



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE
EN PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR
TRANSPORTE BAJO UN PROTOCOLO ESTÁNDAR, Y EVALUACIÓN DE LA
COSTO EFECTIVIDAD DE DOS HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE
AHORROS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DIEGO ALEJANDRO RAMÍREZ ARÉVALO

PROFESOR GUÍA

DAVID CARRASCO MANRÍQUEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

ROBERTO CORVALÁN PAIVA

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: DIEGO ALEJANDRO RAMÍREZ ARÉVALO
FECHA: OCTUBRE 2014
PROFESOR GUÍA: DAVID CARRASCO
MANRÍQUEZ

CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN
PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR TRANSPORTE BAJO UN
PROTOCOLO ESTÁNDAR, Y EVALUACIÓN DE LA COSTO EFECTIVIDAD DE DOS
HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE AHORROS

El Área de Transporte de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE), en su funcionamiento desde el 2010 en adelante ha llevado a cabo diversos proyectos, en los cuales ha buscado reducir el consumo de combustible a través de la implementación de Medidas de Mejora de Eficiencia Energética (MMEE). En estos proyectos, el proceso de cuantificación de resultados se ha llevado a cabo de diversas maneras sin seguir un lineamiento común, lo cual no ha permitido hacer estos resultados comparables entre estudios. Es por esto, que la AChEE ha elaborado un protocolo estándar, basado en el Protocolo Internacional de Medida y Verificación (IPMVP), para aplicarse en los proyectos que se realicen a partir del 2014.

Dentro de esta memoria se ha abordado dicha problemática aplicando el protocolo a los proyectos de la AChEE del periodo 2011-2013, para así compararlos con los resultados obtenidos anteriormente. Luego, se evaluó la costo-efectividad de cada proyecto y de dos nuevas herramientas que permiten estimar el impacto de dispositivos aerodinámicos y de conducción eficiente: el análisis de Fluidodinámica Computacional (CFD), y la metodología Potencia Específica Vehicular (VSP), respectivamente.

A partir de la cuantificación estandarizada se obtuvo una diferencia con lo reportado originalmente de 79.225 [lt/anales] menos, producto que este es más estricto. Además se hacen recomendaciones sobre los medidores más adecuados según el tipo de proyecto. Por otro lado, con respecto al análisis CFD se concluye que es aplicable para determinar el impacto de dispositivos aerodinámicos, recomendándose su utilización en las etapas de diseño y puesta a prueba de estas tecnologías. Finalmente, se determina que la Metodología VSP es un buen estimador del consumo de combustible bajo condiciones de conducción normal, que sin embargo adquiere un mayor margen de error en la aplicación de conducción eficiente, estimando una reducción del consumo levemente menor que la real. Todos estos antecedentes impactan en el diseño y futuro desarrollo de la AChEE.

"Porque la unión y cooperación entre nosotros es la que nos llevará a una sociedad justa e igualitaria"

Agradecimientos

Quiero dar infinitos agradecimientos en primer lugar a mis padres por darme el apoyo incondicional, el cariño, la preocupación y las herramientas para ser quien soy, a mis abuelas por quererme, a mis tíos por haberme dado un segundo hogar en mis primeros años de universidad y en mi primera práctica profesional, a mis hermanos por ser parte de mi vida, a mis amigos por darme alegrías, a Mateo y Serafín por ser grandes felinos, a David y todo el equipo de Sistemas Sustentables por la buena onda y por darme la posibilidad de hacer esta memoria, a los funcionarios de la Universidad, en particular a Soledad y don Ricardo por dar lo mejor sí mismos al departamento, y por supuesto al Guille Mella, pilar fundamental de los quehaceres del Cei. Agradezco también a la Macumba por llevarme a recorrer las calles en los tiempos álgidos y aguerridos con la alegría de la música, y a toda la gente que da su esfuerzo a pesar de los ramos por cambiar esta sociedad.

Finalmente agradezco a la Makita, por su inmensa ayuda en todo este tiempo de duro trabajo, por acompañarme en todo momento y por permitir que esta memoria llegara a buen puerto.

Muchas gracias.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Motivación	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1.	Objetivo general	2
1.3.2.	Objetivos específicos	2
1.4	Metodología general	3
1.4.1	Metodología específica.....	4
2.	Antecedentes	8
2.1	Problemática energética	8
2.1.1	Transporte a nivel internacional	8
2.1.2	Transporte a nivel nacional	9
2.1.3	Eficiencia energética como respuesta.....	10
2.2	Medidas de mejora de eficiencia energética para vehículos	10
2.2.1	Artefactos que mejoran la aerodinámica.....	11
2.2.2	Conducción eficiente.....	11
2.2.3	Manejo de cargas auxiliares.....	12
2.2.4	Reducción de la resistencia al rodaje	12
2.2.5	Reducción del consumo de combustible en inactividad del vehículo.....	13
2.2.6	Reducción de peso	13
2.3	Reportes de medida y verificación para proyectos de eficiencia energética.....	14
2.3.1	Descripción	14
2.3.2	Protocolo internacional de medida y verificación.....	14
2.3.3	Protocolo de cuantificación de reducción de consumo energético para el transporte	16
2.3.4	Métodos para cuantificar impacto de Medidas de Eficiencia Energética	18
3.	Metodología experimental para medir el impacto de la medida Conducción Eficiente mediante VSP	34
3.1	Montaje.....	34
3.1.1	Pruebas en pista.....	34
3.1.2	Prueba en condiciones reales de tránsito	36

3.1.3	Instrumentos de medición.....	37
3.1.4	Participantes	38
3.2	Procesamiento de datos.....	38
3.2.1	Obtención del consumo de combustible	38
3.2.2	Obtención de nuevos factores de consumo	40
3.2.3	Comparación de consumos obtenidos por los distintos métodos utilizados	41
3.2.4	Cuantificación de disminución del consumo de combustible debido a Conducción Eficiente.....	41
4.	Resultados y análisis	43
4.1	Cuantificación estandarizada y evaluación de la costo-efectividad de proyectos AChEE 2011-2013	43
4.1.1	Revisión y caracterización de los proyectos AChEE en transporte.....	43
4.1.2	Aplicación del nuevo protocolo a los proyectos del área de transporte de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética en el periodo 2011 – 2013	52
4.1.3	Evaluación de la costo-efectividad de los proyectos analizados	65
4.2	Evaluación de costo-efectividad de la simulación CFD en la medición de impactos de mejoras aerodinámicas	68
4.2.1	Resultados de la revisión bibliográfica	68
4.2.2	Análisis de costos	70
4.3	Evaluación de la costo-efectividad de la metodología VSP para la estimación del impacto de conducción eficiente	71
4.3.1	Velocidades OBD-II y Vam-Unit	72
4.3.2	Histograma de bins	72
4.3.3	Resultados de consumo de combustible.....	74
4.3.4	Nuevos factores de consumo a partir de calibración de bins con el consumo de combustible obtenido con OBD-II	86
4.3.5	Reducción del consumo de combustible gracias a conducción eficiente.....	89
4.3.6	Estimación de costos para medidores	93
4.3.7	Costo-efectividad medidores	95
5.	Conclusiones.....	99
5.1	Conclusiones respecto a la Cuantificación estandarizada y evaluación de la costo-efectividad de proyectos AChEE 2011-2013	99
5.2	Conclusiones respecto a la costo-efectividad del análisis de Fluidodinámica Computacional (CFD) para camiones con dispositivos aerodinámicos	102

5.3 Conclusiones respecto a la costo-efectividad de la metodología VSP como estimador del impacto de la conducción eficiente	103
6. Bibliografía	105
Anexos	108
Anexo A	109
A.1. Proyecto 1: [2011] Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	109
A.2. Proyecto 2: [2011] Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago	110
A.3. Proyecto 3: [2012] Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	111
A.4. Proyecto 4: [2012] Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago	112
A.5. Proyecto 5: [2012] Programa de incentivo la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente	113
A.6. Proyecto 6: [2013] Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	114
A.7. Proyecto 7: [2013] Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago	115
A.8. Proyecto 8: [2013] Programa de incentivo la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente	117
A.9. Proyecto 9: [2011] Evaluación del Programa Cambia tu Camión	118
A.10. Proyecto 10: [2013] Cofinanciamiento de dispositivos aerodinámicos para vehículos de transporte de carga caminero	119
A.11. Proyecto 11: [2012] Desarrollo de mecanismos económicos y regulatorios que incentiven mejoras tecnológicas en vehículos existentes	120
A.12. Matriz resumen	122
Anexo B	125
B.1. Subproceso de análisis estadístico	125
B.2. Subproceso de definición de desagregación temporal	129
B.3. Formulario N°8 Registro de datos	133
B.4. Formulario N° 1 Análisis estadístico.....	135
B.5. Formulario N° 9 Reporte de ahorro anual.....	137
Anexo C	139
C.1. Resultados obtenidos tras la aplicación del protocolo AChEE.....	139

Anexo D.....	142
D.1. Velocidades de vehículos en pruebas.....	142
D.2. Consumos de combustible medidos con OBD-II y metodología VSP.....	146
D.3. Diferencias entre consumos medidos con Monitor y VSP vs OBD-II.....	175
Anexo E	179
E.1. Revisión bibliográfica de publicaciones relacionadas con el estudio del coeficiente de arrastre aerodinámico de dispositivos aerodinámicos que disminuyen el consumo de combustible en camiones.....	179
E.2. Costos	206

