2 659	101 016	14 096	1
TOTAL(t CO₂ eq)	8 067	2 940	102 734	14 137	

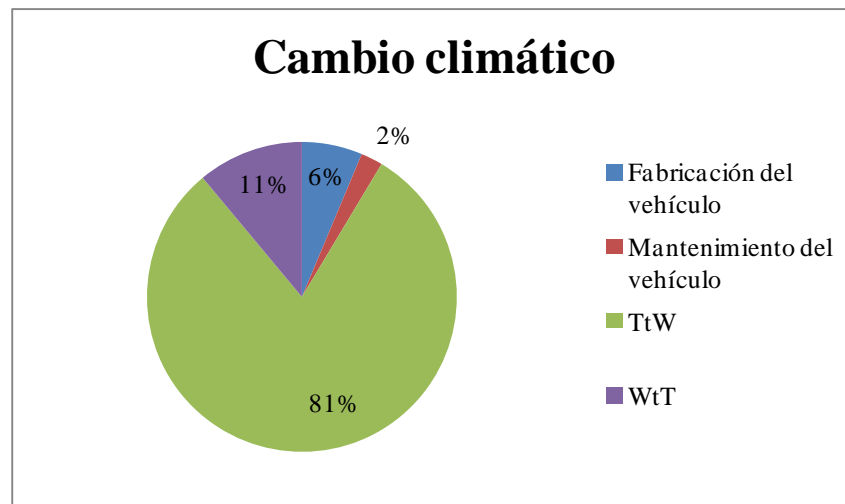


Figura 28: Contribución por fases al impacto de cambio climático del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

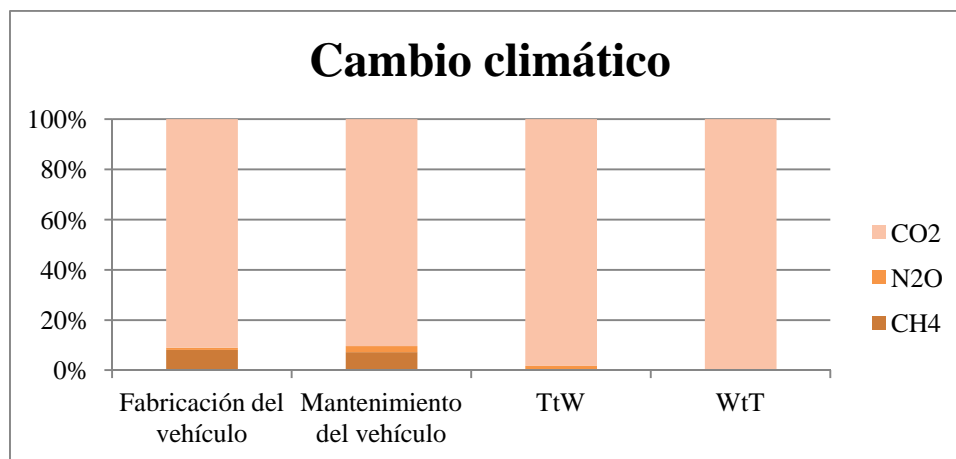


Figura 29: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

La fase predominante en el cambio climático sigue siendo la fase TtW con más de un 80 % de contribución. Y al igual que ocurría en el escenario anterior, el CO₂ es el contaminante mayoritario en todas las fases, porque es el que se emite en mayor cantidad.

Ozono troposférico

Tabla 26: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de ozono troposférico (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
COVNM	8,54	3,52	23,19	2,89	1
NO _x	20,55	4,80	62,93	1,93	1
TOTAL(t NMCOV eq)	29,1	8,32	86,13	4,83	

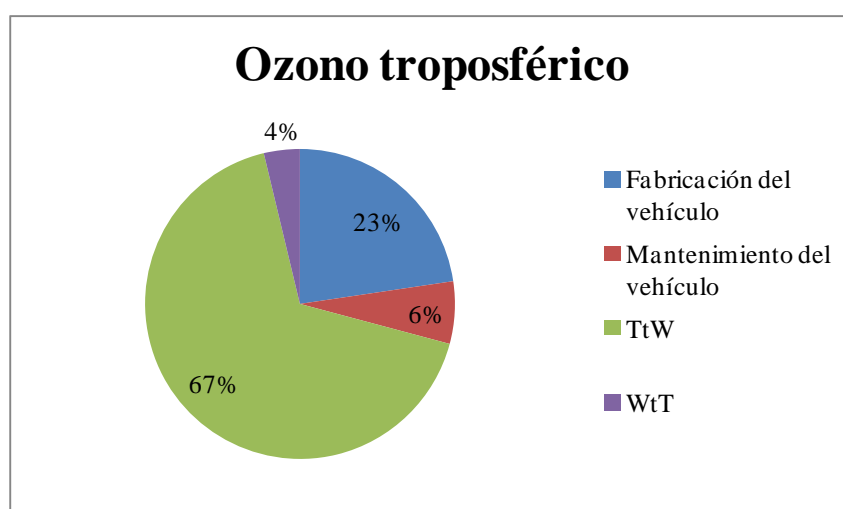


Figura 30: Contribución por fases al impacto de ozono troposférico del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

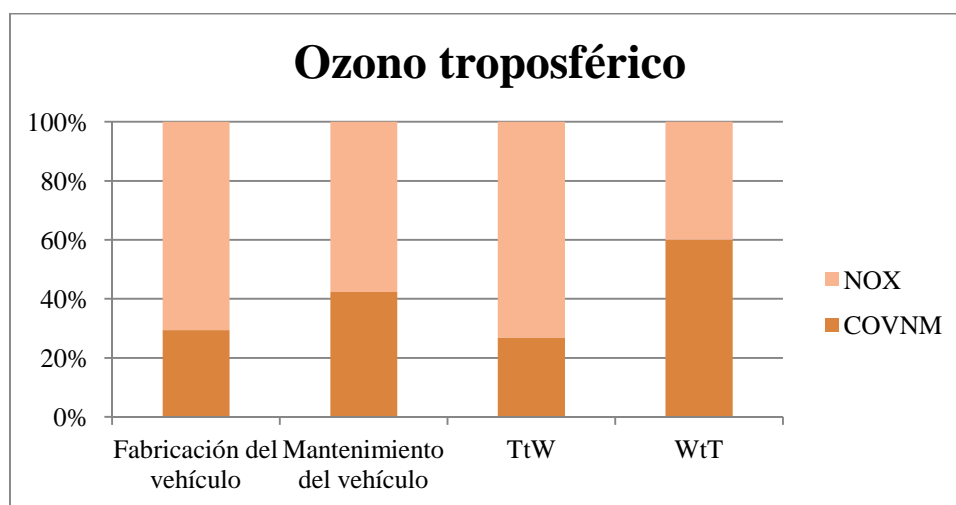


Figura 31: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

En el ozono troposférico la fase con mayor contribución sigue siendo TtW y aumenta la contribución de la fase VLC (fabricación y mantenimiento del vehículo) a un 30 %.

En este escenario ambos contaminantes, NO_x y COVNM son importantes en todas las fases. Aumentan las emisiones de COVNM con respecto al escenario actual en las fases TtW y WtT.

Acidificación

Tabla 27: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Acidificación (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO _x	20,55	4,8	62,9394	1,93	0,74
NH ₃	0,61	0,226	3,1	0	3,02
SO ₂	34,423	0,0007	0,506	9,08	1,31
TOTAL(kmol H+ eq)	62,15	4,24	56,47	13,32	

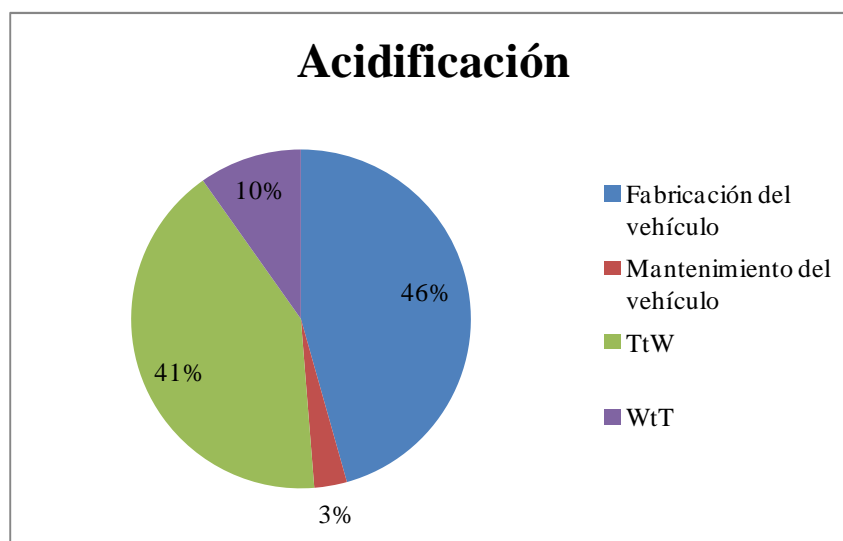


Figura 32: Contribución por fases al impacto de acidificación del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

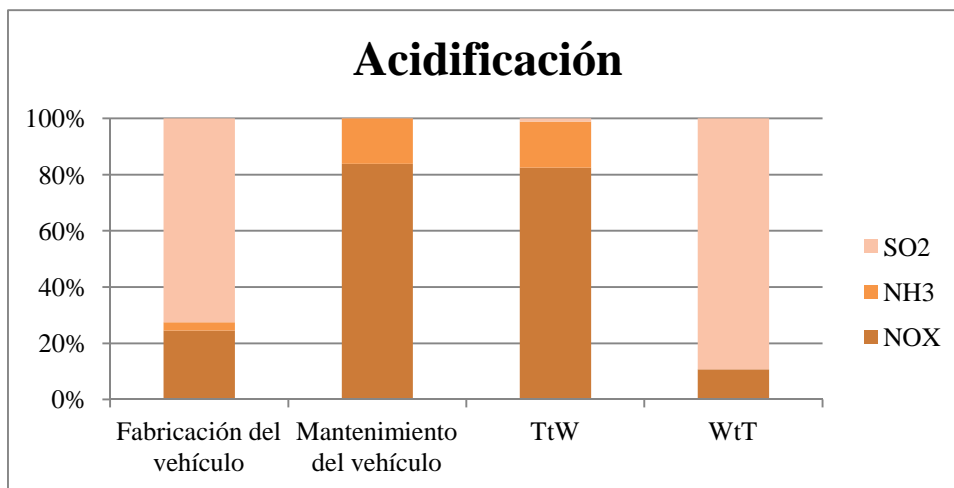


Figura 33: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, acidificación. Fuente: Elaboración propia.

En el impacto de acidificación cambia la fase predominante, en este caso es la fase de VLC (fabricación y mantenimiento del vehículo) con un 49 %, seguida de la fase TtW con un 41 %. Los contaminantes mayoritarios son el SO₂ para las fases WtT y fabricación del vehículo y el NO_x para las fases de mantenimiento del vehículo y TtW, siendo apreciable el NH₃ únicamente en estas dos últimas fases.

Eutrofización

Tabla 28: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de eutrofización (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NH₃	0,608	0,226	3,1	-	13,5
NO_x	20,55	4,8	62,94	1,93	4,26
TOTAL(kmol N eq)	95,776,90969	23,52	309,4	8,23	

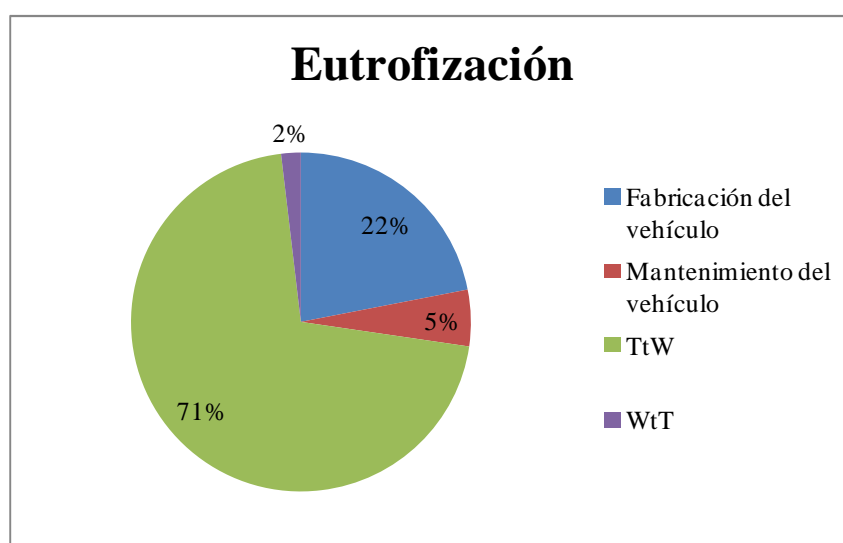


Figura 34: Contribución por fases al impacto de eutrofización del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

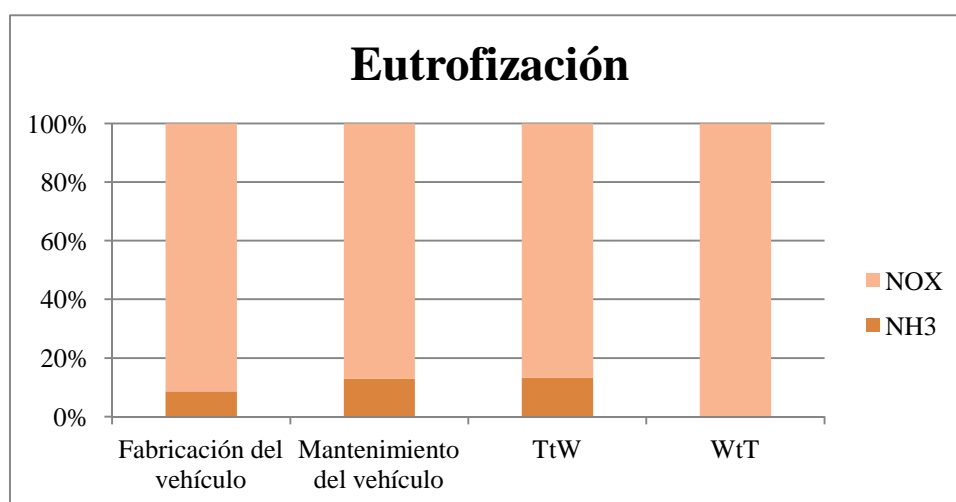


Figura 35: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.

