

Modelos para el cálculo de consumo y emisiones gaseosas de la flota de autobuses de Madrid

Angélica Arenas

J.T.P D.E¹, Facultad de Ingeniería, IIDISa² Universidad Nacional de Salta, Argentina

Pablo Argenti Salguero

J.T.P D.S³, Universidad Nacional de Salta, Argentina

José M^a López Martínez

Subdirector, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, España

Felipe Jiménez Alonso

DDSIV. Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, España

Javier Páez Ayuso

DDA, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, España

Francisco Aparicio Izquierdo

Director, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, España

RESUMEN

En este trabajo se presentan algunos resultados del estudio experimental de cálculo de emisiones emanadas en condiciones concretas de la explotación del servicio de la flota de vehículos del transporte público de pasajeros de la ciudad de Madrid, realizado en el marco de cooperación entre grupos de investigación del Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA) de la Universidad Politécnica de Madrid y del Instituto de Desarrollo Industrial (IIDISA) de la Universidad Nacional de Salta.

La experiencia consistió en la adquisición de datos de emisiones de contaminantes y consumo de combustible mediante un equipo de medida de emisiones a bordo en un vehículo de prueba en condiciones reales de explotación, en los que se tomaron además, datos de variables cinemáticas en distintas líneas y recorridos representativos de las que conforman el servicio de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid. Con los datos adquiridos se han ajustado modelos para la estimación de emisiones contaminantes y consumo en un escenario de 30 ciclos, con el objetivo de obtener valores por unidad (30 ciclos) que pueden ser utilizados como valores de referencia.

Por razones de extensión, en este estudio se presentan los resultados del modelo estadístico

1 JTP DS: Jefe de Trabajos Prácticos - Dedicación Exclusiva

2 IIDISA: Instituto de Ingeniería y Desarrollo Industrial de Salta

3 JTP DS: Jefe de Trabajos Prácticos - Dedicación Semi-Exclusiva

4 DDSIV: Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes en Vehículos.

5 DDA: Director de la Unidad de Estudios de Accidentología.

para el cálculo del consumo y las emisiones totales de CO₂ ajustado en función de variables cinemáticas como la *velocidad media* del autobús y el *tiempo*, en una de las líneas de servicio más largas de la ciudad: la línea Circular Uno (C1).

Las expresiones obtenidas permiten estimar el consumo de combustibles y emisiones de CO₂ con valores del coeficiente de correlación superior al 70%. A su vez, es posible realizar un análisis de la gestión de la flota de transporte inspirada en la comparación de los ciclos de operación de las líneas y la evaluación de los impactos producidos por la sustitución de vehículos y combustibles.

Palabras clave: consumo de combustibles, emisiones contaminantes, flota de transporte urbano

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción general

La manifestación física de la contaminación del aire se observa en la presencia de esmog⁴ en las ciudades. De hecho, una de las fuentes más importantes de emisiones la constituyen los automóviles, aunque en zonas rurales la contribución a este fenómeno proviene de los bosques. La neblina se conforma de pequeñas gotas de agua de color amarillo-grisáceo que contiene sustancias reactivas que se han transformado en el aire contaminado. Estas sustancias son los factores que ocasionan problemas en la salud de la población humana y para ser amplios, sobre el medio ambiente. La calidad del aire va empeorando, en base a una regla general, con la vía del desarrollo de las comunidades, así el aire de la ciudad de México, se considera como uno de los más contaminados en comparación a muchas ciudades del mundo (Baird, 2001). La atmósfera contiene oxígeno (O₂) que conduce a la oxidación de las sustancias naturales y contaminantes que conforman la masa de aire y luego de su *oxidación*, estos productos de las reacciones, finalmente, son depositados en la masa terrestre. El incremento de la contaminación en el ambiente y sus efectos adversos ha impulsado a los estados a regular y gestionar los niveles de emisiones permisibles en busca de mejoras en el desempeño de las actividades industriales y derivados. Ello ha acarreado un progreso en la calidad del aire en las ciudades desarrolladas debido a acciones basadas en la limitación de las emisiones y desarrollando tecnología para esas metas ambientales.