Índice de tablas

Tabla 1. Proyectos caracterizados	4
Tabla 2. Criterios de prueba en pista y en carretera definidos por la norma NCh3331....	19
Tabla 3. Valores de RPMIndex.....	28
Tabla 4. Distribución de bins.	29
Tabla 5. Factores de emisión de CO ₂ por bin de vehículos livianos particulares. [13]....	30
Tabla 6. Factores de emisión de CO ₂ , para distintos combustibles, en [kg/TJ].	31
Tabla 7. Poder Calorífico Inferior para distintos combustibles.	32
Tabla 8. Detalles de participantes.....	38
Tabla 9. Descripción de proyectos caracterizados.....	43
Tabla 10. Medidores aplicados según tipo de transporte de proyectos en los que fueron aplicados.....	50
Tabla 11. Caracterización de proyectos del Área de Transporte de la AChEE.....	51
Tabla 12. Identificador de cada sistema.....	54
Tabla 13. Número de sistemas con diferencias estadísticamente significativas según medidor	59
Tabla 14. Ahorros por proyecto con y sin aplicación del protocolo.....	60
Tabla 15. Tabla de aprendizajes al aplicar Metodología a proyectos AChEE 2011-2013..	63
Tabla 16. Resultados de la costo-efectividad de proyectos.....	66
Tabla 17. Cantidad de vehículos necesarios para que los proyectos sean costo-efectivos	67
Tabla 18. Resumen de resultados	68
Tabla 19. Número de beneficiarios para cumplir condición de costo-efectividad del análisis CFD.....	71
Tabla 20. Resultados de campaña experimental.....	75
Tabla 21. Disminución de consumo de combustible medido con OBD-II en cada vehículo por separado.....	90
Tabla 22. Disminución de consumo de combustible medido con Monitor del vehículo en cada vehículo por separado.....	90
Tabla 23. Disminución de consumo de combustible estimado con VSP (CO ₂) en cada vehículo por separado.	90
Tabla 24. Disminución de consumo de combustible medido con VSP (OBD-II) en cada vehículo por separado.	90
Tabla 25. Impactos y ahorro obtenido para el grupo de vehículos 1,2 y 4.	92
Tabla 26. Resultados de modelación de costos para pruebas en pista según medidor ...	94
Tabla 27. Número de beneficiarios para que las mediciones sean costo eficientes para las pruebas realizadas.....	97
Tabla 28. Número de beneficiarios necesarios para que las mediciones sean costo efectivas según impacto esperado.....	97
Tabla 29. Identificación de proyectos.	122
Tabla 30. Matriz resumen de estudios de la AChEE en el periodo 2011-2013.	123

Tabla 31. Impactos obtenidos tras la aplicación del protocolo AChEE a los proyectos del periodo 2011-2013.....	139
Tabla 32. Diferencia por vuelta del vehículo 1, periodo de Línea Base.....	175
Tabla 33. Diferencia por vuelta del vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro.....	176
Tabla 34. Diferencia por vuelta del vehículo 2, periodo de Línea Base.....	176
Tabla 35. Diferencia por vuelta del vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro.....	176
Tabla 36. Diferencia por vuelta del vehículo 3, periodo de Línea Base.....	177
Tabla 37. Diferencia por vuelta del vehículo 3, periodo Demostrativo de Ahorro.....	177
Tabla 38. Diferencia por vuelta del vehículo 4, periodo de Línea Base.....	178
Tabla 39. Diferencia por vuelta del vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro.....	178
Tabla 40. Diferencia por vuelta del vehículo 5, periodo de Línea Base.....	178
Tabla 41. Diferencia por vuelta del vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro.....	178
Tabla 42. Resultados de consumo de combustible para camión de 40 Ton.....	200
Tabla 43. Resultados de consumo de combustible para camión de 20 Ton.....	201
Tabla 44. Resultados para distintos dispositivos aerodinámicos.....	202
Tabla 45. Resultados de ahorro y mejoras para los distintos kits.....	205
Tabla 46. Costos licencia ANSYS.....	206
Tabla 47. Costos licencia COMSOL.....	206
Tabla 48. Presupuesto pruebas NCh 3331.....	207

Índice de ilustraciones

Figura 1. Metodología general.....	3
Figura 2. Demanda global según escenarios [1]	8
Figura 3. Reducción de la demanda mundial del petróleo en el escenario Mundo Eficiente comparado con el escenario de Nuevas Políticas [1].....	9
Figura 4. Consumo Bruto Energía Primaria, año 2012. [2]	9
Figura 5. Consumo Sectorial de Derivados del Petróleo, año 2012 [2].....	10
Figura 6. Fuerzas involucradas en el movimiento de un vehículo.	27
Figura 7. Factores de consumo de gasolina por bin para vehículos Euro 3 livianos particulares.....	32
Figura 8. Esquema de la pista de pruebas.	34
Figura 9. Vuelta 1 de pruebas en pista	35
Figura 10. Vueltas 2 a 7 de pruebas en pista.....	35
Figura 11. Vuelta 8 de pruebas en pista	36
Figura 12. Circuito de prueba en ruta	36
Figura 13. Conector OBD-II ELM 327	37
Figura 14. Etapas del procesamiento de datos para la obtención del consumo de combustible.	39
Figura 15. Nomenclatura de los sistemas	53
Figura 16. Impacto % de MMEE en el transporte de carga.....	56
Figura 17. Impacto % de MMEE en el transporte particular.....	56
Figura 18. Impacto % de MMEE en el transporte de pasajeros	57
Figura 19. Precisión de las mediciones realizadas en el transporte de carga.....	58
Figura 20. Precisión de las mediciones realizadas en el transporte particular	58
Figura 21. Precisión de las mediciones realizadas en el transporte de pasajeros	59
Figura 22. Comparación del ahorro anual de proyectos del transporte de carga entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.	61
Figura 23. Comparación del ahorro anual de proyectos del transporte particular entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.	61
Figura 24. Comparación del ahorro anual de proyecto piloto del transporte de pasajeros entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.....	62
Figura 25. Comparación del ahorro anual de proyecto masivo del transporte de pasajeros entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.....	62
Figura 26. Velocidad vehículo 1, periodo de Línea Base	72
Figura 27. Histograma de bins del vehículo 1.....	73
Figura 28. Histograma de bins del vehículo 2	73
Figura 29. Histograma de bins del vehículo 3	73
Figura 30. Histograma de bins del vehículo 4.....	74
Figura 31. Histograma de bins del vehículo 5.....	74
Figura 32. Consumo del vehículo 1 en el periodo de Línea Base.....	77
Figura 33. Consumo del vehículo 1 en el periodo Demostrativo de Ahorro	77

Figura 34. Consumo del vehículo 2 en el periodo de Línea Base	77
Figura 35. Consumo del vehículo 2 en el periodo Demostrativo de Ahorro	78
Figura 36. Consumo del vehículo 3 en el periodo de Línea Base	78
Figura 37. Consumo del vehículo 3 en el periodo Demostrativo de Ahorro	78
Figura 38. Consumo del vehículo 4 en el periodo de Línea Base	79
Figura 39. Consumo del vehículo 4 en el periodo Demostrativo de Ahorro	79
Figura 40. Consumo del vehículo 5 en el periodo de Línea Base	80
Figura 41. Consumo del vehículo 5 en el periodo Demostrativo de Ahorro	80
Figura 42. Vuelta 1 del periodo LB del vehículo 1.....	81
Figura 43. Vuelta 1 del periodo DA del vehículo 1.....	81
Figura 44. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 1 en su periodo de Línea Base.....	82
Figura 45. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 1 en su periodo Demostrativo de Ahorro.....	82
Figura 46. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 2 en su periodo de Línea Base.....	83
Figura 47. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 2 en su periodo Demostrativo de Ahorro.....	83
Figura 48. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 3 en su periodo de Línea Base.....	83
Figura 49. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 3 en su periodo Demostrativo de Ahorro.....	84
Figura 50. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 4 en su periodo de Línea Base.....	84
Figura 51. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 4 en su periodo Demostrativo de Ahorro.....	84
Figura 52. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 5 en su periodo de Línea Base.....	85
Figura 53. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 5 en su periodo Demostrativo de Ahorro.....	85
Figura 54. Factores de consumo por bin obtenidos con datos de OBD-II.....	86
Figura 55. Factores de consumo del vehículo 1	87

Figura 56. Factores de consumo del vehículo 2.....	87
Figura 57. Factores de consumo del vehículo 3.....	88
Figura 58. Factores de consumo del vehículo 4.....	88
Figura 59. Factores de consumo del vehículo 5.....	89
Figura 60. Reducción de consumo de combustible debido a conducción eficiente.....	91
Figura 61. Reducción porcentual del consumo de combustible debido a conducción eficiente	91
Figura 62. Impactos porcentuales de los vehículos 1, 2 y 4 medidos con los distintos medidores	93
Figura 63. Costo de pruebas en pista por vehículo para cada medidor	95
Figura 64. Costo vs precisión de medidores OBD-II, Monitor y VSP (Calibrado)	96
Figura 65. Número de beneficiarios para que las mediciones sean costo-efectivas en función del impacto esperado	98
Figura 66. Flujo del subproceso Análisis Estadístico.	126
Figura 67. Niveles de desagregación que se aplican.	128
Figura 68. Flujo del subproceso de desagregación temporal.	131
Figura 69. Velocidad vehículo 1, periodo de Línea Base	142
Figura 70. Velocidad vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro	142
Figura 71. Velocidad vehículo 2, periodo de Línea Base.....	143
Figura 72. Velocidad vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro	143
Figura 73. Velocidad vehículo 3, periodo de Línea Base	143
Figura 74. Velocidad vehículo 4, periodo de Línea Base	144
Figura 75. Velocidad vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro	144
Figura 76. Velocidad vehículo 5, vueltas 1 y 2, periodo de Línea Base.....	144
Figura 77. Velocidad vehículo 5, vueltas 3 y 4, periodo de Línea Base	145
Figura 78. Velocidad vehículo 5, vueltas 1 y 2, periodo de Demostrativo de Ahorro.....	145
Figura 79. Velocidad vehículo 5, vueltas 3 y 4, periodo de Demostrativo de Ahorro	145
Figura 80. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 1	146
Figura 81. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 2.....	146
Figura 82. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 3.....	147
Figura 83. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 4.....	147
Figura 84. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 5.....	147
Figura 85. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 6.....	148
Figura 86. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 7.....	148