La fase TtW vuelve a ser la predominante en el impacto de eutrofización, y el contaminante predominante en todas las fases es el NO_x porque se emite en mayor cantidad

Material particulado

Tabla 29: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Material particulado (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	62,94	1,93	0,00722
NH₃	0,61	0,23	3,1	0	0,0667
SO₂	34,43	0,0007	0,51	9,1	0,0611
PM_{2,5}	29,85	4,57	2 161	0,97	1
CO	7348	7,5	23,51	1,93	0,000356
TOTAL(t PM_{2,5} eq)	34,76	4,6162	2 162	1,53	

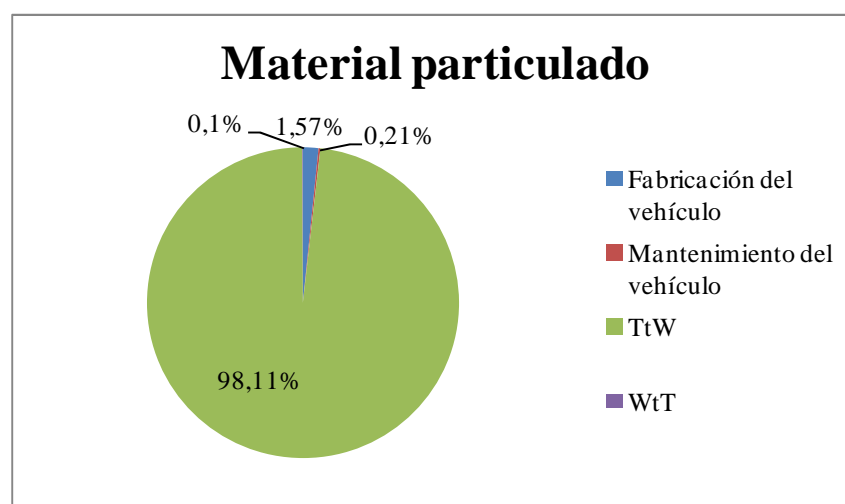


Figura 36: Contribución por fases al impacto de material particulado del escenario diésel. Fuente: Elaboración propia.

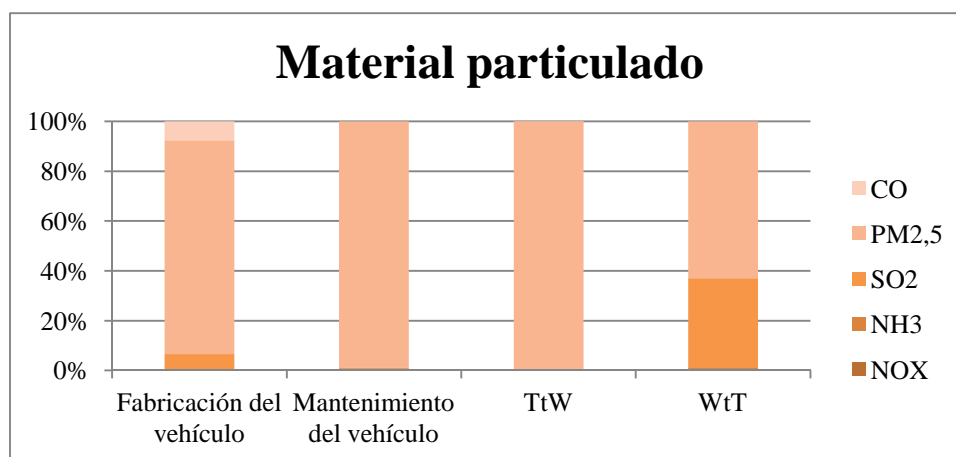


Figura 37: Peso de los contaminantes en el escenario diésel, material particulado. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al material particulado ocurre como en el escenario anterior, donde la fase mayoritaria es TtW debido a la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento.

En este escenario disminuye ligeramente las emisiones de NO_x y $\text{PM}_{2,5}$ debido a que, a pesar de contar con un combustible fósil (diésel), la tecnología EURO VI cuenta con tratamientos post combustión mejores que las anteriores tecnologías (EURO III, EURO IV y EURO V). En el caso del impacto de acidificación la fase TtW contribuye en un 41 % frente a un 46 % correspondiente a la fase de fabricación del vehículo, debido principalmente a que la tecnología EURO VI reduce en gran porcentaje los NO_x .

4.3 Escenario GNC

Este escenario supone al igual que el escenario anterior que la fuente energética utilizada por la flota de autobuses es una fuente convencional. En este caso GNC, de tecnología EEV que como se ha comentado con anterioridad, es más antigua que la tecnología EURO VI considerada en el escenario diésel.

La fase del ciclo de vida del vehículo sigue siendo la misma que en los casos anteriores (*Tabla 13 y Tabla 14*).

Por otro lado, para el cálculo de la fase del ciclo de vida del combustible, WtT obteníamos el consumo de energía necesaria para toda la flota de tecnología EEV en 498,7 TJ/año y como ya se ha comentado suponíamos que el combustible utilizado para hacer llegar el GNC suficiente a los depósitos era gasóleo que se quema en calderas de combustión, por lo que se utilizan los mismos factores de emisión que en el escenario diésel para la fase WtT. Las emisiones asociadas a la fase WtT se representan en la *Tabla 30*:

Tabla 30: Emisiones asociadas a la fase WtT. Flota GNC tecnología EEV Fuente: Elaboración propia.

Emisiones								
t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	t/año	t/año
SO _x	NO _x	COVNM	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM
23,44	4,99	7,48	0,085	4,99	36,4	0,35	-	2,49

En último lugar, se calcula la fase de uso, TtW con los correspondiente factores de emisión (*Tabla 31*):

Tabla 31: Emisiones de la fase de uso. Flota GNC tecnología EEV. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones								
t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	kt/año	t/año
CO	COVNM	NO _x	N ₂ O	NH ₃	CO ₂	SO ₂	PM _{2,5}	CH ₄
105,43	4,74	263,56	-	-	131,9	0,696	2,16	18,5

Tras el cálculo de las emisiones de todas las fases se procede al cálculo de los impactos. Las emisiones en unidades de impacto se recogen en las *Tablas 32 a 36* y el peso de cada fase y de cada contaminante para cada impacto estudiado se expresa en las *Figuras 38 a 47*:

Cambio climático

Tabla 32: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de cambio climático (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
CH4	26,2	8,51	18,449	0,084	25
N2O	0,216	0,231	-	0,349	298
CO2	7 348	2 659	131 913	36 403	1
TOTAL(t CO2 eq)	8 067	2 940	132 374	36 509	

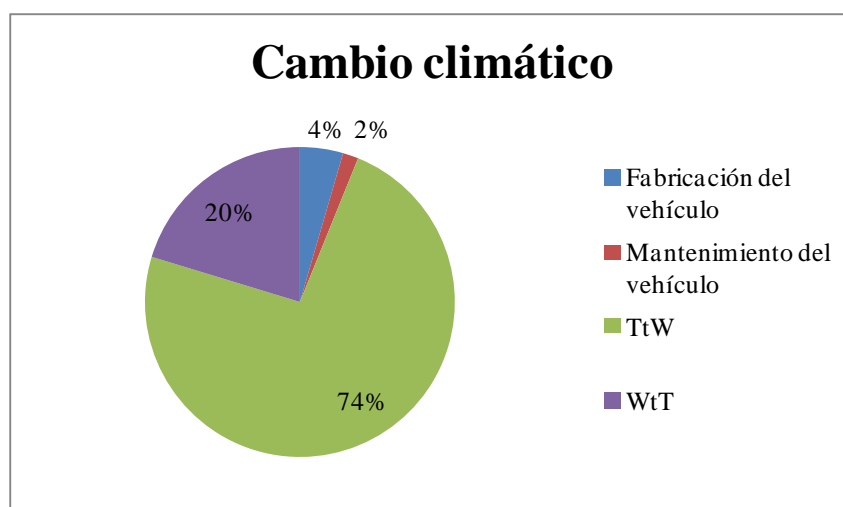


Figura 38: Contribución por fases al impacto de cambio climático del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.

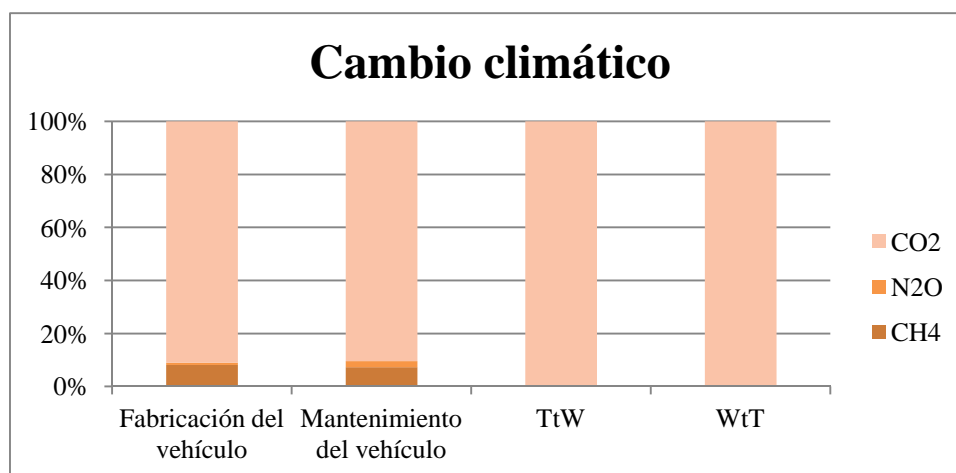


Figura 39: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

La fase TtW sigue siendo la predominante en el impacto de cambio climático. Y el contaminante mayoritario es el CO₂ como en los dos escenarios anteriores.

Ozono troposférico

Tabla 33: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de ozono troposférico (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
COVNM	8,54	3,52	4,74	7,48	1
NO_x	20,55	4,8	263,6	4,99	1
TOTAL(t COVNM eq)	29,1	8,32	268,3	12,47	

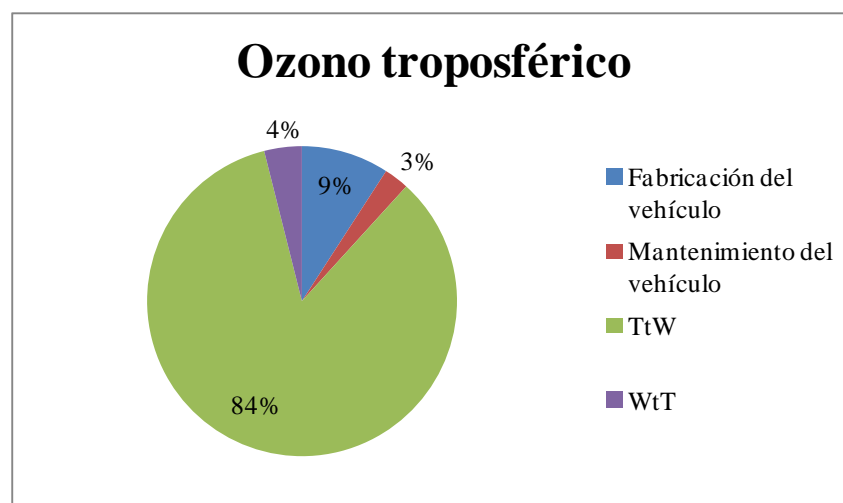


Figura 40: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

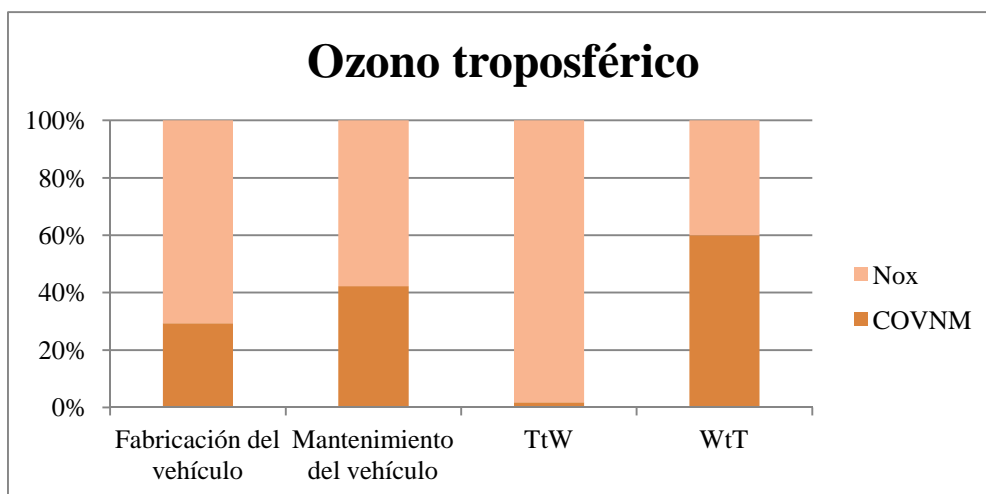


Figura 41: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

En el ozono troposférico se mantiene la predominancia de la fase TtW y con respecto a los contaminantes salvo en la fase TtW donde casi el 100 % corresponde a NO_x , en el resto ambos (NO_x y COVNM) son importantes.