1.2 Materiales y métodos

En este trabajo se han utilizado las mediciones de concentraciones y emisiones de 3 líneas de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT). Los datos de las líneas 27 y 145, han sido utilizados para la caracterización de los distintos ciclos y mediante el ajuste de distintos modelos, seleccionar las variables explicativas en un trabajo anterior (Arenas et al, 2009). Los datos de la línea C1 se han utilizado para ajustar un modelo propio.

Las concentraciones y cantidades de las emisiones medidas en el gas de escape; monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos totales

⁴ Niebla mezclada con humo y partículas en suspensión, propia de las ciudades industriales.

(THC), como así también el consumo de combustible fueron determinadas mediante el sistema de medición a bordo del vehículo de prueba, *On Board Emisión Measurement System OBS - 2200*, marca HORIBA (OBS-2200). En el equipo OBS - 2200, CO y CO₂ son analizados utilizando un detector infrarrojo NDIR (Non Dispersive Infrared). El OBS 2200 determina la cantidad de hidrocarburos totales (THC) en muestra utilizando un detector de ionización de llama (FID) y usa un detector de quimioluminiscencia (CLD) para NO_x, es decir la suma de las cantidades de los óxidos NO y NO₂. La medición de la emisión de Partículas (PM) se realizó con el equipo *Diesel Particle Measurement System MAHA*.

La información sobre las características de la flota y las condiciones de explotación de las líneas fueron obtenidas de la EMT. Los datos permitieron la selección de las líneas representativas del servicio y la realización de pruebas experimentales bajo condiciones reales de funcionamiento en la operación del transporte público. Las mediciones en las líneas 27 y 145 se utilizaron para la caracterización de los ciclos de movimiento y selección de variables explicativas, en dos situaciones de carga: vacío y media carga y vehículos propulsados con distintos combustibles: biodiesel derivado del cultivo de colza (B100), gas natural (GN) y gasóleo (GO). También se obtuvieron las emisiones instantáneas y acumuladas, consumo de combustible y velocidad del vehículo a cada instante (informe de las variables medidas con intervalos de un segundo) para cada condición del estudio experimental. Los resultados de las emisiones y consumo para la línea Circular uno (C1) se presentan en la sección 3,

2. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LAS LÍNEAS 27 Y 145. CARACTERIZACIÓN DE LOS CICLOS. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS.

Las mediciones realizadas en los vehículos se han analizado con un programa en Lenguaje MATLAB para la obtención de los ciclos característicos adoptados como patrón de operación de los vehículos de todas las líneas estudiadas, asumiendo la metodología de cálculo de consumo y emisiones basadas en la utilización de la velocidad media como parámetro descriptivo de los ciclos. Los mismos pueden ser clasificados en ciclos de movimiento (CiMov) y ciclos de parada (CiPa) (Figura 1), adoptándose como parámetros de los ciclos: la *velocidad media* propia de un ciclo CiMov, el *tiempo de duración* en ambos ciclos (CiMov y CiPa), el acumulado de consumo y emisiones. El estudio estadístico exploratorio de los datos de las líneas 27 y 145 permitió concluir que en los ciclos CiMov, tanto el consumo como las emisiones se correlacionan en forma lineal con la variable *velocidad media* multiplicada por el *tiempo que dura el ciclo*. (Arenas et al, 2009). En cuanto a los ciclos CiPa, el consumo y emisiones se correlacionan en función del *tiempo* que dura el ciclo de detención del autobús. En ambos casos, CiMov y CiPa, el modelo lineal presenta un buen ajuste de los datos experimentales, con valores del coeficiente de correlación (r^2) superiores a 75%.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos del estudio estadístico (variables explicativas y coeficiente de correlación) en la Línea 27 para los ciclos de movimiento (CiMov), en condiciones de media carga y vacío y propulsados a GO (Arenas et al, 2009).