Figura 87. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 8.....	148
Figura 88. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1	149
Figura 89. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2.....	149
Figura 90. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3.....	149
Figura 91. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4.....	150
Figura 92. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 5.....	150
Figura 93. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 6.....	150
Figura 94. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 7.....	151
Figura 95. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 8.....	151
Figura 96. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 1	151
Figura 97. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 2.....	152
Figura 98. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 3.....	152
Figura 99. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 4.....	152
Figura 100. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 5.....	153
Figura 101. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 6.....	153
Figura 102. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 7.....	153
Figura 103. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 8.....	154
Figura 104. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1	154
Figura 105. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2.....	154
Figura 106. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3.....	155
Figura 107. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4.....	155

Figura 108. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 5.....	155
Figura 109. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 6.....	156
Figura 110. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 7.....	156
Figura 111. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 8.....	156
Figura 112. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 1.....	157
Figura 113. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 2.....	157
Figura 114. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 3.....	157
Figura 115. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 4.....	158
Figura 116. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 5.....	158
Figura 117. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 6.....	158
Figura 118. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 7.....	159
Figura 119. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 8.....	159
Figura 120. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 1.....	159
Figura 121. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 2.....	160
Figura 122. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 3.....	160
Figura 123. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 4.....	160
Figura 124. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 5.....	161
Figura 125. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 6.....	161
Figura 126. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 7.....	161
Figura 127. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 8.....	162
Figura 128. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1.....	162

Figura 129. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2.....	162
Figura 130. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3.....	163
Figura 131. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4.....	163
Figura 132. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 5.....	163
Figura 133. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 6.....	164
Figura 134. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 7.....	164
Figura 135. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 8.....	164
Figura 136. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 1 de 4.....	165
Figura 137. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 2 de 4.....	165
Figura 138. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 3 de 4.....	165
Figura 139. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 4 de 4.....	166
Figura 140. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 1 de 4.....	166
Figura 141. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 2 de 4.....	166
Figura 142. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 3 de 4.....	167
Figura 143. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 4 de 4.....	167
Figura 144. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 1 de 4.....	167
Figura 145. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 2 de 4.....	168
Figura 146. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 3 de 4.....	168
Figura 147. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 4 de 4.....	168
Figura 148. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 1 de 4.....	169
Figura 149. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 2 de 4.....	169

Figura 150. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 3 de 4.....	169
Figura 151. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 4 de 4.....	170
Figura 152. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 1 de 4.....	170
Figura 153. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 2 de 4.....	170
Figura 154. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 3 de 4.....	171
Figura 155. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 4 de 4.....	171
Figura 156. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 1 de 4.....	171
Figura 157. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 2 de 4.....	172
Figura 158. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 3 de 4.....	172
Figura 159. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 4 de 4.....	172
Figura 160. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 1 de 4.....	173
Figura 161. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 2 de 4.....	173
Figura 162. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 3 de 4.....	173
Figura 163. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 4 de 4.....	174
Figura 164. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 1 de 4.....	174
Figura 165. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 2 de 4.....	174
Figura 166. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 3 de 4.....	175
Figura 167. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 4 de 4.....	175
Figura 168. Combinaciones de dispositivos analizados	180
Figura 169. Esquema del montaje experimental	181
Figura 170. Coeficiente aerodinámico como función de la velocidad para diferentes configuraciones, con un ángulo de ataque de 0°	181
Figura 171. Porcentaje de disminución del coeficiente de arrastre para las distintas configuraciones en comparación con el caso base, en función del ángulo de ataque.....	182

Figura 172. Vistas superior, lateral y posterior del GCM (medidas en cm)	184
Figura 173. Geometría de deflector trasero.	185
Figura 174. Geometría de carenado frontal.	185
Figura 175. Geometría de tapabarro completo.	185
Figura 176. Geometría de tapabarro de listones.	185
Figura 177. Geometría de medio tapabarro.	186
Figura 178. Velocidad instantánea axial en el contorno del camión.	186
Figura 179. Comparación de la línea central de presiones del tracto para 0° de ataque, graficada sobre la coordenada horizontal.	187
Figura 180. Comparación de la línea central de presiones del remolque para 0° de ataque, graficada sobre la coordenada horizontal.	187
Figura 181. Coeficiente de presión de rueda aislada.	188
Figura 182. Modelo a escala completa	188
Figura 183. Incremento en el arrastre debido al efecto de simular con rueda sin rotación sobre el remolque, tapabarros y sobre el eje de la rueda.	189
Figura 184. Variación del coeficiente aerodinámico de la fuerza de arrastre axial debido a deflector trasero.	189
Figura 185. Efecto del carenado frontal en el arrastre en los componentes del camión.	190
Figura 186. Variación del coeficiente de arrastre para distintos ángulos de viento cruzado debido al carenado frontal.	190
Figura 187. Coeficientes de arrastre para los tres tipos de tapabarro.	191
Figura 188. Variación en el coeficiente de arrastre para distintos ángulos de viento cruzado debido a los tres tipos de tapabarros.	191
Figura 189. Geometría de los modelos de camiones.	193
Figura 190. Sección transversal del mallado tetraédrico.	193
Figura 191. Volumen de control con razón de bloqueo de 10%.	194
Figura 192. Volumen de control con razón de bloqueo de un 1%.	194
Figura 193. Vista superior de la distribución de velocidades alrededor del vehículo (a la izquierda modelo con carenado superior, a la derecha modelo base).	195
Figura 194. Vista lateral de la distribución de velocidades para un ángulo de ataque de 0° (a la izquierda modelo con carenado superior, a la derecha modelo base).	195
Figura 195. Vista superior de la vorticidad instantánea alrededor del vehículo (a la izquierda modelo con carenado superior, a la derecha modelo base).	195
Figura 196. Coeficiente de arrastre para el modelo sin carenado superior.	196
Figura 197. Coeficiente de arrastre para el modelo con carenado superior.	196
Figura 198. Ciclo de conducción para carretera.	197
Figura 199. Ciclo de conducción urbano.	198
Figura 200. Consumo de combustible para camión de 40 Ton.	200
Figura 201. Consumo para los 4 casos estudiados.	201
Figura 202. Porcentaje de reducción del consumo de combustible vs porcentaje de reducción del coeficiente de arrastre.	203
Figura 203. Configuración de kits aerodinámicos.	204

Figura 204. Porcentaje de ahorro y mejora para los distintos kits. 206

1. Introducción

1.1 Antecedentes generales

En el mundo actual existe una gran dependencia por el consumo de combustibles fósiles, la cual se ve acentuada en el sector del transporte, donde un 94% de la energía utilizada proviene de dicha fuente. La dependencia sumada a la escasez de este tipo de combustibles puede repercutir en graves crisis económicas. Además, su uso genera altas emisiones de gases contaminantes, provocando así problemas ambientales.

Por lo anteriormente señalado, es imperante buscar alternativas para disminuir el uso de los combustibles fósiles. Aquí es donde aparece el concepto de Eficiencia Energética (EE) como una alternativa que busca la disminución del gasto energético, manteniendo el mismo nivel de servicio en todos los sectores energo-intensivos.

La correcta aplicación de la EE supone un proceso de medición y verificación continua de los resultados, de manera que los esfuerzos realizados en pos de su mejora sean sostenibles en el tiempo. Importante en este ámbito es medir adecuadamente la reducción en el consumo producto de la aplicación de medidas de EE, guardando cuidado en que los costos de las mediciones sean reducidos en comparación con el ahorro generado.

En el contexto nacional, la *Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE)* es la encargada de promover las prácticas de EE en los distintos sectores de consumo energético, tanto en el ámbito público como privado. Actualmente, la AChEE tiene la necesidad de cuantificar de forma estandarizada la reducción del consumo energético producto de sus programas y proyectos, en particular del área de transporte, pues en ellos se han utilizado distintos métodos para determinar estas reducciones. Es por esto que la AChEE ha creado un nuevo *Protocolo de Cuantificación de Reducción del Consumo en Programas del Transporte*, el cual se ha basado en el *Protocolo Internacional de Medida y Verificación (IPMVP)* para dar los lineamientos al momento de realizar los reportes de resultados de los proyectos de transporte. Esta nueva metodología ahora debe aplicarse a los proyectos pasados para que sus resultados sean comparables entre ellos.

Por otro lado, la AChEE debe utilizar sus recursos de manera costo-efectiva al momento de realizar sus reportes, por lo que es importante buscar los métodos para realizar mediciones de consumo energético que sean más apropiados de acuerdo al contexto de cada proyecto. En particular, existen dos casos interesantes que se analizan en este trabajo de título, mediciones en camiones con dispositivos aerodinámicos, y mediciones en vehículos particulares en donde sus conductores apliquen técnicas de manejo denominadas como Conducción Eficiente.

1.2 Motivación

En respuesta a los antecedentes mencionados es que en este trabajo de título se busca abordar la problemática de la cuantificación estandarizada y costo-efectiva de la reducción del consumo de combustible debido a proyectos de eficiencia energética, con el objetivo de hacer comparables sus resultados, además de ser eficiente en el uso de recursos de manera de brindar confianza en sector público y privado.

1.3 Objetivos

Los objetivos de esta memoria apuntan mejorar la manera en que se reportan los resultados de proyectos de eficiencia energética por medio de la aplicación de un procedimiento estándar que permite reportar reducción en el consumo energético, además de la evaluación de dos metodologías que permiten estimar dicho consumo en casos donde la medición por métodos tradicionales presenta un alto costo.

A continuación se presentan estos objetivos, los cuales consisten en un objetivo general y cinco objetivos específicos.