Acidificación

Tabla 34: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Acidificación (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	263,6	4,987	0,74
NH_3	0,61	0,226	-	-	3,02
SO_2	34,43	0,00073	0,696	23,43	1,31
TOTAL(kmol H+ eq)	62,15	4,24	195,95	34,39	

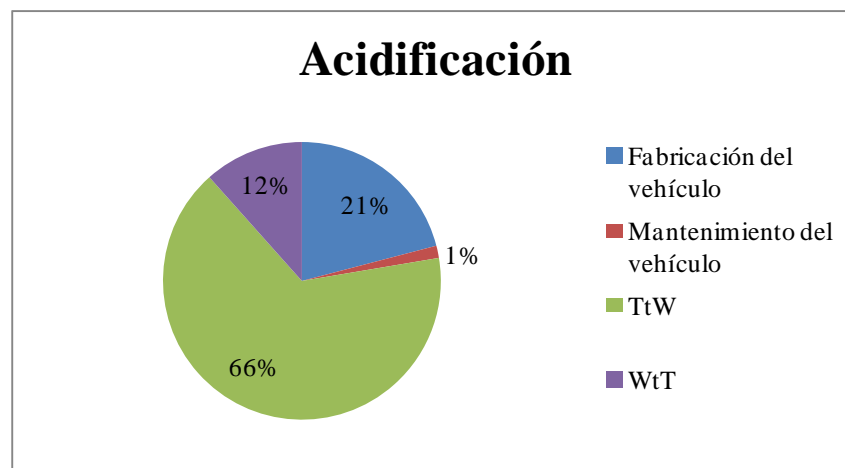


Figura 42: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de acidificación. Fuente: Elaboración propia.

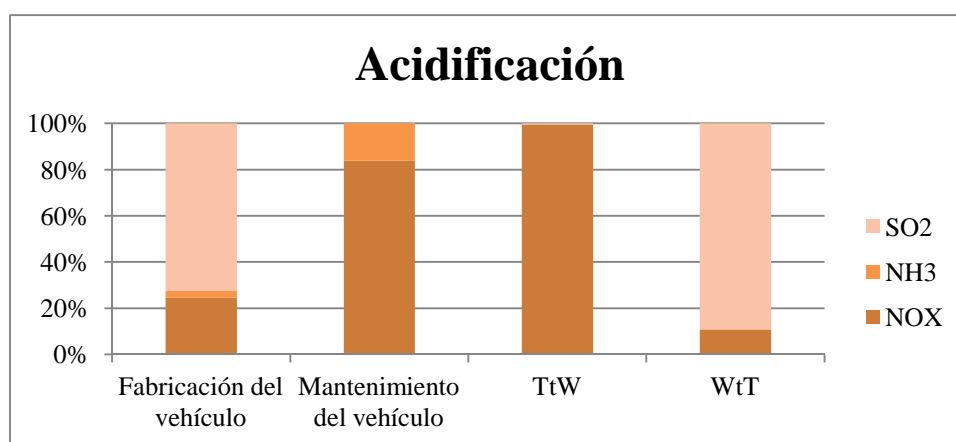


Figura 43: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, acidificación. Fuente: Elaboración propia.

Los NO_x también son los más emitidos en la fase de acidificación, con excepción de las fases WtT y fabricación del vehículo en las que el SO_2 es el mayoritario. La fase TtW sigue siendo la mayoritaria seguida de la fase VLC.

Eutrofización

Tabla 35: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de eutrofización (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NH_3	0,608	0,226	-	-	13,5
NO_x	20,55	4,81	263,6	4,97	4,26
TOTAL(kmol N eq)	95,78	23,52	1 123	21,24	

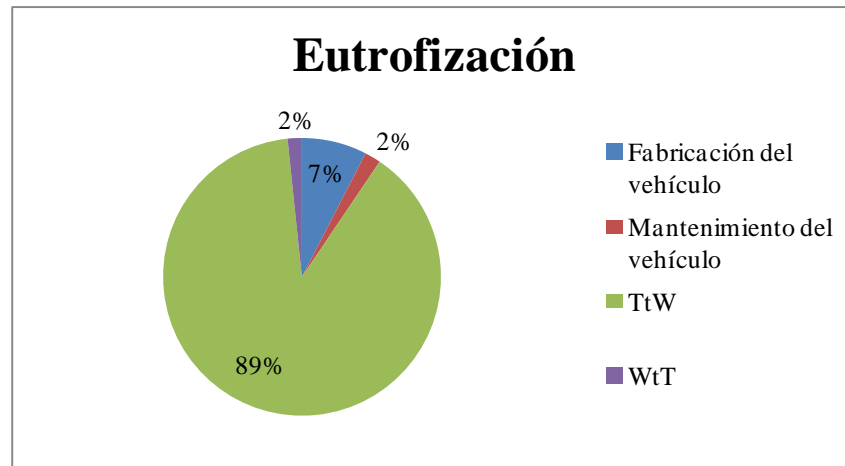


Figura 44: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de eutrofización. Fuente: Elaboración propia.

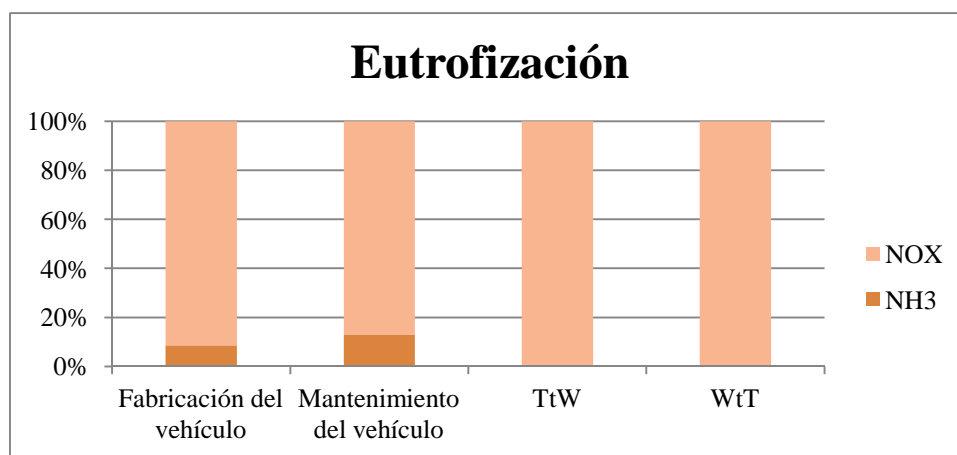


Figura 45: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.

Sobre la eutrofización la contribución de la fase TtW alcanza el 89 %, dejando casi un efecto residual al resto de fases y el mayor contaminante emitido en todas las fases es también el NO_x, solo aparece el NH₃ en la fase VLC.

Material particulado

Tabla 36: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario GNC. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Material particulado (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	263,56	4,99	0,00722
NH₃	0,609	0,226	-	-	0,0667
SO₂	34,43	0,00073	0,696	23,44	0,0611
PM_{2,5}	29,85	4,57	2 162	2,49	1
CO	7 348	7,045	105,43	4,99	0,000356
TOTAL(kg PM_{2,5} eq)	34,76	4,62	2164	3,96	

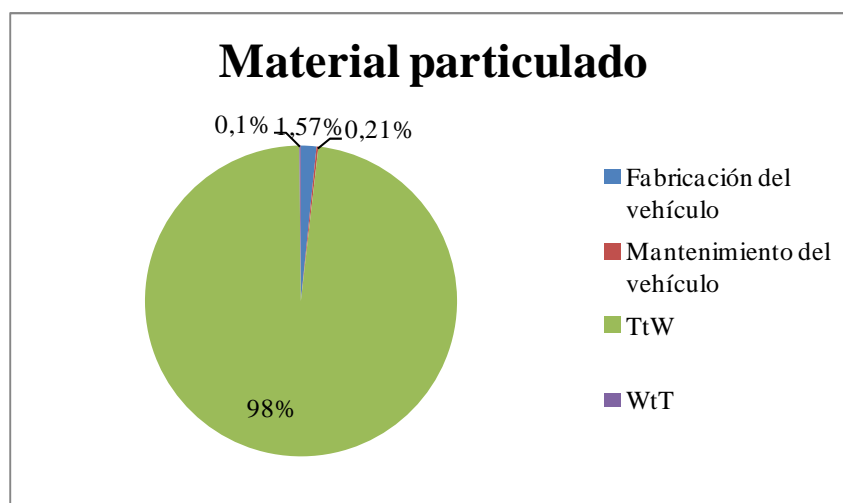


Figura 46: Contribución del escenario GNC con tecnología EEV por fases al impacto de material particulado. Fuente: Elaboración propia.

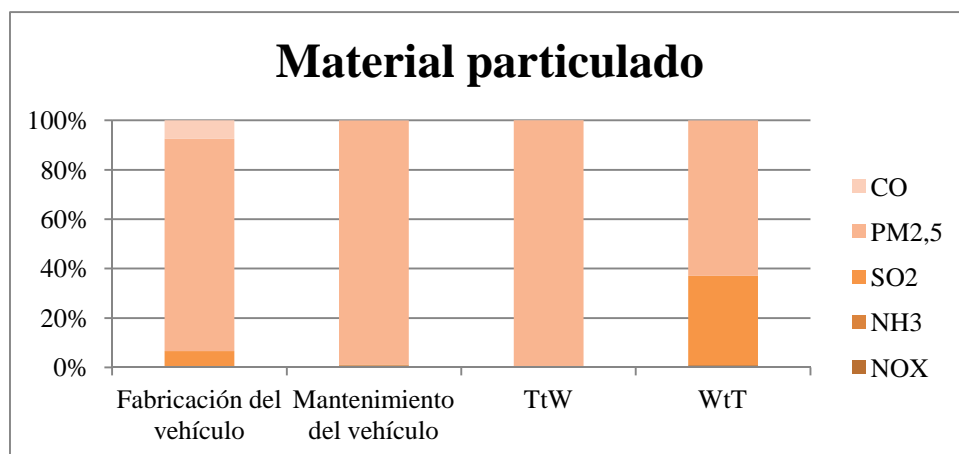


Figura 47: Peso de los contaminantes en el escenario GNC, material particulado. Fuente: Elaboración propia.

El impacto de material particulado es muy similar al resto de escenarios ya comentados, debido a la emisiones dependientes del peso del vehículo.

En este escenario la fase de uso del combustible (TtW) sigue siendo la fase que contribuye de forma mayoritaria a todos los impactos.

En el impacto de cambio climático se observa un aumento de la contribución con respecto a los escenarios anteriores. Esto se debe al mayor consumo de GNC por kilómetro recorrido.

4.4 Escenario eléctrico. MixEléctrico 2016

Este escenario es el primero que considera una nueva tipología de vehículo, en concreto autobuses eléctricos. No se ha supuesto ninguna diferencia respecto a la fabricación del autobús con respecto al resto de escenarios, por lo que las emisiones asociadas a la fabricación y el mantenimiento de la flota son las mismas (*Tabla 12 y Tabla 13*).

En este caso se supone que toda la energía consumida es energía eléctrica y no energía térmica como en los dos casos anteriores ("*4.2 Escenario diésel y 4.3 Escenario GNC*") por lo que solo se utilizan los factores de emisión correspondientes a la energía eléctrica (*Tabla 4*).

Tabla 37: Emisiones asociadas a la fase WtT. Flota Eléctrica. Mix de generación España (2016). Fuente: Elaboración propia.

Emisiones								
t/año	t/año	t/año	t/año	t/año	kt/año	t/año	t/año	t/año
SO _x	NO _x	COVNM	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM
70,14	107,44	4,95	11,19	25,14	33,3	0,85	-	2,43

Por último, este escenario carece de emisiones en la fase TtW, la cual era la mayoritaria en todos los escenarios anteriores (salvo las emisiones de PM, 2 161 t de PM_{2,5} eq) puesto que todos los autobuses son de tecnología eléctrica, los cuales no emiten ningún tipo de emisión contaminante durante su uso.

A continuación se calculan los impactos. Las emisiones en unidades de impacto se recogen en las *Tablas 38 a 42* y el peso de cada fase y de cada contaminante para cada impacto estudiado se expresa en las *Figuras 48 a 57*:

Cambio climático

Tabla 38: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de cambio climático (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
CH₄	26,2	8,51	-	11,19	25
N₂O	0,216	0,23	-	0,851	298
CO₂	7 348	2 659	-	33 304	1
TOTAL(t CO₂ eq)	8 067	2 940	-	33 837	

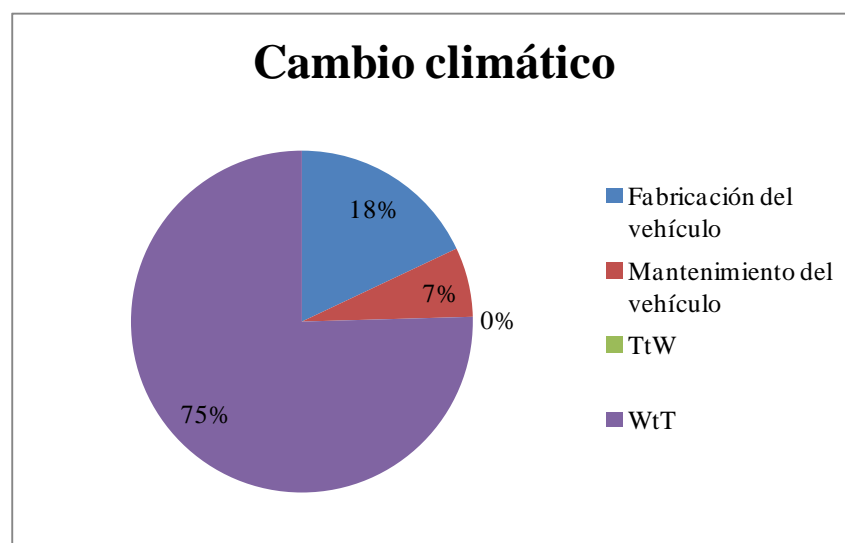


Figura 48: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

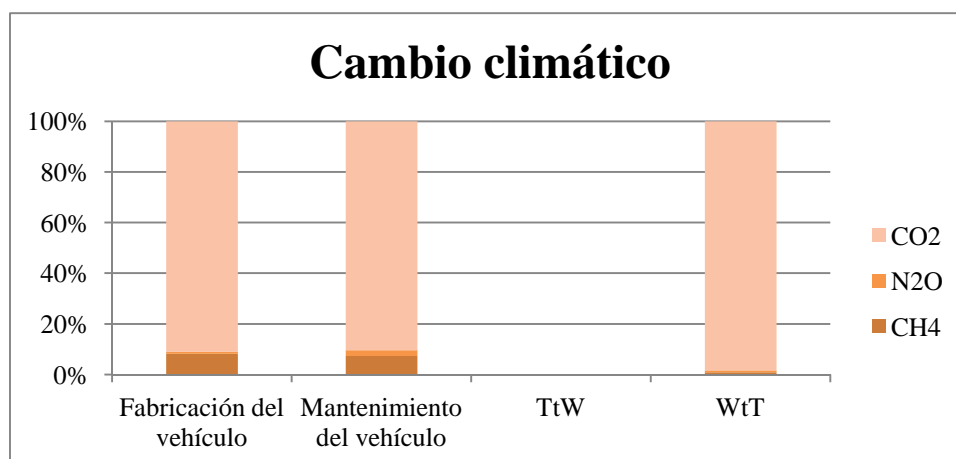


Figura 49: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Si desaparece la fase TtW, la mayoría pasa a ser la fase WtT con un 75 % de contribución. El contaminante mayoritario sigue siendo el CO₂.