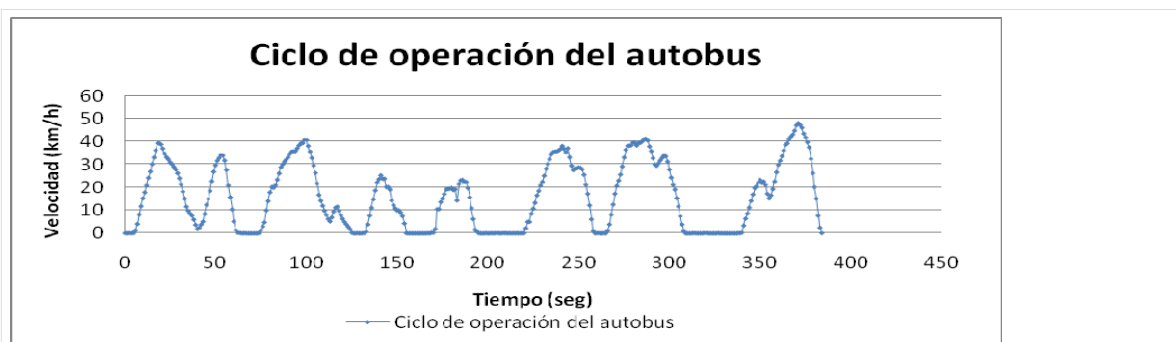


Fig. 1 – Velocidad y tiempo en un ciclo característico de operación del autobús.

Línea 27 en condición de Media Carga		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Velocidad Media en Km/h]	0.724
	Velocidad media por tiempo [m]	0.953
Emisión de THC [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.619
Emisión de NOx [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.923
Emisión Partículas [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.740
Consumo [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.953
Línea 27 en condición de Vacío		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.771
Emisión de THC [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.701
Emisión de NOx [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.773
Emisión Partículas [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	S/D
Consumo [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo [m]	0.771

Tabla 1 – Modelos de Regresión Lineal para emisiones y consumo versus velocidad media por tiempo, en CiMov Línea 27, condición de V y MC, GO. S/D: sin datos.

En la Tabla 2 se muestran los resultados para los ciclos de parada de la línea 27, en condiciones de media carga y vacío y gasóleo como combustible. La variable independiente del modelo lineal propuesto es el tiempo de duración del ciclo (t_m).

Línea 27 en condición de Media Carga		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.903
Emisión de THC [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.241
Emisión de NOx [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.978
Emisión de P [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.300
Consumo [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.903

Línea 27 en condición de Vacío		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.848
Emisión de THC [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.375
Emisión de NOx [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.827
Emisión de P [g/ciclo]	Tiempo (s)	S/D
Consumo [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.848

Tabla 2 – Modelos de Regresión Lineal para emisiones y consumo. Línea 27.

Los resultados del modelo lineal para ciclos de movimiento de la línea 145, en condiciones de vacío y media carga, utilizando GO como combustible se resume en la Tabla 3, en condiciones de vacío y media carga, utilizando GO como combustible.

Línea 145 en condición de Media Carga		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.931
Emisión de THC [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.921
Emisión de NOx [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.881
Emisión de P [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.973
Consumo [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.931
Línea 145 en condición de Vacío		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.898
Emisión de THC [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.737
Emisión de NOx [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.865
Emisión de P [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.843
Consumo [g/ciclo]	Velocidad media por tiempo[m]	0.898

Tabla 3 – Modelos de Regresión Lineal entre emisiones y consumo versus velocidad media por tiempo para ciclos de movimiento en la línea 145.

Los valores obtenidos (variables explicativa y coeficiente de correlación) en el modelo lineal para los ciclos de parada en la línea 145 se presentan en la Tabla 4.

Línea 145 en condición de Media Carga		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.794
Emisión de THC [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.069
Emisión de NOx [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.820
Emisión de P [g/ciclo]	Tiempo (s)	S/D
Consumo [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.794

Línea 145 en condición de Vacío		
Variable dependiente	Variable independiente	R ²
Emisión de CO ₂ [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.982
Emisión de THC [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.902
Emisión de NOx [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.988
Emisión de P [g/ciclo]	Tiempo (s)	S/D
Consumo [g/ciclo]	Tiempo (s)	0.982

Tabla 4 – Modelos de Regresión Lineal entre emisiones y consumo versus tiempo de ciclo de paradas para la línea 145.

3.- RESULTADOS. ESTIMACIÓN DE CONSUMOS Y EMISIONES EN LA LÍNEA C1.