1.3.1. Objetivo general

Cuantificar de forma estandarizada la reducción del consumo de combustible en los proyectos ejecutados por el Área de Transporte de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE), para luego evaluar la costo-efectividad de cada uno de ellos, y además evaluar esta misma propiedad en dos alternativas de medición: el análisis de Fluidodinámica Computacional (CFD) para camiones con dispositivos aerodinámicos y la metodología Potencia Específica Vehicular (VSP) para determinar reducción en consumo de combustible gracias a conducción eficiente.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Conocer y caracterizar los proyectos de eficiencia energética realizados por el Área de Transporte de la AChEE entre los años 2011 y 2013.
- b) Conocer y comprender la metodología estándar de evaluación propuesta por AChEE para los proyectos a partir del año 2014.
- c) Cuantificar la reducción del consumo de combustible aplicando la metodología propuesta por la AChEE a los proyectos del área de transporte del periodo 2011-2013.
- d) Evaluar la costo-efectividad de los proyectos de la AChEE caracterizados.
- e) En base a la cuantificación de reducciones de consumo, evaluar la costo-efectividad del análisis mediante *Dinámica de Fluidos Computacional* (CFD) para determinar la reducción del consumo de combustible gracias a mejoras aerodinámicas en camiones, y la metodología *Potencia Específica Vehicular* (VSP) para determinar el consumo de combustible y su reducción gracias a conducción eficiente en vehículos livianos.

1.4 Metodología general

La metodología general de este trabajo de título consta de tres ejes principales: Cuantificación estandarizada de proyectos AChEE 2011-2013, evaluación del análisis CFD para camiones con dispositivos aerodinámicos y evaluación de la metodología VSP para determinar el impacto de la Conducción Eficiente. En la Figura 1 se puede observar a rasgos generales las actividades que componen a cada uno de estos ejes.

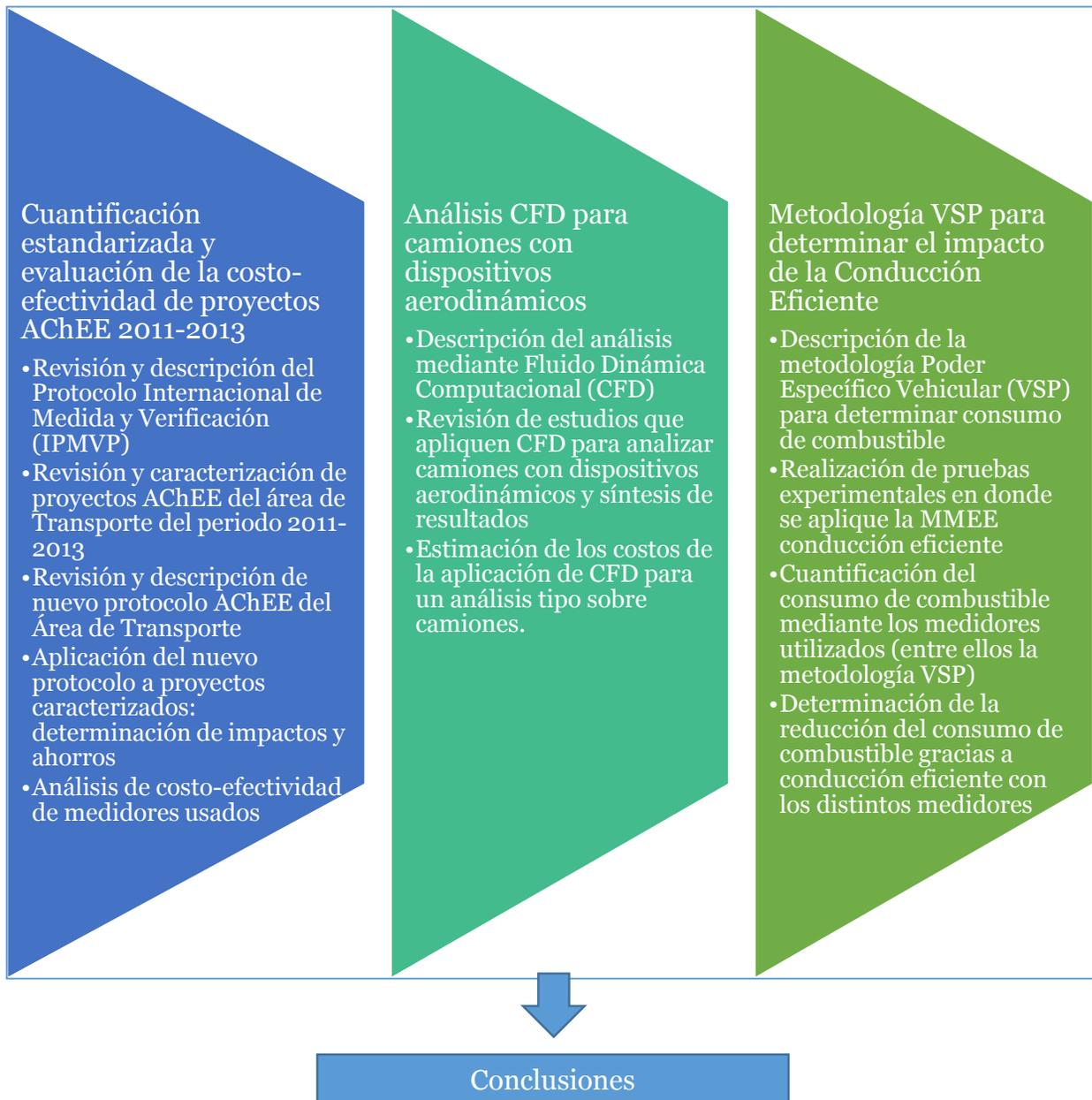


Figura 1. Metodología general

1.4.1 Metodología específica

A continuación se describen las actividades de cada una de las tres partes principales mostradas en la metodología general.

1.4.1.1 *Cuantificación estandarizada y evaluación de la costo-efectividad de proyectos AChEE 2011-2013*

- Revisión y descripción del Protocolo Internacional de Medida y Verificación (IPMVP)

Etapas cuyo fin es conocer en qué consisten los procesos de Medición y Verificación para determinar reducción en el consumo energético. Como actividad de este trabajo de título se realiza una revisión del IPMVP y luego se describe en la sección de *Antecedentes*.

- Revisión y caracterización de proyectos AChEE del área de Transporte del periodo 2011-2013.

Esta actividad consiste en la revisión de 11 proyectos del Área de Transporte de la AChEE realizados en el periodo 2011-2013. En esta revisión se busca identificar los elementos que configuran un reporte de Medición y Verificación (M&V) según el Protocolo Internacional de Medida y Verificación (IPMVP), además, con la información recabada se busca caracterizar cada uno de los proyectos. Los proyectos revisados son los presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. *Proyectos caracterizados*

N° de proyecto	Nombre proyecto	Año
1	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2011
2	Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago	2011
3	Evaluación del Programa Cambia tu Camión	2011
4	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2012
5	Servicio para Incentivar la Mejora de Estándares de Gestión Energética de Buses en Santiago	2012
6	Programa de incentivo la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente	2012
7	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2013
8	Apoyo Técnico en la Elaboración e Implementación de Planes de Eficiencia Energética en Empresas de Transporte de Pasajeros	2013
9	Servicio de Mantenimiento del Sitio Web de Adopción Voluntaria de las Técnicas de Conducción Eficiente www.conduccioneficiente.cl	2013

10	Cofinanciamiento de Dispositivos Aerodinámicos para Vehículos de Transporte de Carga Caminero	2013
11	Desarrollo de mecanismos económicos y regulatorios que incentiven mejoras tecnológicas en vehículos existentes	2012

- Revisión y descripción de nuevo protocolo AChEE del Área de Transporte.
El *Protocolo de cuantificación de reducción de consumo para el transporte* es una metodología diseñada por la AChEE para determinar los impactos de sus programas en el consumo energético de empresas y beneficiarios intervenidos en ellos. Como actividad de este trabajo de título se revisa el nuevo protocolo y se describe en la sección de *Antecedentes*.
- Aplicación del nuevo protocolo a los proyectos caracterizados.
Se realiza la aplicación del nuevo protocolo a los proyectos revisados en la primera actividad de este trabajo de título que hayan realizado mediciones para determinar la reducción en el consumo energético en las entidades intervenidas en ellos. Los pasos a seguir en la aplicación del protocolo son mostrados en la descripción de este, en la sección de antecedentes. Los resultados obtenidos de esta actividad son los impactos de las MMEE aplicadas y la reducción a una escala anual del consumo para cada proyecto.
- Análisis de costo-efectividad de proyectos caracterizados.
Para el análisis de costo-efectividad se determina el costo de las mediciones en el caso de cada proyecto mediante la revisión bibliográfica y con ese valor, más los ahorros determinados en la etapa anterior, se aplica un criterio dado por el IPMVP que consiste en que los costos de M&V no pueden superar el 10% del ahorro anual. También se calcula el número necesario de vehículos en los cuales aplicar las medidas de los proyectos sin hacer mediciones en ellos para que las mediciones sean costo-eficientes.

1.4.1.2 *Análisis CFD para camiones con dispositivos aerodinámicos*

- Descripción del análisis mediante Fluidodinámica Computacional (CFD).
Esta actividad consiste en la descripción del análisis CFD aplicado en el campo de la aerodinámica de camiones en particular. El resultado de esta actividad se presenta en la sección de *Antecedentes*.
- Revisión de estudios que apliquen CFD para analizar camiones con dispositivos aerodinámicos y síntesis de resultados
Se realiza una revisión de 4 investigaciones internacionales y una nacional, en donde se aborda el estudio de la aerodinámica de camiones con dispositivos que buscan disminuir el llamado coeficiente de arrastre aerodinámico (C_d). El objetivo de esta revisión es evaluar si la herramienta CFD arroja resultados aceptables, y si es que se puede estimar la reducción del consumo de combustible gracias a la

reducción en el coeficiente C_a . El resultado de la revisión se presenta en un cuadro que resume lo más importante obtenido en cada estudio.