Ozono troposférico

Tabla 39: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de ozono troposférico (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
COVNM	8,54	3,52	-	4,95	1
NO_x	20,55	4,8	-	107,44	1
TOTAL(t COVNM eq)	29,1	8,32	-	112,38	

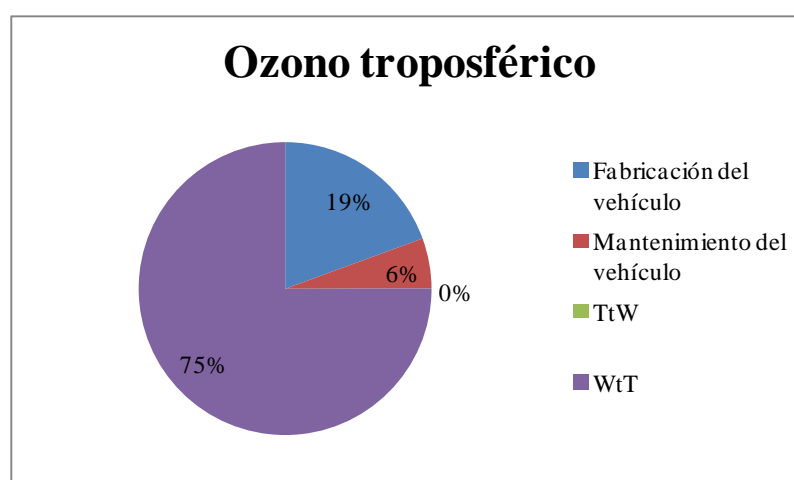


Figura 50: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

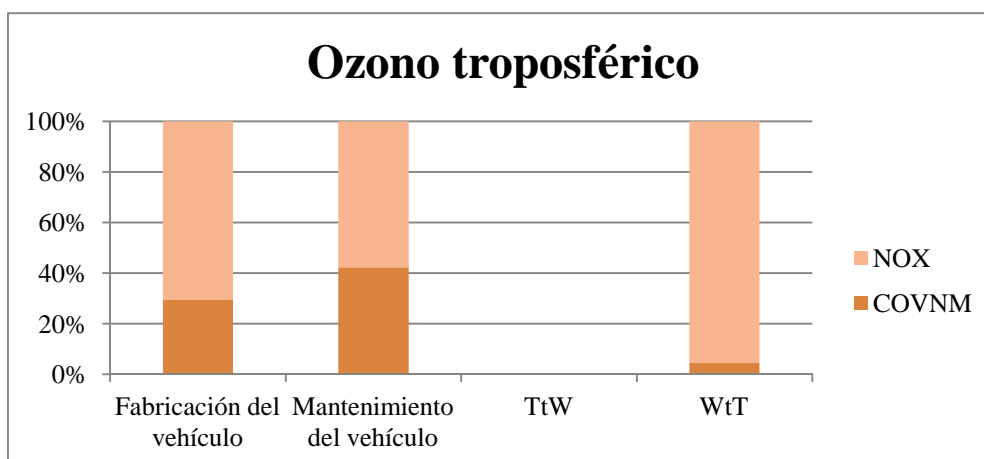


Figura 51: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de ozono troposférico se mantiene la predominancia del NO_x frente a los COVNM.

Acidificación

Tabla 40: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Acidificación (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	-	107,44	0,74
NH₃	0,608	0,226	-	-	3,02
SO₂	34,43	0,00073	-	70,14	1,31
TOTAL(kmol H+ eq)	62,15	4,24	-	171,38	

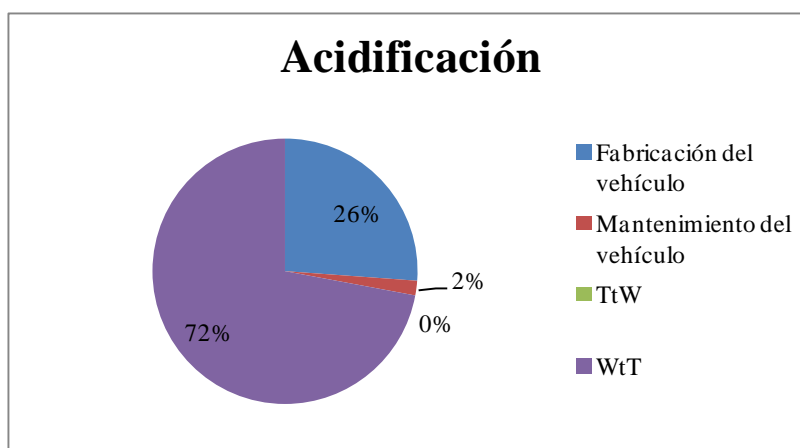


Figura 52: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de acidificación. Fuente: Elaboración propia.

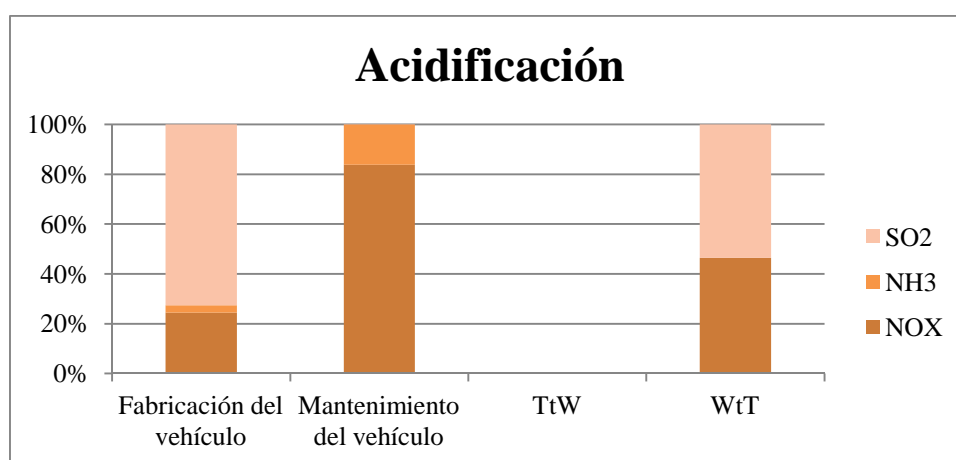


Figura 53: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, acidificación. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la acidificación la fase de fabricación del vehículo aumenta ligeramente su contribución hasta un 26 %. El NO_x solo es predominante en la fase de mantenimiento del vehículo, en el resto el SO₂ adquiere mayor importancia.

Eutrofización

Tabla 41: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de eutrofización (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NH ₃	0,608	0,226	-	-	13,5
NO _x	20,55	4,8	-	107,44	4,26
TOTAL(kmol N eq)	95,78	23,52	-	457,68	

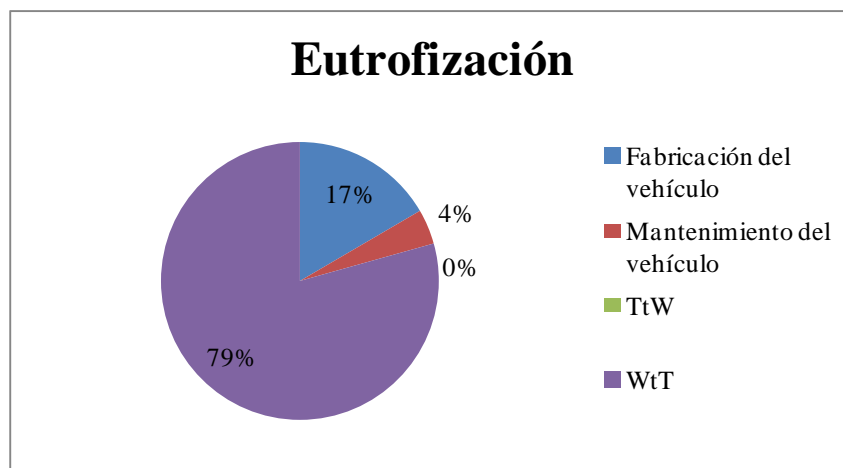


Figura 54: : Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de eutrofización. Fuente: Elaboración propia.

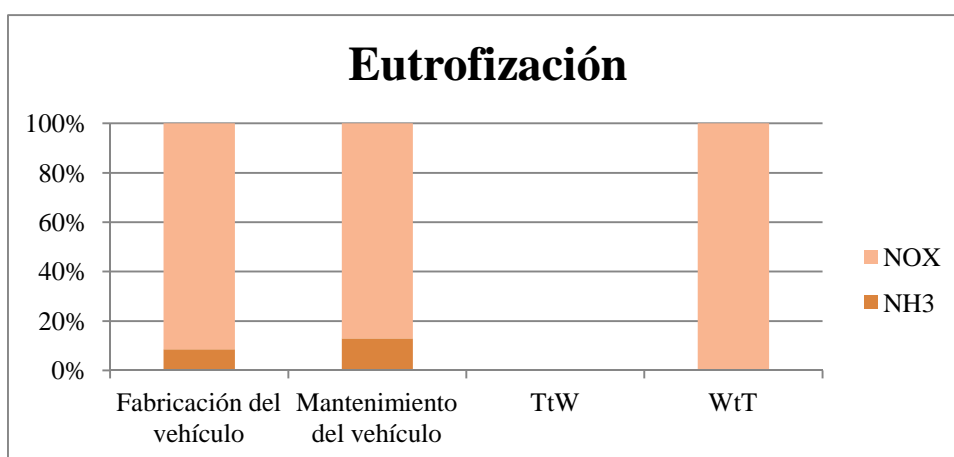


Figura 55: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.

Se mantiene la predominancia de la fase WtT y del contaminante NO_x como en los escenarios anteriores.

Material particulado

Tabla 42: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario MixEléctrico. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Material particulado (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	-	107,44	0,00722
NH₃	0,609	0,226	-	-	0,0667
SO₂	34,43	0,00073	-	70,14	0,0611
PM_{2,5}	29,85	4,57	2 161	2,43	1
CO	7348	7,05	-	25,14	0,000356
TOTAL(t PM_{2,5} eq)	34,76	4,62	2 161	7,5	

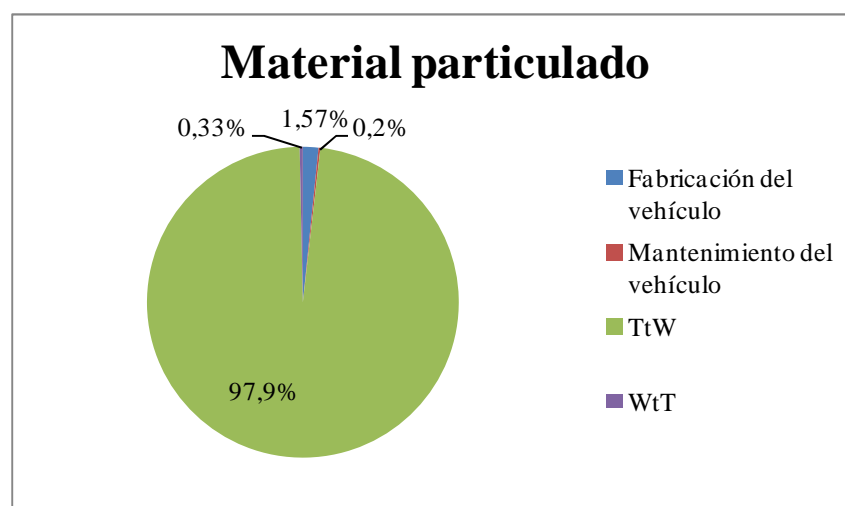


Figura 56: Contribución del escenario MixEléctrico por fases al impacto de material particulado. Fuente: Elaboración propia.

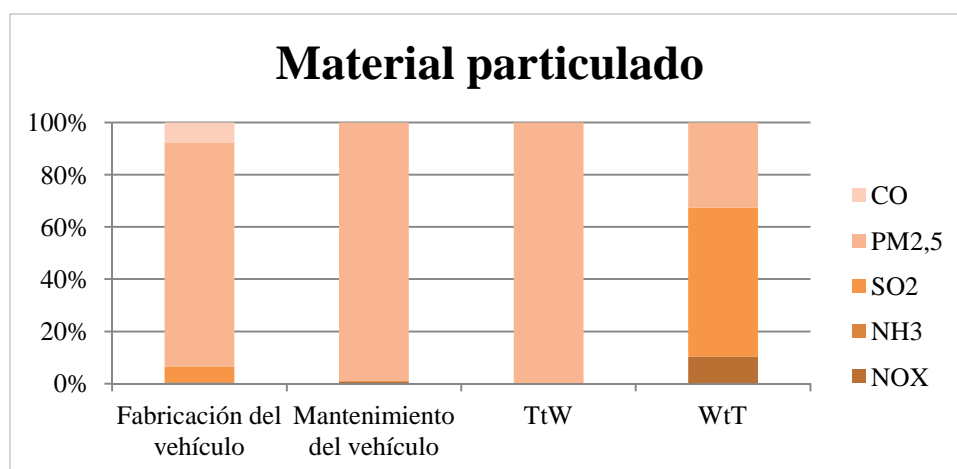


Figura 57: Peso de los contaminantes en el escenario MixEléctrico, material particulado. Fuente: Elaboración propia.