La Ecuación (1) representa la expresión genérica del modelo matemático para estimar las emisiones contaminantes, y consumo de combustible, con las contribuciones de los ciclos CiMov y CiPa para cada recorrido del vehículo de la línea C1:

$$E_{Ti}(g) = (b_{1mi} Vm \bar{t}_m + b_{0mi})n + (b_{1pi} \bar{t}_p + b_{0pi})n \quad (1)$$

$E_{Ti}(g)$: Emisión total de la sustancia i durante el recorrido, en gramos.

Vm : Velocidad media del ciclo de movimiento en metros/segundos.

\bar{t}_m : Tiempo medio de duración de ciclos de movimiento en segundos.

\bar{t}_p : Tiempo medio de duración de ciclos de paradas en segundos.

n : Cantidad de ciclos.

b_{0mi} ; b_{1mi} : Constantes del ciclo de movimiento.

b_{0pi} ; b_{1pi} : Constantes del ciclo de parada.

Para la línea C1 se realizó un análisis comparativo en los distintos niveles de carga y combustibles utilizados. Las emisiones estimadas para la línea C1 en Vacío se muestran en la Tabla 5.

Combustible [CO ₂] Vacío	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Emisión Estimada (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	13,23	1,29	73,80	5,20	1,60	96,80	176,70	23,57	8518,98
GASOIL	30	29,84	1,01	83,30	2,63	1,43	98,00	176,70	23,57	7362,71
GNC	30	22,64	1,20	70,90	4,56	1,99	74,20	176,70	23,57	8556,97
Combustible [THC] Vacío	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Emisión Estimada (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	1,4E-03	5,9E-05	71,90	1,7E-04	1,0E-04	79,70	176,70	23,57	0,43
GO	30	0,01	6,8E-05	66,90	2,3E-04	1,5E-04	71,50	176,70	23,57	0,71
GNC	30	0,04	1,8E-03	21,70	0,01	2,0E-04	6,50	176,70	23,57	--
Combustible [NOx] Vacío	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Emisión Estimada (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	0,08	0,01	71,50	0,14	0,03	96,90	176,70	23,57	109,87

GO	30	0,47	0,01	83,90	0,07	0,03	96,90	176,70	23,57	99,95
GNC	30	0,05	0,01	62,70	0,09	8,8E-04	6,00	176,70	23,57	--

Tabla 5 – Regresión lineal y resultados de emisiones para la condición de vacío utilizando distintos combustibles.

Las emisiones estimadas para la línea C1 en media carga (MC) se muestran en la Tabla 6.

Combustible [CO ₂] MC	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Emisión Estimada (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	80,52	1,03	69,30	16,56	1,92	92,00	176,70	23,57	9738,19
GO	30	7,66	1,42	68,30	9,10	2,04	95,20	176,70	23,57	9484,13
GNC	30	47,43	1,25	64,50	1,28	2,54	88,00	176,70	23,57	--
Combustible [THC] MC	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Emisión Estimada (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	2,4E-03	3,2E-05	56,80	7,0E-04	7,1E-05	51,60	176,70	23,57	--
GO	30	1,9E-03	6,4E-05	49,90	0,00	1,3E-04	62,10	176,70	23,57	--
GNC	30	0,01	2,3E-03	9,00	3,6E-03	7,1E-05	1,30	176,70	23,57	--
Combustible [NO _x] PC	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Emisión Estimada (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	1,25	0,01	69,10	0,28	0,04	90,10	176,70	23,57	142,44
GO	30	0,50	0,01	62,90	0,21	0,04	89,10	176,70	23,57	--
GNC	30	0,31	0,01	52,00	0,10	0,00	0,20	176,70	23,57	--

Tabla 6 – Regresión lineal y resultados de emisiones para la condición de media carga (MC) utilizando distintos combustibles.

La Tabla 7 muestra los resultados para el consumo de combustible en diferentes composiciones del estudio experimental: tipo de combustible y ciclos.