- Estimación de costos de la aplicación de CFD para un análisis tipo sobre camiones.

Como el título lo dice, se estiman los costos de un análisis tipo en el cual se estudia la aerodinámica de camiones con dispositivos aerodinámicos mediante CFD.

1.4.1.3 *Metodología VSP para determinar el impacto de la Conducción Eficiente*

- Descripción de la metodología Poder Específico Vehicular (VSP) para determinar consumo de combustible.

Con el objetivo de conocer esta metodología, se estudia y luego se describe en la sección *Antecedentes*.

- Realización de pruebas experimentales en donde se aplique la MMEE conducción eficiente.

Para la evaluación de la metodología VSP se realizan pruebas experimentales que involucran 5 vehículos particulares, en donde 4 se hacen transitar en una pista¹ y el vehículo restante en una ruta con condiciones reales de tránsito. Las etapas de estas pruebas son tres: un periodo de Línea Base (LB) en donde los conductores realizan vueltas a los respectivos circuitos conduciendo como lo hacen normalmente, luego se capacitan en las técnicas de conducción eficiente mediante la página web www.conduccioneficiente.cl, y finalmente, en el periodo Demostrativo de Ahorro (DA) realizan la misma cantidad de vueltas que en el periodo LB aplicando las técnicas aprendidas. Durante todas las pruebas se realizan mediciones y estimaciones de consumo de combustible con 4 medidores: On Board Diagnostic (OBD-II), monitor del vehículo indicador del consumo, metodología VSP en base a información de estudios previos -denominado *VSP (Literatura)* en este trabajo de título- y metodología VSP calibrada con los resultados arrojados por el OBD-II, denominado *VSP (Calibrado)* en este trabajo de título. Los detalles de la metodología experimental se encuentran en el capítulo 3 de este trabajo de título.

- Cuantificación del consumo de combustible mediante los medidores utilizados (entre ellos la metodología VSP).

Una vez obtenidos los datos medidos en la experiencia experimental se cuantifica el consumo de combustible de las vueltas que realizó cada vehículo aplicando los análisis de datos necesarios. Los procedimientos aplicados en cada medidor son explicados en el capítulo 3 de este trabajo de título.

¹ Pista: circuito cerrado utilizado normalmente para realizar competencias o pruebas de vehículos.

- Determinación de la reducción del consumo de combustible gracias a conducción eficiente con los distintos medidores.

Con los datos de consumo de cada vehículo y cada medidor, se determina la reducción en el consumo de combustible gracias a conducción eficiente aplicando las etapas de determinación de impacto y ahorro del *Protocolo de cuantificación de reducción de consumo para el transporte* elaborado por la AChEE. Nuevamente los detalles de este procedimiento son explicados en el capítulo 3 de este trabajo de título.

- Análisis de la costo-efectividad de la metodología VSP

Para el análisis de la costo-efectividad de la metodología VSP se estiman los costos de las herramientas de medición del consumo de combustible, y se comparan con los resultados de las precisiones de la etapa anterior, y además se aplica el criterio dado por el IPMVP que indica que los costos de la Medición y Verificación no deben superar al 10% de los ahorros anuales debido a la reducción del consumo energético.

Para finalizar las actividades de este trabajo de título se realizan las conclusiones pertinentes con respecto a los objetivos planteados.

2. Antecedentes

2.1 Problemática energética

2.1.1 Transporte a nivel internacional

En el sector Transporte a nivel internacional existe una marcada dependencia por los combustibles derivados del petróleo. Un análisis de la Agencia Internacional de Energía (IEA), en su World Energy Outlook 2007 [1], plantea que el panorama mundial no cambiará mayormente de aquí al 2030, donde en un escenario pesimista, esta dependencia disminuirá a lo más en un 2%. Esto puede traer consigo incontables problemas, pues además de la contaminación que produce el uso de este tipo de combustibles, existe la incertidumbre del suministro global del petróleo debido a problemas geopolíticos y escasez de reservas, que tienden a volatilizar los mercados financieros, a su vez provocando importantes crisis económicas. En la Figura 2 se muestra una proyección de la demanda mundial y el precio del petróleo según tres escenarios definidos en el World Energy Outlook 2012, los cuales son:

- Escenario de “Políticas Actuales”: brinda una línea base, manteniendo las medidas actuales sin incorporar otras.
- Escenario de “Nuevas Políticas”: se asume que recientes políticas anunciadas son adoptadas de forma cautelosa.
- Escenario 450: asume la adopción de políticas que permiten limitar, con un 50% de probabilidades, el aumento promedio de la temperatura global en 2 °C, en comparación con niveles preindustriales.

Con esta proyección se observa claramente que es necesario tomar medidas más efectivas que las actuales para la disminución del consumo del petróleo.

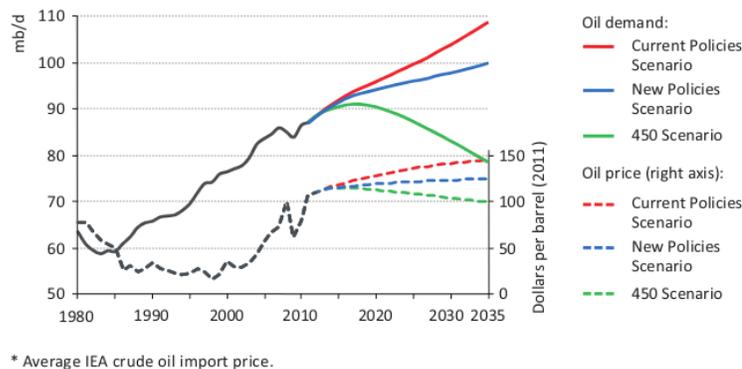


Figura 2. Demanda global según escenarios [1]

Por otro lado, en la Figura 3 se muestra la posible reducción de la demanda de petróleo, bajo un cuarto escenario, el “Mundo eficiente”, en donde toda inversión en Eficiencia Energética que sea económicamente viables se realiza, y además se adoptan todas las

políticas necesarias para eliminar las barreras del mercado respecto a estas. En este escenario podemos ver que el mayor potencial de ahorro está en el sector transporte.

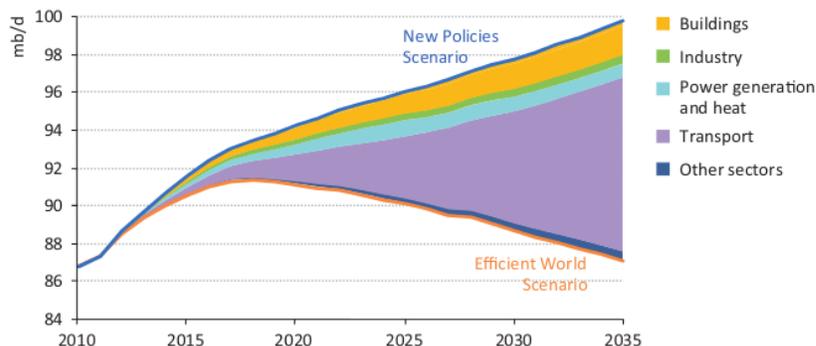


Figura 3. Reducción de la demanda mundial del petróleo en el escenario Mundo Eficiente comparado con el escenario de Nuevas Políticas [1].

2.1.2 Transporte a nivel nacional

A nivel nacional se ve reflejado el problema global del uso de los combustibles fósiles, en donde a través del Balance Nacional de Energía (BNE) podemos visualizar en la Figura 4, que el consumo del Petróleo Crudo fue el mayor durante el año 2012, en comparación con los otros energéticos primarios, alcanzando un 30,3%.

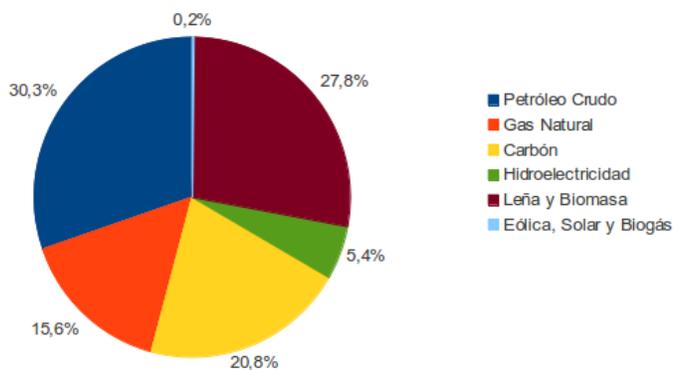


Figura 4. Consumo Bruto Energía Primaria, año 2012. [2]

Además, dentro del Consumo Sectorial de los Derivados del Petróleo del año 2012, se tuvo que el sector Transporte consumió la mayor parte de este energético, alcanzando un 46%, como puede apreciarse en la Figura 5.

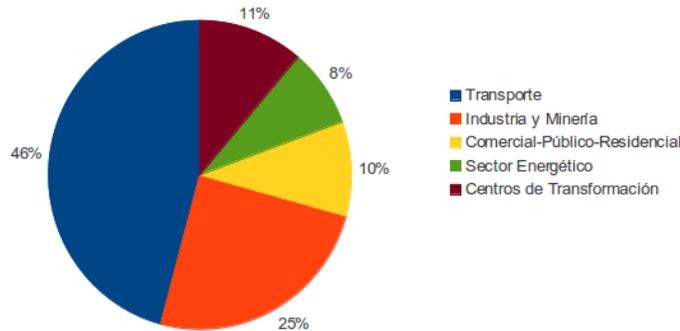


Figura 5. Consumo Sectorial de Derivados del Petróleo, año 2012 [2]

Todo esto nos indica que nuestro país depende en gran parte de este combustible fósil, y que gran parte de su gasto energético contribuye al calentamiento global. Además, dentro de los sectores productivos, el del Transporte es el que realiza un mayor gasto de los combustibles derivados del petróleo. Teniendo todo esto sobre la mesa, es evidente que como país hay que realizar esfuerzos para disminuir tanto la dependencia como el consumo de los combustibles en cuestión, en particular en el sector del Transporte.