En este escenario se puede observar que, en la mayoría de los impactos la fase que más contribuye es la fase WtT debido a que desaparece la fase TtW (salvo en el impacto de material particulado, por la emisión de PM debido a la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento común a todos los escenarios).

La fase WtT se convierte en la mayoritaria debido a que el 36,7 % de la energía que luego se transforma a energía eléctrica es de origen fósil, (*Figura 16*).

La energía primaria de la que procede dicha energía eléctrica proviene de centrales de carbón, fueloil, gas natural o ciclos combinados, las cuales llevan asociadas gran cantidad de emisiones contaminantes.

4.5 Escenario renovable

El último de los escenarios analizados es el escenario renovable, en el cual se considera que además de tener toda la flota eléctrica, esa electricidad es de origen renovable. Por lo tanto no existen emisiones en la fase WtT ni en la fase TtW (salvo las emisiones de PM, 2 161 t de PM_{2,5} eq) como ocurría en el escenario "4.4 Escenario eléctrico. Mix de generación eléctrica en España (2016)" por ser autobuses eléctricos.

Con lo cual solo se tienen en cuenta las emisiones de la fase de fabricación y mantenimiento, que además son comunes a todos los escenarios (Tabla 13 y Tabla 14).

Las emisiones en unidades de impacto se recogen en las Tablas 43 a 47 y el peso de cada fase y de cada contaminante para cada impacto estudiado se expresa en las Figuras 58 a 67:

Cambio climático

Tabla 43: Emisiones de cambio climático por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de cambio climático (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
CH₄	26,2	8,51	-	-	25
N₂O	0,216	0,23	-	-	298
CO₂	7 348	2 659	-	-	1
TOTAL(t CO₂ eq)	8 067	2 940	-	-	

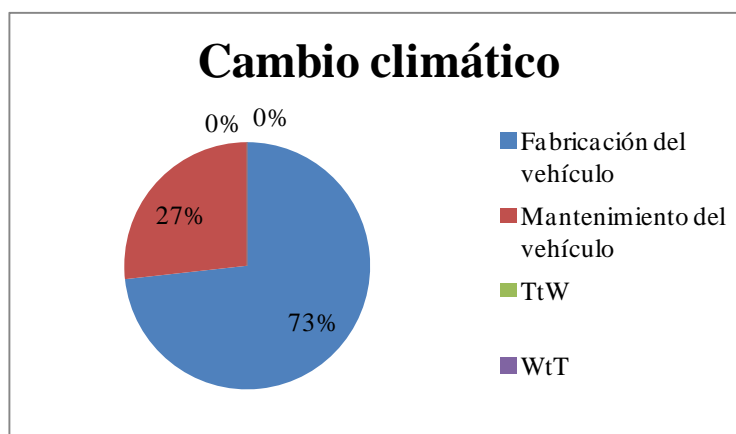


Figura 58: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

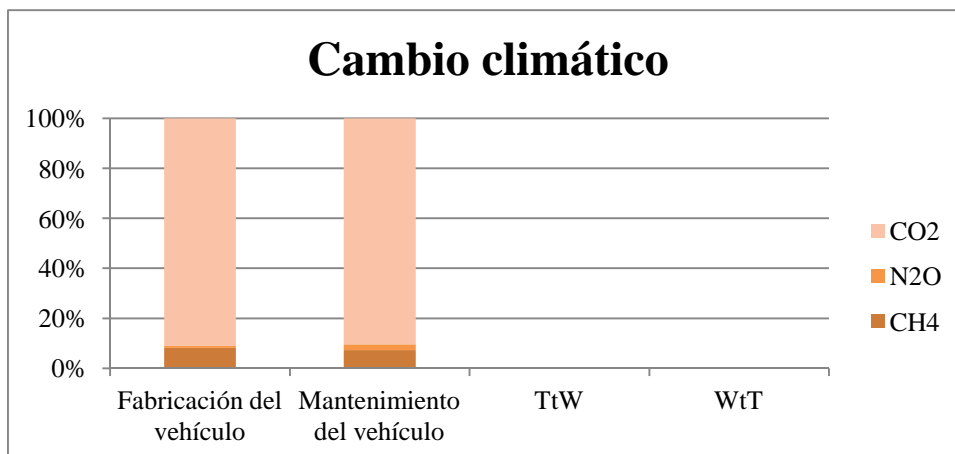


Figura 59: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Ozono troposférico

Tabla 44: Emisiones de ozono troposférico por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de ozono troposférico (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
COVNM	8,54	3,52	-	-	1
NO_x	20,55	4,8	-	-	1
TOTAL(t COVNM eq)	29,1	8,32	-	-	

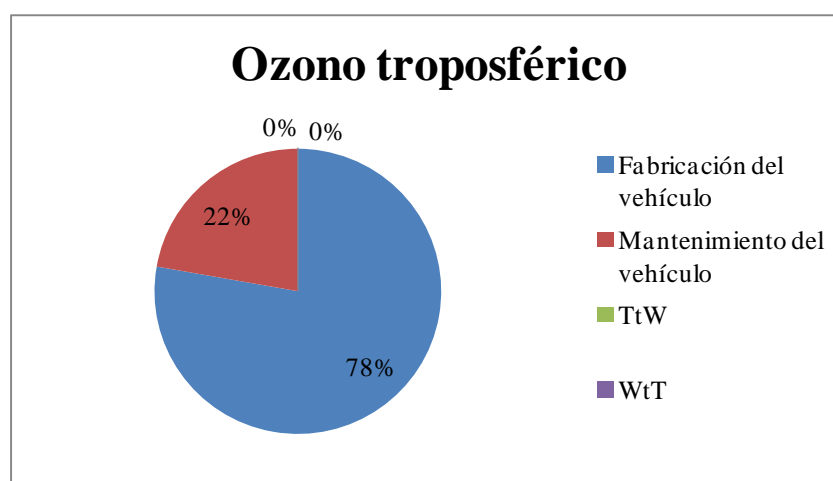


Figura 60: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

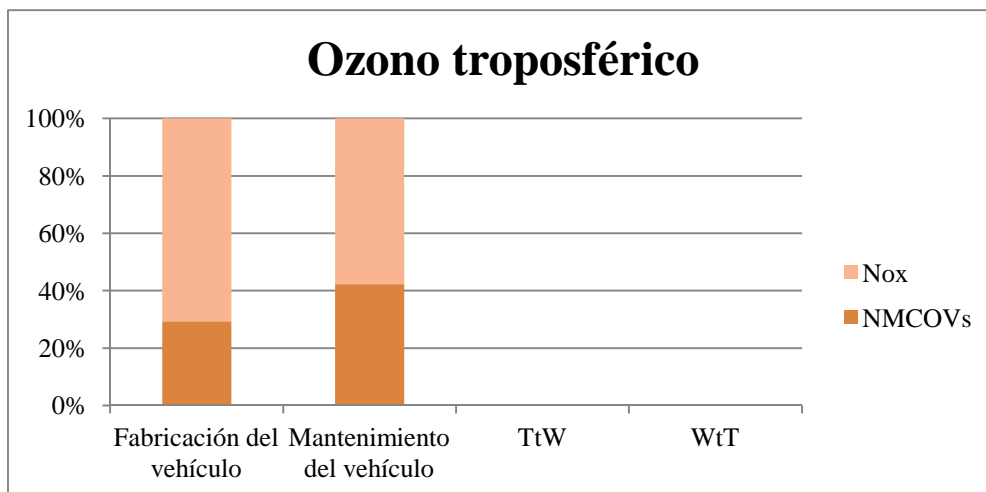


Figura 61: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia.

Acidificación

Tabla 45: Emisiones de acidificación por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Acidificación (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	-	-	0,74
NH₃	0,608	0,226	-	-	3,02
SO₂	34,43	0,00073	-	-	1,31
TOTAL(kmol H+ eq)	62,15	4,24	-	-	

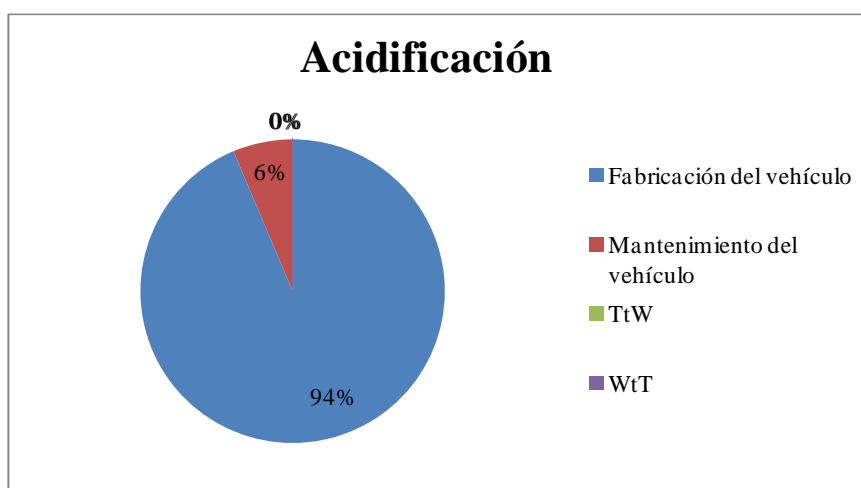


Figura 62: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de acidificación. Fuente: Elaboración propia

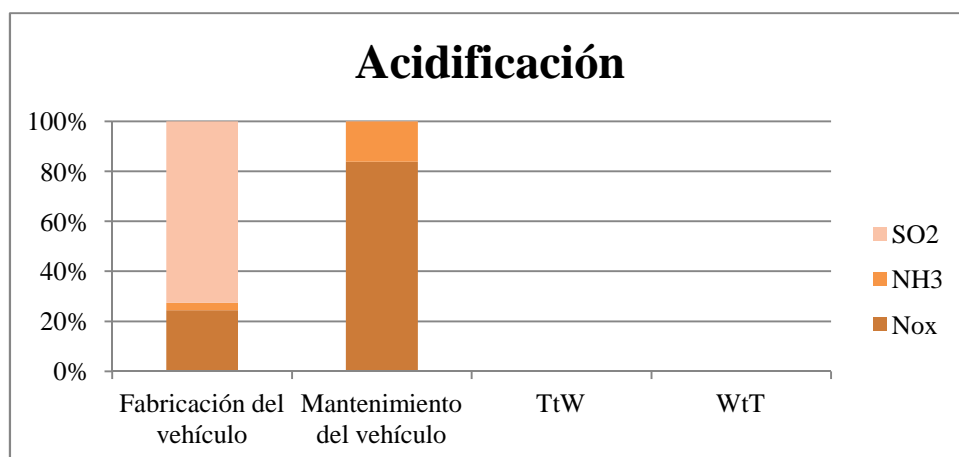


Figura 63: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, acidificación. Fuente: Elaboración propia.

Eutrofización

Tabla 46: Emisiones de eutrofización por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de eutrofización (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NH₃	0,608	0,226	-	-	13,5
NO_x	20,55	4,8	-	-	4,26
TOTAL(kmol N eq)	95,78	23,52	-	-	

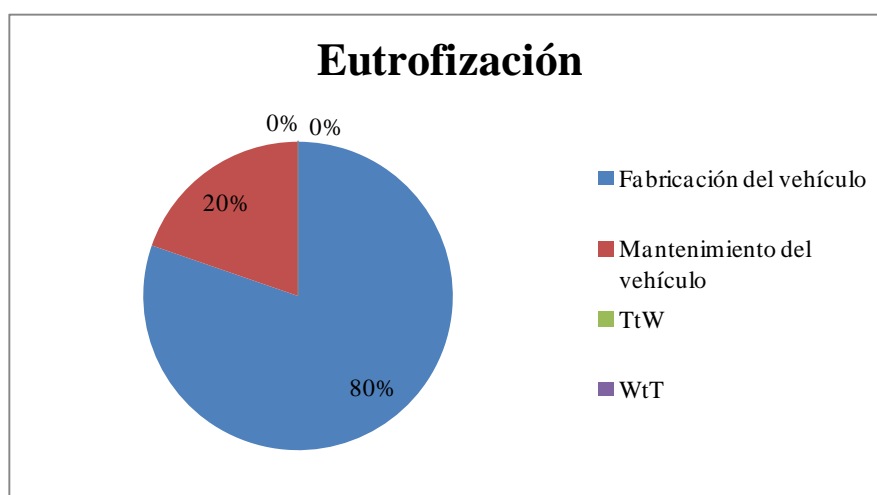


Figura 64: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de eutrofización. Fuente: Elaboración propia

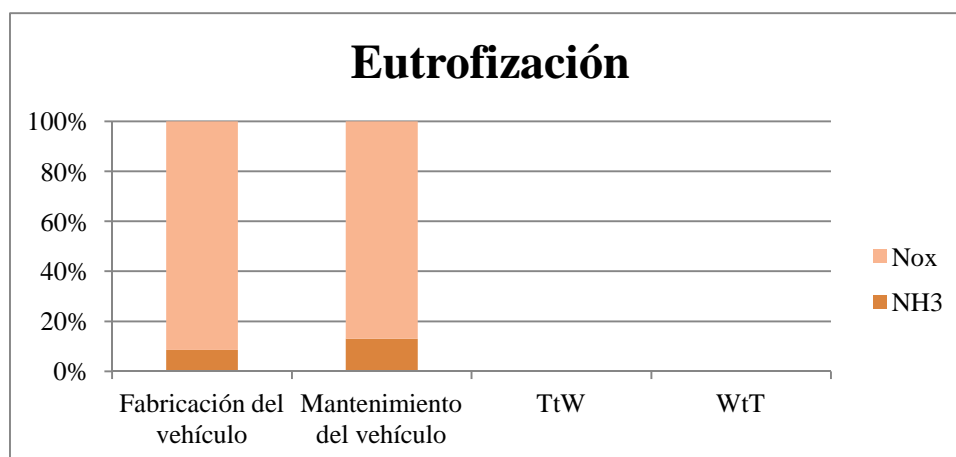


Figura 65: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, eutrofización. Fuente: Elaboración propia.