Combustible Consumo Vacío	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Consumo estimado (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	4.27	0.41	73.20	1.65	0.50	96.80	176.70	23.57	2702.67
GO	30	9.45	0.32	82.90	0.83	0.45	97.90	176.70	23.57	2329.39
GNC	30	8.44	0.42	71.10	1.76	0.68	73.80	176.70	23.57	3013.10
Combustible Consumo MC	n	(n) CiMov			(n) CiPa			Vm . t (m)	t _m (s)	Consumo estimado (g)
		b ₀	b ₁	R ²	b ₀	b ₁	R ²			
B100	30	25.59	0.33	68.00	5.28	0.61	91.60	176.70	23.57	3082.96
GASOIL	30	2.43	0.45	67.60	2.89	0.65	95.00	176.70	23.57	3002.94
GNC	30	16.13	0.44	64.70	0.47	0.86	87.70	176.70	23.57	3421.51

Tabla 7 – Consumo estimado según el modelo propuesto.

En la Tabla 8 se muestran los valores estimados de las emisiones totales de CO₂ para las

condiciones de carga analizadas y los combustibles usados.

Condición de	Emisión total de CO ₂ (g) (CiMov + CiPa)		
	B100	GO	GNC
MC	9738,19	9484,13	9868,51
V	8518,98	7362,71	8556,97

Tabla 8 – Emisiones totales de CO₂ estimadas con el modelo lineal.

CONCLUSIONES

En los ciclos de paradas se obtienen mejores ajustes de la regresión lineal que en los ciclos de movimiento, lo que permite modelizar a los primeros con una mayor precisión. En los ciclos de movimiento, la variabilidad de los datos experimentales es más significativa. El mejor ajuste de las condiciones en vacío puede deberse a que en el modelo no se han considerado los tramos con inclinación de calzada, subidas y bajadas y, aunque se puede producir algún efecto de compensación entre ambas situaciones, resulta evidente que al aumentar la carga del vehículo, la influencia de este factor omitido se incrementa, por lo que deberá ser tomada en consideración en futuros trabajos.

Los resultados muestran que el aumento en la condición de carga, es decir, de vacío a media carga, aumentan los niveles de emisiones de CO₂, al consumir el vehículo mayor cantidad de combustible.

En iguales condiciones de experimentación, utilizando distintos combustibles, se registra una mayor emisión de CO₂ y consumo con el combustible B100, en comparación a los otros dos combustibles.

Los peores resultados de los ajustes de los modelos para vehículos propulsados a GN respecto a los otros, se puede explicar porque las emisiones pueden estar más influenciadas por los procesos de aceleración que no están representados en el modelo, al considerar sólo velocidad media x tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado en el marco del Proyecto *Desarrollo de una metodología para el análisis de las variables de influencia en el consumo y emisiones gaseosas de la flota de vehículos de transporte urbano de pasajeros*, del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA), y del Proyecto de Investigación *ECOTRAM: Desarrollo de una metodología de análisis del consumo energético y las emisiones contaminantes producidas por el transporte público urbano de viajeros. Aplicación a la ciudad de Madrid*, financiado por el Plan Nacional I+D+i 2004 - 2007. Subprograma Nacional de tecnologías para la Gestión Sostenible Medioambiental. 2006 - 2008. Ministerio de Medio Ambiente. A081/2007/1-13.1 y cofinanciado por la Empresa Municipal de Transporte de Madrid y el Ayuntamiento de Madrid durante los años 2006 a 2009.

Los investigadores de la Universidad Nacional de Salta agradecen personalmente al Director del Instituto Dr. Aparicio Izquierdo, la invitación cursada y su apertura para la integración y el

trabajo colaborativo de los equipos de ambas universidades.

REFERENCIAS

ARENAS A., ARGENTI SALGUERO P., ROBIN J. APARICIO IZQUIERDO F., LOPEZ MARTÍNEZ J., JIMENEZ ALONSO F., FLORES HOLGADO N. (2009), Principales componentes de las emisiones gaseosas y consumo de combustibles de autobuses de servicio urbano de pasajeros: aplicación a la ciudad de Madrid. *Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 23*, pp. 1-7.

BAIRD C. (2004). *Química Ambiental*. Editorial Reverté S.A., Barcelona.

PEÑA, D. (2002). *Regresión y diseño de experimentos*. Alianza Editorial S.A, Madrid.

PASQUALI, R. C. (2003). *Química Ambiental*. Librería AKADIA Editorial, Buenos Aires.

MENDENHALL, W. y SINCICH, T. (1997). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México.