2.1.3 Eficiencia energética como respuesta

La eficiencia energética se define como un conjunto de acciones que permiten reducir el consumo energético conservando la calidad y el acceso a bienes y servicios [3]. Por tanto, en el contexto actual, esta es una buena medida para combatir la dependencia de los combustibles fósiles que nos aqueja.

El funcionamiento típico de los proyectos de eficiencia energética consiste en la aplicación de las llamadas Medidas de Mejora de Eficiencia Energética (MMEE), mecanismos que buscan reducir el consumo energético en diversas situaciones.

En estos momentos la AChEE es la encargada de promover la aplicación de las MMEE en los distintos sectores de consumo energético nacional. Para lograr esto, la AChEE se divide en 6 áreas: Área de Edificación, Área de Industria y Minería, Área de Transporte, de Educación y Capacitación, Área de Medición y Verificación y Área de Desarrollo de Negocios.

2.2 Medidas de mejora de eficiencia energética para vehículos

Actualmente existen distintas medidas que apuntan en la disminución del consumo de combustible en vehículos, las cuales se clasifican en mejoras tecnológicas, de gestión y educacional-cultural. Las primeras apuntan a realizar avances tecnológicos que se incorporan en los vehículos, las segundas tienen que ver con una mejor planificación del gasto energético que realizan empresas, corporaciones, instituciones, etc., en sus labores relacionadas con el transporte, un ejemplo de estas últimas es la planificación de rutas que impliquen menores distancias de viaje. Y por último las terceras, corresponden a medidas que apunten a un cambio en el comportamiento de las personas al momento de

utilizar un vehículo hacia conductas más eficientes energéticamente hablando. A continuación se muestran algunas de las medidas mencionadas anteriormente.

2.2.1 Artefactos que mejoran la aerodinámica

Son tecnologías que buscan mejorar la aerodinámica de los vehículos disminuyendo el Coeficiente de arrastre aerodinámico (C_a). Estos artefactos tienen una mayor preponderancia en vehículos pesados que operan a altas velocidades. Algunos dispositivos disponibles en el mercado son:

- Carenado superior.
- Carenado frontal.
- Carenado inferior o cubre estanque.
- Faldones laterales.
- Creadores de vórtice.
- Carenado trasero.

Estas tecnologías tienen la ventaja de permitir grandes ahorros en vehículos pesados que operan a altas velocidades, por otro lado tienen la desventaja de no proveer ahorros significativos a bajas velocidades, además que son propensos a romperse cuando operan en sectores urbanos debido a los eventos viales que allí se encuentran.

Cuando se implementan estas mejoras, puede alcanzarse hasta un 5% de ahorro, según la especificación SmartWay realizada por la U.S Environmental Protection Agency, (EPA). Se estima que entre el 2015 y el 2020 se alcance hasta un 15% de ahorro de combustible mediante el mejoramiento de la aerodinámica, en camiones operando a 105 [km/hr]. [4]

2.2.2 Conducción eficiente

La Conducción Eficiente consiste en un conjunto de técnicas de manejo que permiten disminuir el consumo de combustible. Estas técnicas se basan principalmente en circular en marchas largas, a bajas revoluciones y con el acelerador pisado a no más de $\frac{3}{4}$ partes, lo que implica bajo consumo específico de combustible, y suficiente respuesta del motor ante las situaciones de tráfico habitual. [5]

Esta modalidad de manejo trae consigo muchos beneficios, entre los cuales están el ahorro de combustible y la consiguiente menor emisión de CO_2 al ambiente, disminución, del estrés, de la contaminación acústica, aumento en la seguridad vial y la comodidad.

Para lograr que los conductores adopten las conductas de Conducción Eficiente es necesario enseñar estas técnicas desde el momento en que los conductores empiezan a manejar, sin embargo en la actualidad esta enseñanza no se realiza en las escuelas de conducción, y tampoco es evaluada al momento de conseguir una licencia de conducir, es por esto que es imperante la realización de campañas informativas que masifiquen esta nueva forma de conducir, para que los conductores veteranos las adopten.

A continuación se presentan algunas de las técnicas de conducción eficiente:

- Arrancar sin pisar el acelerador: en la actualidad los vehículos regulan de forma automática el proceso de encendido, por lo cual no es necesario pisar el acelerador al momento de realizar esta acción.
- Primera marcha de caja de cambios: utilizar la primera marcha solo para dar impulso al vehículo.
- Cambiar de marcha lo antes posible: Para vehículos a gasolina pasar los cambios entre 2.000 y 2.500 RPM, para vehículos diésel entre 1.500 y 2.000 RPM.
- Mantener velocidad uniforme: intentar conducir a una velocidad uniforme, con el menor acelerador pisado a menos de $\frac{3}{4}$ partes.
- Uso del rodaje por inercia con la marcha engranada: Al momento de frenar, si no se necesita reducir la velocidad bruscamente, se recomienda soltar el acelerador manteniendo la marcha engranada. En estas condiciones el consumo es nulo.
- Paradas prolongadas: si se va a estar más de un minuto con el auto detenido, se recomienda apagar el motor.

2.2.3 Manejo de cargas auxiliares

Los sistemas auxiliares comprenden desde el aire comprimido necesario para el sistema de frenado, el sistema de aire acondicionado y la dirección asistida. Estos sistemas gastan una importante cantidad de energía entregada por el motor. El impacto de estos sistemas sobre el consumo de combustible depende de la velocidad y el ciclo de trabajo del motor con el cual opera. Sistemas auxiliares de buses pueden alcanzar un 25 % de la potencia entregada por el motor, con el aire acondicionado funcionando.

Para producir un ahorro de combustible, por una parte los sistemas auxiliares pueden ser optimizados, y por otra se puede contar con fuentes auxiliares de energía (Auxiliary Power Units, APUs), en vez del uso de la energía directa del motor. Este ahorro dependerá del tipo de vehículo y del ciclo de trabajo. [4]

2.2.4 Reducción de la resistencia al rodaje

Aquí se busca propiciar condiciones que permitan disminuir el coeficiente de resistencia al rodaje, C_{rr} , coeficiente que varía linealmente con la deformación inelástica del neumático al rodar, esto producto de las fuerzas de corte y compresión en la zona de contacto con el suelo. Algunos factores importantes en la reducción del C_{rr} son:

- Presión del aire de las ruedas: al ser menor de lo normal la zona de contacto con el suelo aumenta, con lo que C_{rr} aumenta también.
- Alineación de las ruedas: al no ser perfectamente paralelos los ejes de las ruedas aumenta el coeficiente C_{rr} .
- Tipo de vehículo: mientras más liviano es el vehículo, menor será el coeficiente C_{rr} .

En la actualidad se están desarrollando estándares de calidad para la fabricación de neumáticos que tengan bajos C_{rr} . Organizaciones como la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) están llevando adelante propuestas para esto. Para medir la resistencia a la rodadura de vehículos de pasajeros, camiones y buses, se utiliza la norma ISO 28580.

Se pueden alcanzar ahorros del 4% a 11%, dependiendo del terreno, peso y del neumático de línea base escogido. Se aumenta en de un 1% a 1,5% más si las ruedas se inflan con nitrógeno. [4]

2.2.5 Reducción del consumo de combustible en inactividad del vehículo

Las tecnologías de reducción de consumo en inactividad utilizan parte de la potencia del motor para alimentar los sistemas auxiliares cuando el vehículo está con el motor funcionando, pero sin moverse. Estas tecnologías se dividen en cinco categorías:

- Sistemas automáticos de encendido y apagado: Sistema automático que prende y apaga el motor de acuerdo a las necesidades de temperatura requeridas. Logran un 3 % de ahorro.
- Alimentación de baterías: mantiene los sistemas de refrigeración y calefacción de la cabina, más las aplicaciones a bordo. Alcanzan de un 5% a un 9 % de ahorro.
- Calentadores independientes: Cumplen la función de calentar la cabina, el motor, o ambos. Estos calentadores usan significativamente menos combustible que el motor principal, mediante el suministro de calor desde una llama de combustión o un pequeño intercambiador de calor. Alcanzan de un 1,3% a un 2,3 % de ahorro.
- Electrificación en estacionamiento: Consisten en estacionamientos que brindan electricidad a vehículos. Alcanzan de un 5% a un 9 % de ahorro.

Estas medidas tienen la ventaja de ahorrar combustible en situaciones de alto tráfico, al momento de descanso del chofer, y en situaciones en que no se aprovecha el vehículo para producir. Sin embargo tienen la desventaja de no ser ideales para aplicaciones que requieran calefacción o refrigeración durante largos periodos de tiempo. [4]

2.2.6 Reducción de peso

Aquí se busca disminuir el peso del vehículo, ya que el consumo de combustible se ve afectado directamente por éste. Esto es más crítico en caminos donde se debe frecuentemente detener y acelerar, o en caminos con inclinación importante. Esta disminución se logra mediante la utilización de materiales más livianos (por ejemplo aluminio o fibra de carbono) pero igual de resistentes que los utilizados normalmente. En este caso hay que tener en cuenta que los materiales más livianos y que cumplen los requerimientos mecánicos de diseño son más caros que los utilizados normalmente, por lo cual al disminuir peso los costos aumentan. Mediante la aplicación de esta medida se logran ahorros del 0,5% al 1 % por cada 1.000 lb en caminos planos, y 2% por cada 1.000 lb en terreno montañoso. [4]

2.3 Reportes de medida y verificación para proyectos de eficiencia energética

2.3.1 Descripción

Los reportes de Medida y Verificación (M&V) consisten en procedimientos estandarizados que permiten cuantificar la reducción en el consumo energético debido a la implementación de Medidas de Mejora de Eficiencia Energética (MMEE). La estandarización de los procesos de los reportes de M&V permite que sean replicables, que tengan un lenguaje y metodologías comunes y aceptadas internacionalmente.

El Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético, más conocido como IPMVP por sus siglas en inglés, cumple con el objetivo de servir como guía para realizar reportes de M&V, mediante la aplicación de metodologías estandarizadas e internacionalmente aceptadas. [6]

2.3.2 Protocolo internacional de medida y verificación

El Volumen I del Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético (International Performance Measurement and Verification Protocol, IPMVP) es una guía que da lineamientos generales respecto a la realización de informes que muestren la eficacia de proyectos de Eficiencia Energética y de Agua. Estos términos y prácticas ayudan a los responsables a preparar sus Planes de Medida y Verificación, que especifican cómo se deben medir el ahorro en cada proyecto. Un adecuado Plan de Medida y Verificación permite verificar el rendimiento real del proyecto, en base a claros informes demostrativos de ahorro. [7]

Este protocolo es publicado por la Efficiency Valuation Organization (EVO) con el objetivo de incrementar la inversión en proyectos de Eficiencia Energética. Para este fin, el IPMVP tiene las siguientes características:

- Permite justificar el pago de dinero por rendimiento, asegurando que las mediciones de ahorro de energía son realizadas siguiendo un procedimiento correcto.
- Permite reducir el coste asociado a la confección de un contrato de rendimiento energético, ya que la existencia de un Plan de Medida y Verificación en un proyecto puede simplificar la negociación de estos.
- Da credibilidad internacional de los informes de ahorro de energía.
- Ayuda en la gestión y aumenta la credibilidad de programas de materia energética.

2.3.2.1. *Etapas M&V*

Según el IPMVP, las etapas de un proceso de M&V son:

1. Instalación, calibración y mantenimiento de los equipos de medida.
2. Recopilación y análisis de los datos.
3. Desarrollo de un método de cálculo del ahorro y de las estimaciones adecuadas.

4. Realización de los cálculos con las lecturas obtenidas
5. Elaboración de informes, garantizando su calidad, y verificación de los informes por terceras partes.

2.3.2.2. Equilibrio entre incertidumbre y ahorro

El coste y la incertidumbre son dos elementos que están muy relacionados, pues a menor incertidumbre en las mediciones de un proceso de M&V se debe incurrir en mayores costos. Por tanto, para mantener un equilibrio entre incertidumbre y ahorro el IPMVP establece como recomendación que los gastos anuales de M&V deben ser menores al 10% del ahorro anual que se está evaluando.

2.3.2.3. Elementos IPMVP

Los elementos del protocolo IPMVP que configuran un proceso de M&V son mostrados a continuación:

- Sistema: es el conjunto de vehículos o flotas al cual se les aplica la o las Medidas de Mejora de Eficiencia Energética (MMEE).
- Sistema extendido: es un conjunto que contiene al del Sistema, para el cual se proyectan los resultados de disminución del consumo de combustible calculados para el Sistema. Este elemento no aparece en el IPMVP, sin embargo se agrega, pues es de utilidad para tener una estimación de los posibles ahorros que se pueden llegar a tener en caso de aplicar la(s) MMEE(s) a flotas vehiculares en las que se está evaluando intervenir.
- MMEE aplicada: es la o las Medidas de Mejora de Eficiencia Energética aplicadas en cada proyecto.
- Medidor utilizado: Es él o los instrumentos utilizados para obtener los datos de las variables a medir.
- Precisión: también conocido como intervalo de confianza, es la medida del intervalo absoluto o relativo dentro del cual se espera que estén los valores verdaderos de lo que se esté midiendo (consumos, kilometrajes, rendimientos, etc.), con un nivel determinado de confianza. El nivel de confianza se refiere a la probabilidad de que el intervalo planteado contenga el parámetro que se ha estimado. La precisión depende de variados factores, en donde los principales son la exactitud del medidor utilizado y los factores controlados en las pruebas. En general para poder utilizar un medidor más exacto y para controlar los factores de las pruebas de mejor manera se debe incurrir en un costo más elevado.
- Costo M&V: es el costo que implica la realización del plan de Medición y Verificación, es decir el costo de cuantificar el impacto de la aplicación de las MMEE correspondientes a cada estudio.
- Línea Base (LB): Es un periodo en el que se realizan mediciones, el cual es previo a la aplicación de las MMEE.

- Datos utilizados: son los datos utilizados para determinar el periodo de línea base, incluido el periodo de tiempo en el cual estos se tomaron.
- Factores estáticos: características de la instalación que afectan el consumo de combustible, pero que deberían permanecer constantes tanto en el periodo de Línea Base como en el periodo Demostrativo de Ahorro.
- Periodo Demostrativo de Ahorro (DA): es el periodo en el cual se mide el efecto de la aplicación de la o las MMEE respectivas en el sistema.
- Ajuste de Base: son los ajustes que deben realizarse para equiparar las condiciones del periodo de LB con el DA, con el objetivo de hacer comparables estos periodos.
- Impacto: Es la reducción del consumo o el aumento en el rendimiento producto de la aplicación de una o varias MMEE sobre un sistema.
- Potencial de ahorro: Es la estimación del ahorro para el Sistema extendido, proyectando los resultados obtenidos para el Sistema definido. Este elemento también fue agregado de acuerdo a lo explicado en “Sistema extendido”.

2.3.3 Protocolo de cuantificación de reducción de consumo energético para el transporte

El nuevo *Protocolo de cuantificación de reducción de consumo para el transporte* es una metodología desarrollada en el proyecto denominado *Desarrollo de metodología y cuantificación de reducciones de consumo en programas (2011-2013) de transporte AChEE*, cuyo fin ha sido unificar los criterios de medición de impactos e incorporar seguimiento de los proyectos terminados de la AChEE.

Este protocolo aborda la aplicación de tres tipos de proyectos de acuerdo a sus diferencias en cuando a mediciones:

- Proyectos de auditoría: proyectos en donde se realiza un levantamiento de información disponible, recursos existentes y potenciales de ahorro teóricos en las empresas y beneficiarios participantes.
- Proyectos de implementación: proyectos en donde se realizan mediciones de la aplicación, al menos a escala piloto, de una o varias MMEE, estimando el impacto de ellas en la realidad de la empresa.
- Proyectos de seguimiento: proyectos que se realizan posterior a la ejecución de los proyectos anteriormente señalados, que buscan verificar si las medidas adoptadas previamente se siguen aplicando, se han extendido o si se dejaron de aplicar, de manera que el trabajo realizado se sostenga en el tiempo.

Para lograr su aplicación, el protocolo se constituye de un flujo de actividades ordenadas de manera lógica, más herramientas de apoyo materializadas en formularios y bases de datos que brindan una ayuda para la correcta aplicación de las distintas etapas de los

proyectos. Dentro de las etapas más importantes de los proyectos de implementación tenemos:

- Caracterización de empresas y beneficiarios: se realiza en base a información levantada en auditoría.
- Definición de plan de eficiencia energética: una vez analizadas las oportunidades y potenciales focos de mejora, se realiza un plan de eficiencia de energética en donde se diseña un plan de trabajo para implementar una o varias MMEE.
- Planificación de mediciones: se determinan los periodos de Línea Base (LB), implementación y Demostrativo de Ahorro (DA).
- Registro de datos: se realizan las mediciones en los periodos de LB y DA y se registran en el formulario N°8 (ver Anexo B.3).
- Definición de impactos: con los datos recopilados se definen los impactos de las MMEE aplicadas utilizando el formulario N°1 (ver Anexo B.4) siguiendo los lineamientos descritos en el subproceso Análisis Estadístico del protocolo (ver Anexo B.1). En términos generales se aplica un test T-Student² para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas (DES) con un 90% de confiabilidad, entre los promedios de las tasas de consumo (TdC)³ de los periodos de LB y DA. Una vez se determina que hay DES entre los dos periodos, el impacto porcentual queda dado por la variación de la tasa de consumo promedio del periodo DA con respecto a la del periodo LB. En la ecuación (1) se muestra la fórmula aplicada en el test T-Student.

$$Impacto \left[\frac{lt}{100km} \right] = \bar{X} - \bar{Y} \pm t_{\alpha/2,v} \sqrt{\frac{s_1^2}{m} + \frac{s_2^2}{n}} \quad (1)$$

$$Impacto \% = \frac{Impacto}{\bar{X}} \quad (2)$$

Donde:

\bar{X} : Tasa de consumo promedio del periodo de Línea Base $\left[\frac{lt}{100km} \right]$.

\bar{Y} : Tasa de consumo promedio del periodo Demostrativo de Ahorro $\left[\frac{lt}{100km} \right]$.

$t_{\alpha/2,v}$: Valor estadístico t de la distribución T-Student para un nivel de confiabilidad $1-\alpha$, con v grados de libertad.

s_1 : Desviación estándar del periodo de Línea Base.

s_2 : Desviación estándar del periodo Demostrativo de Ahorro.

m : Número de vueltas del periodo de Línea Base.

n : Número de vueltas del periodo Demostrativo de Ahorro.

² Test T-Student: Test estadístico para determinar diferencias entre dos grupos de datos.

³ Tasa de consumo: es el consumo de combustible en un periodo de tiempo, normalizado por la cantidad de kilómetros recorridos en ese periodo de tiempo, tiene por unidades $[lt/100km]$.

En donde los grados de libertad se calculan con la ecuación (3).