Material particulado

Tabla 47: Emisiones de material particulado por contaminante del escenario renovable. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Material particulado (t)					
	VLC		FLC		Factor de conversión
	Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT	
NO_x	20,55	4,8	-	-	0,00722
NH₃	0,609	0,226	-	-	0,0667
SO₂	34,43	0,00073	-	-	0,0611
PM_{2,5}	29,85	4,57	2 161	-	1
CO	7 348	7,05	-	-	0,000356
TOTAL(t PM_{2,5} eq)	34,76	4,62	2 161	-	

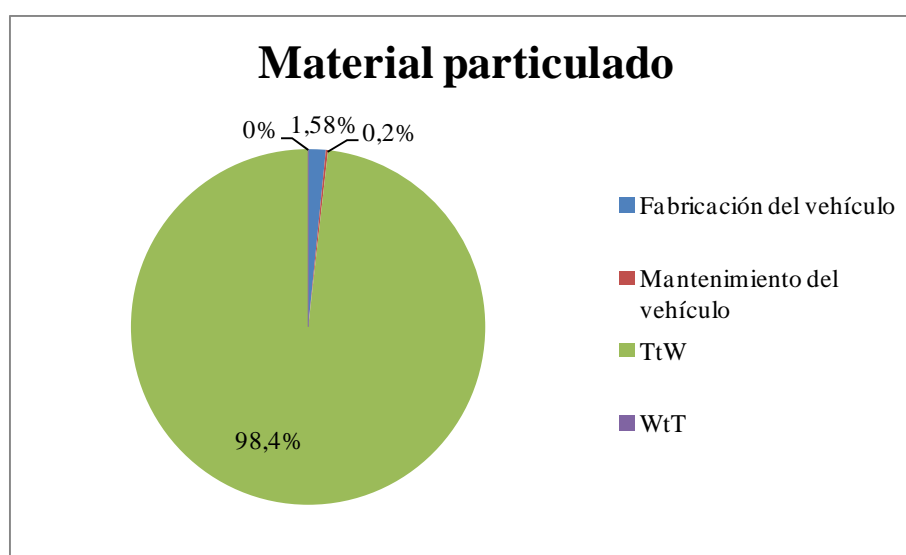


Figura 66: Contribución del escenario renovable por fases al impacto de material particulado. Fuente: Elaboración propia

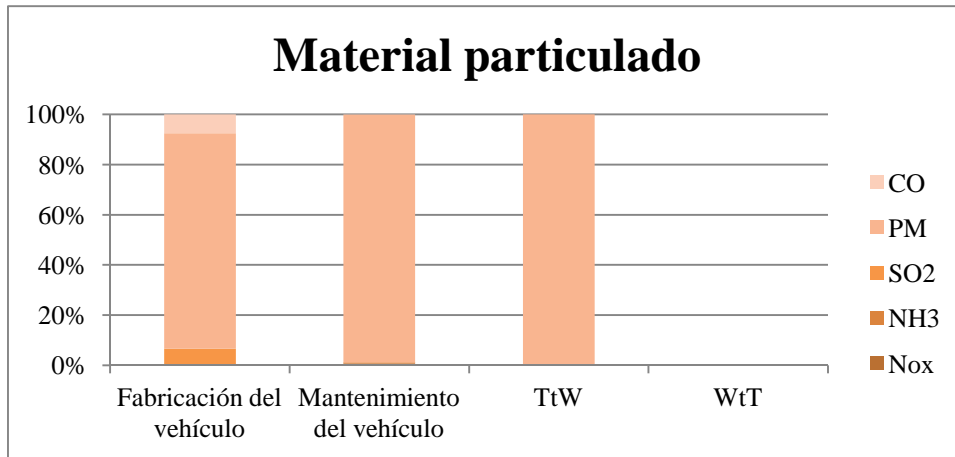


Figura 67: Peso de los contaminantes en el escenario renovable, material particulado. Fuente: Elaboración propia.

En este último escenario solo aparecen las fases de fabricación y mantenimiento (salvo en el caso del impacto de material particulado), lo que implica menos contribución a cada uno de los impactos porque las fases predominantes (WtT y TtW) no aparecen.

5. Conclusiones

5.1 Comparación de escenarios

Una vez establecidas las emisiones de todos los contaminantes y sus contribuciones a los diferentes impactos se procede a su comparación distinguiendo entre las diferentes fases para cada impacto estudiado.

Cambio climático

Tabla 48: Datos para la comparación de impacto de cambio climático entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Cambio climático (t CO2 eq)					
	TOTAL	VLC		FLC	
		Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT
Escenario diésel	120 618	8 067,4	2 940,19	102 734	14 137
Escenario actual	136 698	8 067,4	2 940,19	110 267	22 684
Escenario MixEléctrico	37 584	8 067,4	2 940,19	-	33 837
Escenario renovable	3 747	8 067,4	2 940,19	-	-
Escenario GNC	172 631	8 067,4	2 940,19	132 375	36 509

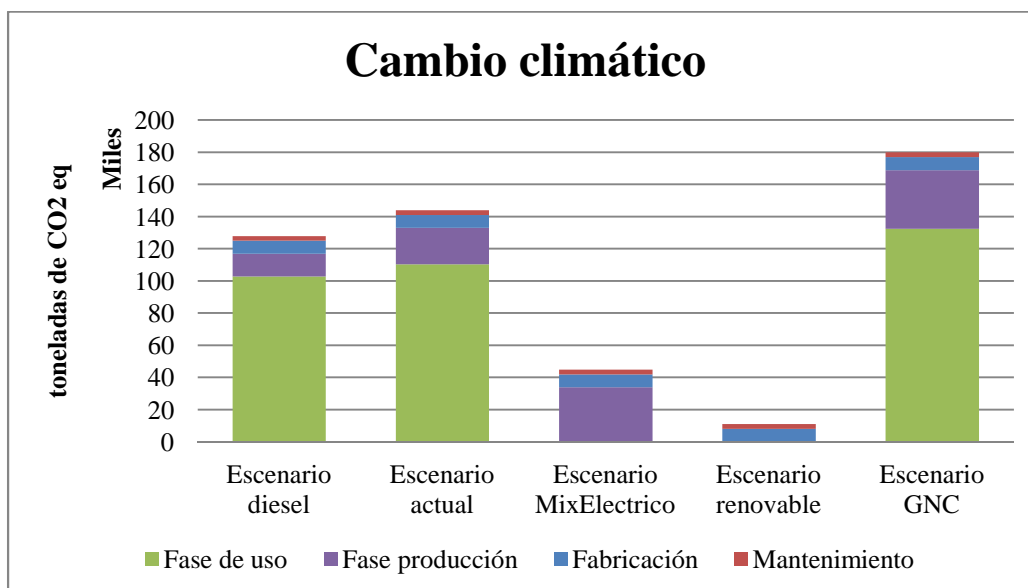


Figura 68: Comparación de impacto de cambio climático entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Ozono troposférico

Tabla 49: Datos para la comparación de impacto de ozono troposférico entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Ozono troposférico (t COVNM eq)					
	TOTAL	VLC		FLC	
		Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT
Escenario diésel	128,4	29,1	8,32	86,13	4,83
Escenario actual	509,8	29,1	8,32	428,52	43,9
Escenario MixEléctrico	149,8	29,1	8,32	-	112,38
Escenario renovable	37,4	29,1	8,32	-	-
Escenario GNC	318,2	29,1	8,32	268,31	12,47

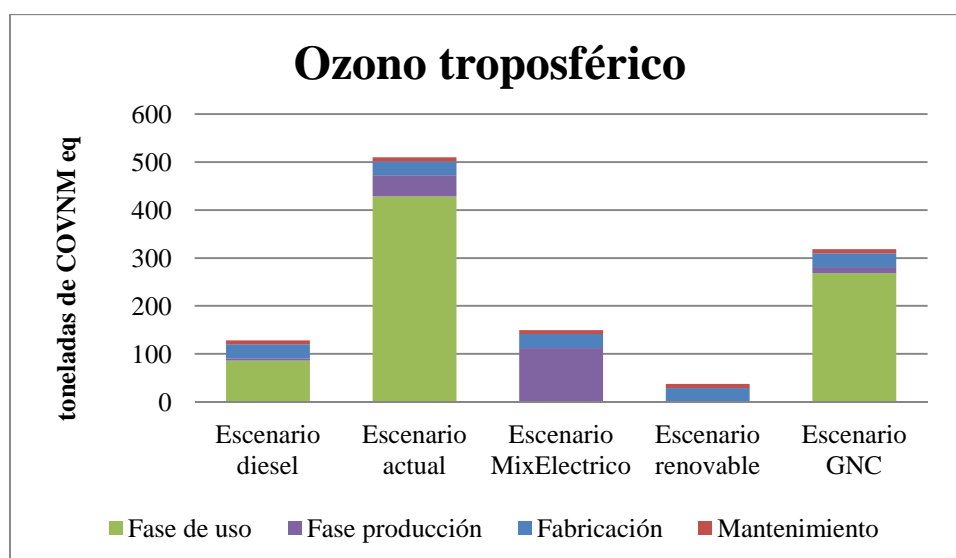


Figura 69: Comparación de impacto de ozono troposférico entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Acidificación

Tabla 50: Datos para la comparación de impacto de acidificación entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Acidificación (kmol H+ eq)					
	TOTAL	VLC		FLC	
		Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT
Escenario diésel	136,18	62,15	4,24	56,47	13,32
Escenario actual	456,3	62,15	4,24	318,5	71,39
Escenario MixEléctrico	237,8	62,15	4,24	-	171,38
Escenario renovable	66,4	62,15	4,24	-	-
Escenario GNC	296,7	62,15	4,24	195,95	34,39

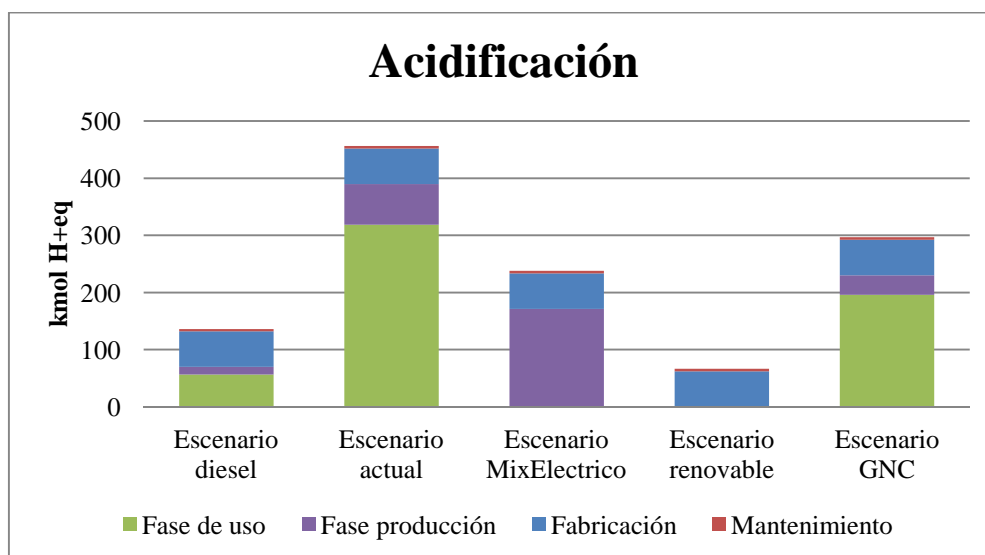


Figura 70: Comparación de impacto de acidificación entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Eutrofización

Tabla 51: Datos para la comparación de impacto de eutrofización entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Eutrofización (kmol N eq)					
	TOTAL	VLC		FLC	
		Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT
Escenario diésel	436,9	95,78	23,52	309,39	8,23
Escenario actual	2111,6	95,78	23,52	1 822	170,26
Escenario MixEléctrico	577,0	95,78	23,52	-	457,68
Escenario renovable	119,3	95,78	23,52	-	-
Escenario GNC	1 263,5	95,78	23,52	1 123	21,24

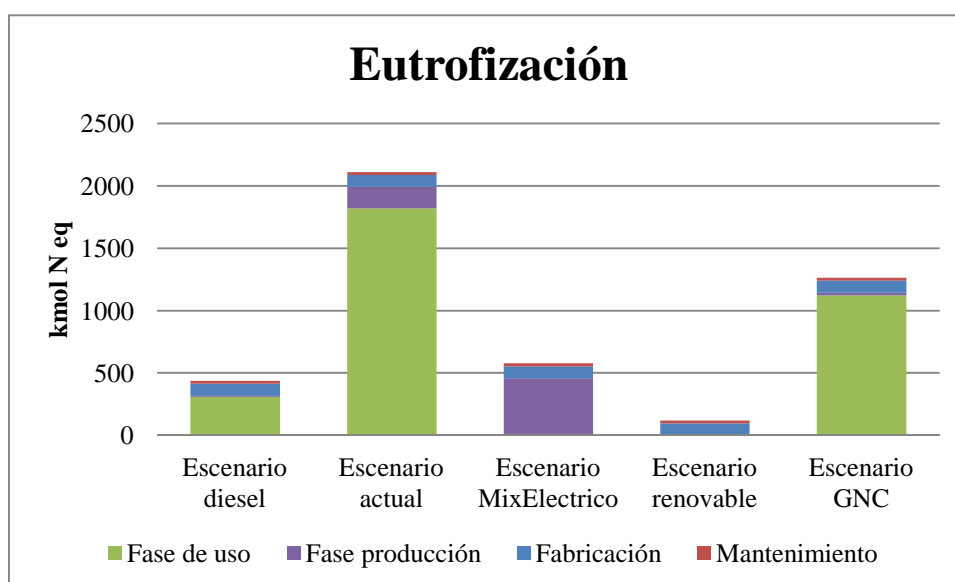


Figura 71: Comparación de impacto de eutrofización entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Material particulado

Tabla 52: Datos para la comparación de impacto de material particulado entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Material particulado (t PM _{2,5} eq)					
	TOTAL	VLC		FLC	
		Fabricación del vehículo	Mantenimiento del vehículo	TtW	WtT
Escenario diésel	2 202,91	34,76	4,62	2 162	1,53
Escenario actual	2 222,21	34,76	4,62	2 179	3,83
Escenario MixEléctrico	2 207,88	34,76	4,62	2 161	7,5
Escenario renovable	2 200,38	34,76	4,62	2 161	-
Escenario GNC	2 207,34	34,76	4,62	2 164	3,96

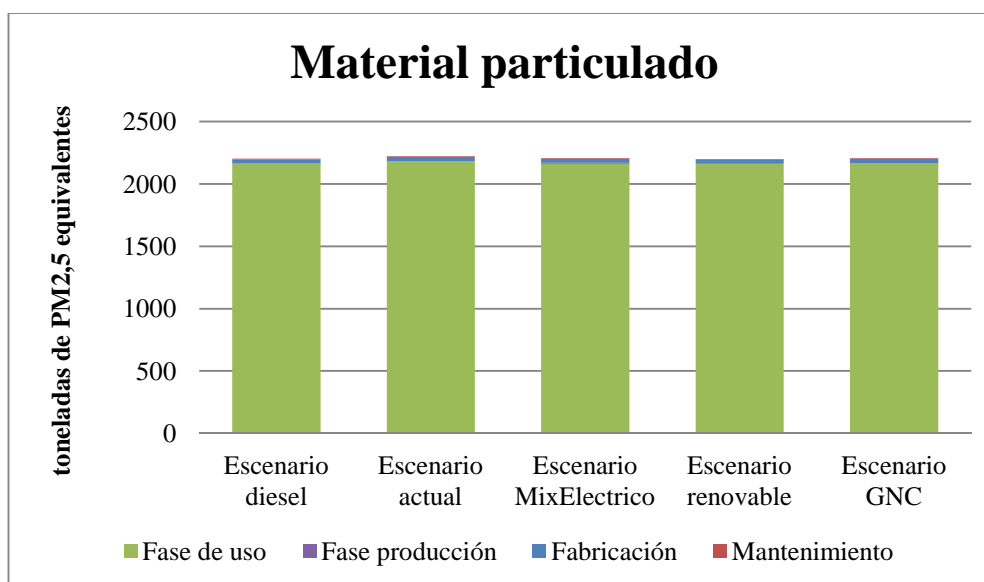


Figura 72: Comparación de impacto de material particulado entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar, que todos los escenarios disminuyen todos los impactos respecto al escenario actual, salvo en el impacto de cambio climático, donde el escenario GNC aumenta la contribución a dicho impacto debido principalmente a el mayor consumo de combustible y a que no presenta ninguna mejora para la reducción de emisiones de GEI. Por otro lado en el caso de material particulado, las diferencias entre escenarios son muy pequeñas porque la fase mayoritaria (TtW) es la misma en todos los escenarios porque como ya se ha comentado se debe a la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento y por tanto solo depende del peso del vehículo, que se ha supuesto igual en

todos los casos. En el resto de impactos se observa un mismo patrón de disminución con respecto al escenario actual, de menor a mayor disminución se ordenan de la siguiente manera: escenario renovable, diesel, MixEléctrico y por último GNC. Para un mejor análisis de los escenarios se dispone de la *Figura 73*.

5.2 Valoración de impactos ambientales, sociales y económicos

Este trabajo se ha orientado principalmente a la valoración de los impactos ambientales, para obtener conclusiones sobre cuál de los escenarios estudiados es el más adecuado para encaminarse hacia un futuro más sostenible. Sin embargo, no conviene olvidar que las mejoras relativas al impacto ambiental de un producto, en este caso de un autobús de servicio público, tienen también impactos sobre la sociedad y la economía.

Impactos ambientales

En la *Figura 73* se agrupan las contribuciones de los diferentes escenarios a cada impacto, para su mejor comparación.

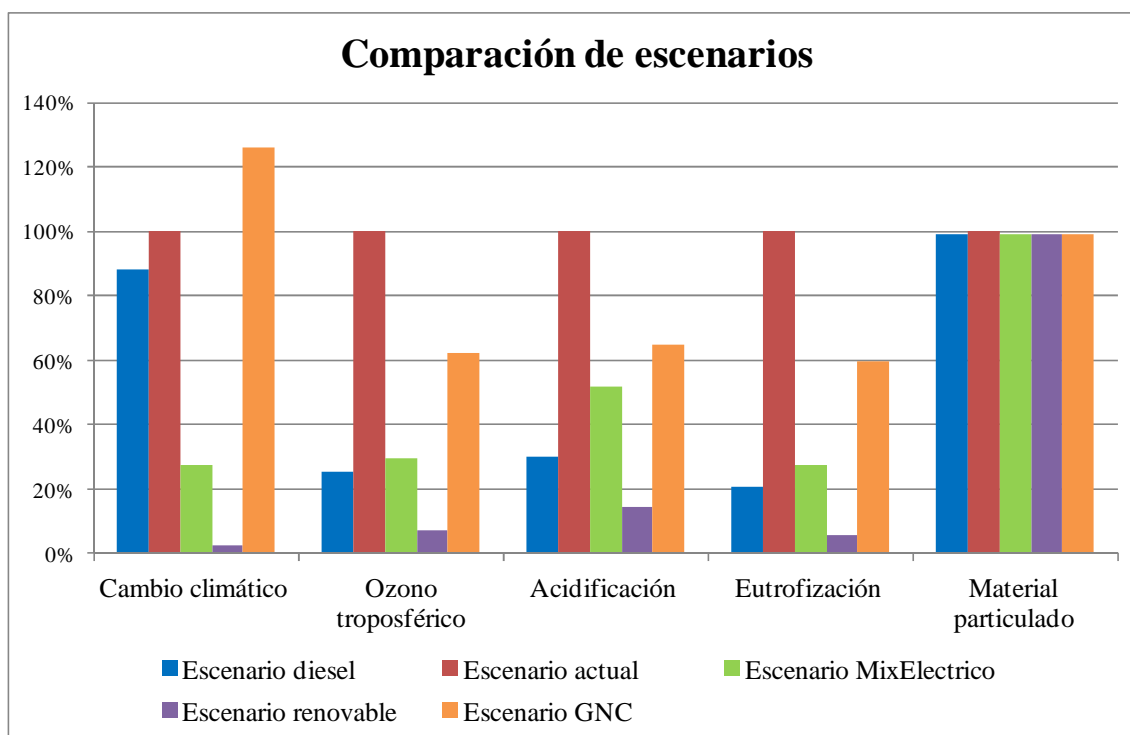


Figura 73: Agrupación de los escenarios según su contribución a los impactos. Fuente: Elaboración propia.

En relación al cambio climático, los escenarios que usan exclusivamente combustibles fósiles (diésel y GNC) presentan un impacto similar al escenario actual. El escenario diésel EURO VI disminuye el impacto ligeramente, mientras que el escenario GNC lo aumenta en torno a un 25 % por el aumento del consumo de combustible. No se observan grandes cambios en los escenarios diésel y GNC respecto al escenario diésel debido a que ninguno de los dos incluye la reducción de las emisiones de los contaminantes propios de este impacto. Por otro lado los escenarios eléctricos reducen

considerablemente el impacto de cambio climático porque eliminan las fases predominantes, la fase TtW y en el caso del escenario renovable también la fase WtT.

Si se comparan entre sí los escenarios diésel y GNC se observa que el escenario de GNC tiene un mayor impacto, debido a que la tecnología EEV de GNC consume más combustible que la tecnología EURO VI de diésel, aunque no hay que olvidar que se están comparando tecnologías diferentes en el tiempo.

Después de la fase TtW, la que más contribuye es la fase WtT, sobre todo en los escenarios de combustibles fósiles porque un 36,7 % (*REE, 2016*) de la energía utilizada en la fase WtT es de origen fósil.

En el caso del ozono troposférico todos los escenarios considerados reducen el impacto con respecto al escenario actual. La fase TtW sigue siendo la de mayor influencia de entre las consideradas. Los escenarios eléctricos al no emitir ningún contaminante en dicha fase, reducen en gran medida la contribución a este impacto.

Después del escenario actual el que más contribuye es el escenario de GNC. Esto se debe a que la tecnología EEV es más antigua que la tecnología EURO VI, la cual introduce una reducción del 80 % en la emisión de NO_x con respecto a la tecnología EURO V que sería la equivalente a la tecnología EEV en el tiempo.

Los escenarios diésel, MixEléctrico, renovable y GNC reducen el impacto en un 75, 70, 96 y 40 % respectivamente en relación al escenario actual.

La contribución a los impactos de ozono troposférico, acidificación, eutrofización y material particulado del escenario MixEléctrico es mayor que el producido por el escenario diésel. Este efecto, a priori contradictorio, es debido a que en el caso del escenario diésel toda la energía consumida en la fase WtT se ha supuesto energía térmica y por lo tanto no ha sufrido ninguna transformación, mientras que en el caso del escenario MixEléctrico, toda la energía consumida en esa fase se ha supuesto energía eléctrica.

El mix de tecnologías que conforman la producción de energía eléctrica posee un 36,7 % (*REE, 2016*) de energía primaria fósil (es decir, centrales de carbón, fueloil, gas natural o ciclos combinados) que debe ser transformada a energía eléctrica.

Estas transformaciones llevan asociadas la emisión de grandes cantidades de contaminantes, en concreto muchas más emisiones de PM, NO_x, SO_x y COVNM que en el caso en el que la energía no sufriese ninguna transformación.

Con respecto al impacto de acidificación y eutrofización en los que el contaminante de mayor contribución es el NO_x, el escenario diésel reduce en gran medida el impacto en relación con el escenario actual debido a que la tecnología EURO VI reduce las emisiones de NO_x en la fase TtW.

Por último en el impacto de material particulado todos los escenarios comparten prácticamente la misma contribución, debido a que todos ellos emiten la misma cantidad de PM por la abrasión del pavimento, neumáticos y frenos producida por el peso del vehículo, pero todos disminuyen ligeramente las emisiones de PM con respecto al escenario actual.

Se puede comprobar que en todos los casos las fases TtW y WtT son las mayoritarias. Y que las fases de fabricación y mantenimiento del autobús son las mismas para todos los escenarios porque se ha considerado un único modelo de autobús para todos ellos.

Observando los resultados se puede concluir que el escenario que menos contribuye al conjunto de los impactos ambientales es el escenario renovable, porque elimina a excepción del material particulado las emisiones correspondientes a la fase TtW y WtT.

Si comparamos los escenarios que mantienen el uso de combustibles fósiles, el escenario diésel genera menores impactos con respecto al escenario de GNC; sin embargo, hay que volver a recordar que se trata de tecnologías diferentes en el tiempo, y que por tanto la tecnología diésel utilizada en este trabajo incorpora mejores tratamientos para la reducción de las emisiones que el escenario de GNC considerado.

Por último conviene apuntar, que a pesar de que podría suponerse lo contrario, en algunos impactos (ozono troposférico, acidificación, eutrofización y material particulado) el escenario Mixeléctrico (que elimina las emisiones de la fase de uso) contribuye en mayor medida que el escenario diésel por las mayores emisiones de contaminantes en los procesos de transformación a energía eléctrica en las grandes centrales convencionales. Sin embargo, los dos escenarios eléctricos sí solucionan el problema de la mala calidad del aire de las grandes ciudades como Madrid porque

aunque algunos contaminantes se emiten en mayor cantidad, lo hacen fuera de los núcleos urbanos.

Impactos sociales

El cambio de flota de autobuses hacia una más sostenible tiene también sus efectos sobre la sociedad. En el caso de Madrid, como en otras muchas ciudades europeas con el mismo problema de calidad del aire, se reducirían los impactos sobre la salud.

La contaminación atmosférica reduce la esperanza de vida e incrementa la posibilidad de aparición de enfermedades respiratorias y cardíacas además de tener un considerable impacto económico al aumentar los costes médicos, según la OMS, (2018) (Organización Mundial de la Salud).

Adoptando cualquiera de los escenarios eléctricos se solucionaría tanto el problema de enfermedades respiratorias y cardíacas como la reducción del ruido por parte del transporte público urbano. No obstante, las emisiones de material particulado producido por la abrasión de frenos, neumáticos y pavimento no tendrían por qué verse reducidas.

En general, el cambio de tecnologías convencionales por otras más respetuosas con el medio ambiente en un servicio público con tanta visibilidad para el ciudadano como el transporte urbano por carretera supone un primer paso hacia la concienciación ciudadana con respecto a la conservación y cuidado del medio ambiente por parte de las entidades públicas sirviendo como ejemplo a seguir en el conjunto de la sociedad.

Impactos económicos

Respecto a los impactos económicos ya se ha comentado que la contaminación atmosférica produce un incremento en los costes médicos debido a la aparición de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Otro aspecto a tener en cuenta es el mayor precio de los autobuses de mejores prestaciones medioambientales.

Los costes de consumo de combustible según el sistema de propulsión se pueden calcular fácilmente conociendo los consumos al año calculado en el apartado "3.2.2 Ciclo de vida del combustible: Well to tank (WtT)" y con los precios del gasóleo (1,259€/L) , GNC (1,009€/kg)(MITECO, 2018) y electricidad (0,07997€/kWh)(REE, 2018). Así, según estos costes de mercado el gasto en combustible al año por parte del Ayuntamiento de Madrid sería el siguiente:

- Gasóleo: 55,78 M€
- GNC: 74 M€
- Electricidad: 32,4 M€

Desde el punto de vista económico el uso de una flota de GNC aumentaría el coste del combustible porque a pesar de su menor precio el consumo es mayor y una flota eléctrica reduciría el precio algo menos de la mitad. Sin embargo, estos datos se deben tomar como meras estimaciones puesto que al ser el Ayuntamiento de Madrid un gran consumidor podría negociar directamente los precios y la inversión sería menor.

Esta reducción se refiere al ahorro en los costes de combustible pero hay que tener en cuenta que los autobuses de propulsión eléctrica o de tecnologías más nuevas requieren de una inversión inicial mayor que debe asumir en este caso el Ayuntamiento. Además, hoy en día, el número de fabricantes de autobuses eléctricos es mucho menor que los que se dedican a la fabricación de autobuses con sistemas de propulsión convencional, lo que reduce la competencia y por tanto puede incrementar el precio. Por otra parte, y no menos importante los escasos fabricantes de dichos autobuses pueden estar situados en otros países lo que obligaría a trasladar el mercado a otros países dejando fuera a los fabricantes locales.

Por otro lado, un cambio hacia una flota de autobuses eléctricos ayuda también a promover el sector de los vehículos limpios incorporándolos en la vida cotidiana de las personas y normalizando la transición energética.

En definitiva, la opción de la flota de autobuses más sostenible de la ciudad de Madrid es sin duda el escenario renovable, como se ha demostrado. Aunque no hay que olvidar que aparte de los impactos ambientales se producen cambios positivos y negativos en la economía y la sociedad, pudiendo modificar esta conclusión. Se ha podido observar que existen otras opciones que también disminuyen las emisiones de los contaminantes, aunque en menor medida.

6. Líneas futuras de investigación

Este trabajo evalúa diferentes escenarios ficticios que pretenden valorar las diferencias entre la movilidad de 2014 con otras posibilidades futuras que se han comparado para obtener aquellas más sostenibles. Sin embargo, como ya se ha comentado, este trabajo tiene unas limitaciones que podrían estudiarse en trabajos futuros.

Por un lado, se podrían suplir las limitaciones con respecto a la falta de datos:

- Diferenciando en la fase de fabricación del vehículo la técnica empleada, los materiales utilizados... Para poder valorar las diferencias de construcción entre los modelos de autobús, por ejemplo, las diferencias según la fuente energética.
- Utilizando tecnologías iguales en el tiempo, algo que no se ha podido hacer en el caso de la comparación entre un autobús de tecnología EURO VI diésel y EEV de gas natural por falta de información.

Otra futura línea de investigación, sería incluir en el estudio de ACV las emisiones producidas en todo el proceso de construcción de las instalaciones de generación de energía, por ejemplo: la construcción de las refinerías, de los aerogeneradores, de las instalaciones hidráulicas o de las centrales convencionales.

Además, se debería tener en cuenta que proporción de dichas tecnologías (nuclear, carbón, renovables...) llega a Madrid y en el caso del escenario eléctrico renovable definir también qué proporción lo conformaría (eólica, solar, hidráulica...) estudiando qué diferencias se producirían si esa proporción variase.

Con respecto a la fiabilidad de los datos se podría enfocar este mismo trabajo comparando documentos de un único año. De esta manera no albergaría ningún error referente a cambios que se hayan podido producir de un año para otro. Dichos cambios pueden haberse producido en los factores de emisión, en la tecnología de algunos vehículos o cambios sobre normativas o regulaciones europeas o municipales.

Y sobre los factores de emisión para mejorar la fiabilidad de los datos se podrían calcular todos los contaminantes de la fase de uso (TtW) con el programa COPERT.

Por último y como propuesta final, como se ha podido ver en el "*Estudio de parque circulante de la ciudad de Madrid*", el porcentaje de los recorridos de los autobuses de la EMT es muy pequeño en comparación con el parque de vehículos que al año circulan por la ciudad de Madrid por tanto sería interesante evaluar las reducciones de los mismos impactos estudiados para los vehículos particulares con el objetivo de observar cómo se vería afectada la ciudad de Madrid en términos de calidad del aire.

7. Bibliografía

Ayuntamiento de Madrid (AM), 2013. Dirección general de sostenibilidad y planificación de la movilidad: Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid. Año 2013.

Ayuntamiento de Madrid (AM), 2014a. Secretaría general División de estudios estadísticos y documentación. Energía y cambio climático: Balance energético del municipio de Madrid 2014.

Ayuntamiento de Madrid (AM), 2014b. Empresa municipal de transportes: Recorridos de autobuses de la EMT.

Ayuntamiento de Madrid (AM), 2015. Área de gobierno de medio ambiente y movilidad: Inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera en la Ciudad de Madrid 1999-2015.

Ayuntamiento de Madrid (AM), 2017. Área de gobierno de medio ambiente y movilidad: Dossier plan de calidad de aire y cambio climático.

European comission, Joint Research Center and Institute for Environment and Sustainability (EC-JRC-IES), 2012: *Characterisation Factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment Methods. Database and Supporting Information.*

European Environment Agency (EEA), 2016. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.* EEA Technical Report No. 21/2016. Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>

Ecoinvent, 2014. Ecoinvent Data 3.1. Ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

Garcia et al., 2012. Comparison of Life Cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas, biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system. *Energy* 47 (2012), 174-198

International Organization for Standardization (ISO), 2006. ISO 14040: Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. Madrid, España: AENOR.

International Organization for Standardization (ISO), 2006. ISO 14044: Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y directrices. Madrid, España: AENOR.

López et al., 2009. Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid. *Applied Energy* 86 (2009), 610-615.

Ministerio de Agricultura y Pesca. Alimentación y Medio ambiente (MAPAMA), 2016: Inventario nacional de emisiones 2016.

Ministerio para la transición ecológica (MITECO), 2018. Precios de carburantes. Disponible en: <http://www.mincotur.gob.es/energia/es-ES/Servicios/Paginas/consultasdecarburantes.aspx>

Consultado en Junio 2018.

Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Samaras, Z., 2009. COPERT: a European road transport emission inventory model. In: Athanasiadis, I.N., Mitkas, P.A., Rizzoli, A.E., Marx Gómez, J. (Eds.), Environmental Science and Engineering. Springer, pp. 491–504.

Oficina Española de Cambio Climático (OECC), 2018. Ministerio de Agricultura y Pesca. Alimentación y Medio ambiente: Cambio climático. Informe de mitigación: Políticas y Medidas. Disponible en: <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx#para2>

Consultado en Abril 2018.

Organización mundial de la salud (OMS), 2018. Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas. Disponible en: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/air_pollution/es/

Panel intergubernamental contra el cambio climático (IPCC), 2014. Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Disponible en: <https://www.google.com/search?q=CAMBIO+climatico+informe+de+sinthesis+2014&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b>

Red Eléctrica de España (REE), 2016. El Sistema Eléctrico Español. Informe 2016.

Red eléctrica española (REE), 2018. Sistema de información del operador del sistema: Precio electricidad. Disponible en: <https://www.esios.ree.es/es/pvpc>

Consultado en Junio 2018.

Rodríguez et al., 2015. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Análisis del ciclo de vida de procesos y productos.

SimaPro 8.0.5.13., 2015. Programa informático. PRé Sustainability Consultants B.V, Amersfoort.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Titulación: **GRADUADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

Itinerario: **Tecnologías Energéticas**

PROYECTO FIN DE GRADO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO A UNA FLOTA DE
AUTOBUSES PÚBLICOS URBANOS: LA CIUDAD DE MADRID COMO CASO
DE ESTUDIO

DOCUMENTO Nº2 ESTUDIO ECONÓMICO

1. Programación temporal

La programación de este trabajo ha sido variada. El trabajo comenzó en Julio del año 2017 con la conformidad del tutor, profesor perteneciente al departamento de ingeniería química industrial y del medio ambiente de la Escuela técnica de Ingenieros Industriales de la UPM.

Durante el verano se definió el tema del proyecto, y posteriormente se realizó una lectura exhaustiva sobre la metodología de ACV y se hizo una lectura de diferentes artículos para conseguir un acercamiento al modo de desarrollo de los trabajos de ACV.

Después del comienzo del curso, con toda la documentación leída se empiezan los cálculos del escenario actual, utilizando tanto documentación europea y municipal como usando los diferentes programas informáticos ya mencionados. Tras el cálculo del escenario actual se procede al cálculo de los demás escenarios.

Los cálculos y obtención de las comparativas entre escenarios ocupan el periodo escolar, desde septiembre de 2017 hasta aproximadamente abril de 2018. Posteriormente y en último lugar se redacta el trabajo en base a la normativa de la Escuela técnica de Ingenieros de Minas de la UPM, actividad que comprende los meses de mayo y junio de 2018.

La programación temporal del trabajo se muestra en la *Figura 74*:

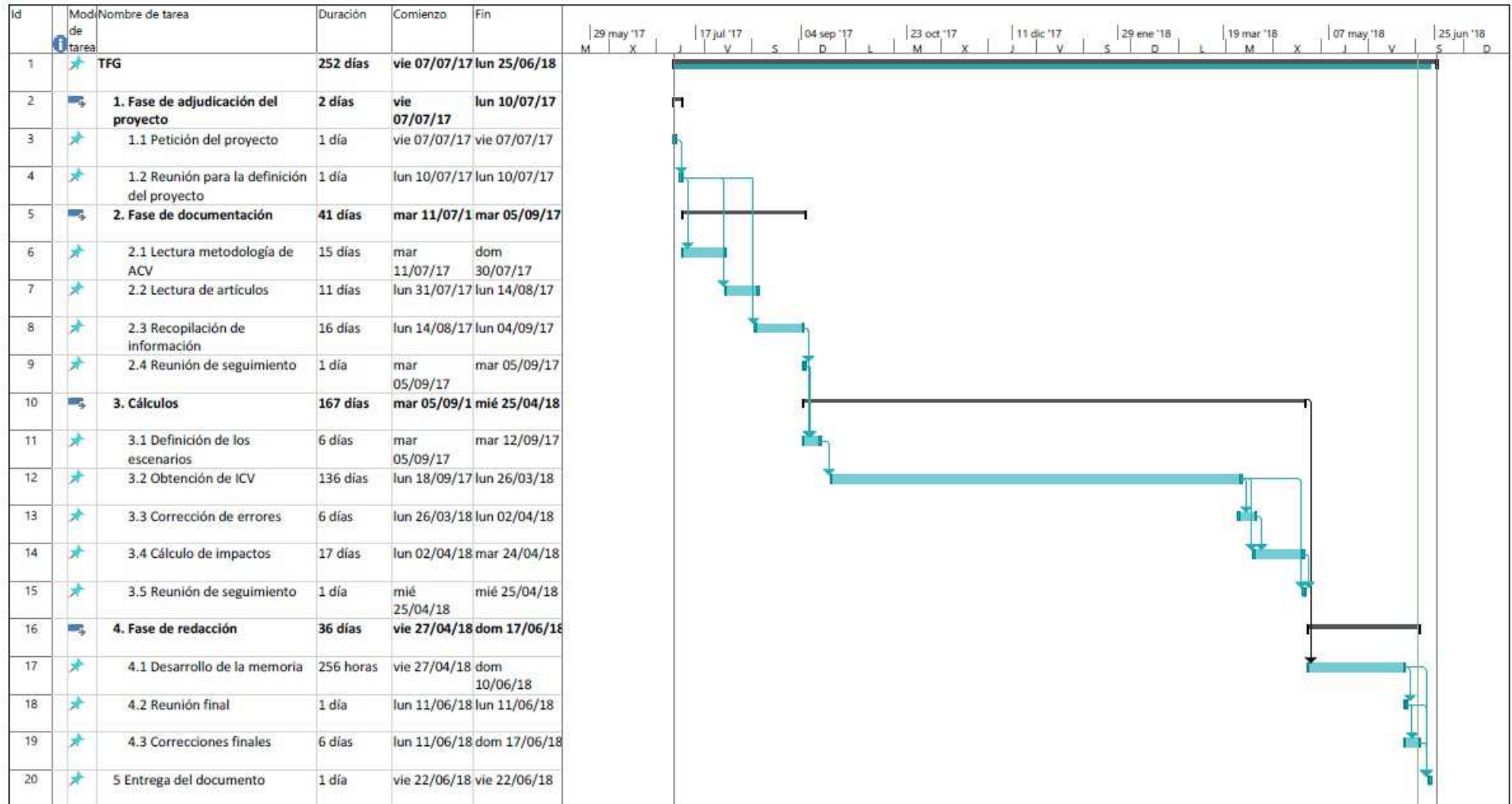


Figura 74: Diagrama de Gannt. Fuente: Elaboración Propia.

2. Presupuesto

El presente trabajo ha sido fundamentalmente un trabajo teórico. Se han obtenido las conclusiones únicamente mediante cálculos y valoraciones. La realización de este trabajo ha sido posible gracias a tanto la dedicación del alumno y del profesor como a los programas informáticos utilizados.

Todos estos recursos tienen un valor económico que se debe contabilizar, tanto la propia ejecución del trabajo, por el uso de herramientas informáticas como las horas dedicadas a su elaboración.

Los costes de este proyecto se van a dividir en tres grupos:

- Costes de personal.
- Costes de programas informáticos y normas utilizadas para el desarrollo del trabajo y el ordenador en sí.
- Costes indirectos: incluye electricidad, fotocopias, cartuchos de tinta, conexión a internet etc. Se estiman en un 10% de la suma de los costes anteriores.

El resumen de los costes del trabajo se realiza en la *Tabla 53*:

Tabla 53: Presupuesto total. Fuente: Elaboración propia

Recursos	Horas trabajadas	Coste (€/h)	Coste (€)
Tutor	60	60	3 600
Alumno	328	20	6 560
Ordenador	303	0,045	13,64
Licencia SigmaPro	-	-	2 000
Licencia COPERT	-	-	0,00
Licencia Microsoft	303	0,014	4,2
Norma ISO 14040:2006	-	-	53
Norma ISO 14044:2006	-	-	70
Costes indirectos	-	10% del total	1 230
TOTAL			13 531