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{m} + \frac{s_2^2}{n}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{m}\right)^2}{m-1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n}\right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

Con la ecuación (1) se determina una variación estadísticamente significativa entre dos grupos de datos cuando el valor absoluto de la diferencia entre las medias es mayor a la precisión (término que precede al \pm), es decir cuando se cumple la condición de la ecuación (4).

$$(\bar{X} - \bar{Y}) > t_{\alpha/2,v} \sqrt{\frac{s_1^2}{m} + \frac{s_2^2}{n}} \quad (4)$$

- Cálculo de ahorros: estimación de la reducción de consumo de combustible debido a la o las MMEE aplicadas, utilizando el impacto calculado con el análisis estadístico y el nivel de actividad anual⁴ de los vehículos intervenidos como se muestra en la ecuación (5).

$$Ahorro\ anual \left[\frac{lt}{año} \right] = Impacto \left[\frac{lt}{100km} \right] \times \frac{NA [km/año]}{100} \quad (5)$$

Los proyectos de auditoría y seguimiento son menos complejos dado que incorporan parte de las actividades descritas para el periodo de implementación, es por esto que en esta revisión no se describen en mayor detalle.

2.3.4 Métodos para cuantificar impacto de Medidas de Eficiencia Energética

En la actualidad existen variadas formas para evaluar el impacto de las MMEE en el transporte. Dependiendo de los requerimientos de precisión de las mediciones, disponibilidad de recursos económicos y de tiempo, es que se elige la aplicación de una sobre otras. A continuación se detallan algunas de ellas.

⁴ Nivel de actividad anual: son los kilómetros que recorre anualmente un vehículo. Esta información se obtiene de la etapa de caracterización de la empresa o beneficiario.

2.3.4.1 Test en ruta

En esta sección se describen dos test que utilizan vehículos en rutas reales, la norma NCh 3331 y el Test de desaceleración.

2.3.4.1.1 Norma NCh 3331

La norma NCh 3331 describe los procedimientos que permiten determinar y documentar el porcentaje de cambio en el consumo de combustible en pruebas realizadas en pistas o en carreteras, debido a un cambio en la configuración de la propulsión, puesta en marcha u operación del vehículo. Dentro de las dos opciones mencionadas, el método en carretera es la alternativa de menor costo, pero es la entrega datos con menor precisión debido a la falta de control sobre el tráfico. Esta norma para su elaboración tomó en cuenta la norma SAE J1321 en sus versiones de 1986 y 2012.

Este procedimiento de prueba, puede cuantificar el impacto en el consumo de combustible de un vehículo con peso bruto vehicular mayor a 3.500 kg, resultante de la adición, remoción o modificación de un componente o sistema o un cambio en la operación del vehículo, así como también, para la comparación entre dos o más vehículos. Los componentes representativos o sistemas que se pueden evaluar, son aquellos que cambian la resistencia aerodinámica, la resistencia al rodado, la eficiencia de propulsión, la efectividad del lubricante, el combustible y la variación de carga, para un ciclo de trabajo dado. En la realización de esta prueba está considerado un vehículo patrón, el cual debe ser idéntico a los vehículos de prueba, pero sin las modificaciones que se deseen estudiar. Los criterios para una prueba válida se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de prueba en pista y en carretera definidos por la norma NCh3331

Ítem	Criterio definido por la norma
Vehículos	Idéntico (vehículo de prueba y control) salvo que esta característica sea el objeto de estudio
Configuración de los vehículos	Idéntica salvo que esta característica sea el objeto de estudio
Carga de los vehículos	Idéntica, salvo que esta característica sea el objeto de estudio
Condición mecánica de los vehículos	Similar (idealmente idéntica)
Velocidad del viento durante un trayecto	≤ 20 km/h
Rango permitido de temperatura	(4 a 35)°C
Cambio de temperatura durante la prueba	≤ 16 °C
Lluvia	No permitida
Muestras de mediciones meteorológicas	1 al inicio de cada trayecto

Tiempo máximo entre trayectos	30 min
Control de velocidad	GPS
Longitud del trayecto	> 64 km
Lugares de medición meteorológica	Un lugar de medición en el punto de inicio de la prueba
Control de espaciamiento	Cronómetro
Tiempo máximo entre los vehículos del trayecto	6 min
Método de medición de combustible	Gravimétrico

2.3.4.1.2 Test de desaceleración (Coast Down test)

Este test consiste en la puesta en marcha de un vehículo a una cierta velocidad para luego desenganchar el motor, y simultáneamente registrar la velocidad y distancia recorrida hasta que el vehículo se detenga. En el desarrollo de esta prueba se debe evitar la presencia de vientos inusuales que puedan disminuir la precisión de los resultados.

El Test de desaceleración se puede aplicar con diversos fines, principalmente con la intención de obtener información valiosa sobre la condición general del vehículo y su interacción con el ambiente. Uno de los principales objetivos es evaluar los coeficientes de las fuerzas de aerodinámica y resistencia al rodaje actuando sobre el vehículo, dada cierta velocidad y condiciones del camino. Otro propósito de este test es establecer si la condición del vehículo es aceptable para la realización de otro test más complejo. Los pasos a seguir para desarrollar el presente ensayo están estandarizados en la norma SAE J1263.

2.3.4.2 *On Board Diagnostic (OBD)*

On Board Diagnostics (OBD), es un sistema computacional desarrollado a partir de 1996 como requerimiento de la organización Clean Air Act Amendment. Este sistema está diseñado para monitorear el funcionamiento de los componentes principales de un motor, incluyendo aquellos responsables de controlar las emisiones vehiculares y el consumo de combustible.

El OBD-II es la segunda generación de este sistema, se desarrolló con el fin de ampliar la capacidad y extender este sistema a una mayor cantidad de vehículos. Actualmente se puede obtener la información del consumo que almacena el computador interno del vehículo mediante un conector que conecta el puerto OBD-II a un computador portátil, y luego mediante un software especializado se extrae dicha información. La desventaja de este procedimiento es que no todos los vehículos utilizan el protocolo OBD-II, pues también existe el protocolo J-OBD, característico de los vehículos japoneses; además, los conectores que sirven para cada vehículo no son los mismos, lo que hace más difícil su aplicación. [8]

2.3.4.3 *Norma SAE J1252 Procedimiento de ensayo en túnel de viento para camiones y buses*

Esta norma señala un procedimiento para realizar ensayos en túneles de viento, con el objetivo de medir directamente la fuerza de arrastre aerodinámico, y con ello su coeficiente de arrastre asociado (C_a). La utilización de túneles de viento es el único método que permite medir de forma precisa el coeficiente de arrastre para un flujo con cierta inclinación con respecto a la trayectoria del vehículo. El costo de realización de estas pruebas puede alcanzar los 7.000 USD, en adición al costo de fabricación de los prototipos a escala [4].

2.3.4.4 *Simulación mediante Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Previo a la descripción de los procedimientos en túneles de viento y la simulación Fluido Dinámica Computacional (CFD) es necesario mencionar el concepto de arrastre aerodinámico, pues en base a este concepto se sustentan los ahorros considerables en vehículos, en particular en los de transporte de carga.

2.3.4.4.1. Arrastre aerodinámico

La fuerza de arrastre aerodinámico es la fuerza que se opone al movimiento de un objeto debido al paso de este por un fluido. Depende de la velocidad al cuadrado, del área del objeto, de la densidad del medio y de una constante denominada coeficiente de arrastre aerodinámico, que da una medida de cuan aerodinámico es el objeto. En la ecuación (6) se muestra la fórmula de la fuerza aerodinámica o arrastre aerodinámico, y la ecuación (7) se muestra como obtener la potencia del vehículo debido a la fuerza de arrastre aerodinámico.

$$D = \frac{1}{2} C_a \rho V^2 A \quad (6)$$

$$P = D \times V = \frac{1}{2} C_a \rho V^3 A \quad (7)$$

El coeficiente aerodinámico se modela como la suma de dos componentes:

- Resistencia de presión: correspondiente a la diferencia de presión entre la zona frontal de estancamiento y la zona posterior de baja presión que causa la resistencia al avance.
- Resistencia de fricción: producida por los esfuerzos de corte viscosos sobre la superficie del cuerpo.

La preponderancia de uno sobre otro depende principalmente de la forma del cuerpo.

Para tener una medida del coeficiente aerodinámico considerando efectos de vientos cruzados se utiliza un valor promedio del coeficiente, basado en los vientos predominantes de una zona o región. [9]

2.3.4.4.2. Descripción

El análisis computacional de la dinámica de fluidos (CFD) lo que busca es determinar el comportamiento de los fluidos (flujos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas, y fenómenos relacionados) mediante aproximaciones numéricas. Se basa en las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento, energía, entre otras. Aplicado en el campo de la aerodinámica de vehículos, la simulación mediante CFD aproxima numéricamente el campo del flujo que rodea a un vehículo para examinar el comportamiento aerodinámico que tiene, en particular para obtener el coeficiente de arrastre aerodinámico de un vehículo (C_d).

Algunos beneficios que trae la utilización de CFD son:

- Buena aplicabilidad para etapas tempranas en el proceso de diseño
- Los resultados que se obtienen contemplan el flujo total que rodea un vehículo
- Permite examinar de forma gruesa los efectos del cambio de geometría en el campo de flujo
- La geometría y tamaño de los modelos puede cambiarse fácilmente

Mientras que las desventajas de este método son:

- La generación del mallado puede tomar mucho tiempo cuando se requiere un nivel de alto detalle
- Los modelos de turbulencia simplificados dan cierta imprecisión en los resultados
- Mayor exactitud requiere mayor tiempo computacional
- Dificultad para evaluar rápidamente cambios en diseño

Si bien la simulación CFD ha mejorado mucho en las últimas décadas, todavía no alcanza la eficiencia y precisión que tienen las pruebas en túneles de viento (2). La mayor fuente de incertidumbre de este método son los modelos de turbulencia en las capas de corte que se desarrollan alrededor del vehículo. Los modelos estándar y los más eficientes han sido desarrollados basados en simples condiciones de flujo (capa límite sobre una superficie plana, como consecuencia de un entorno idealizado, etc.), condiciones que funcionan bien en objetos simplificados, pero que generan errores cuando se tienen situaciones tales como el flujo de aire que pasa por el espacio entre la cabina y el remolque de un camión, o la interacción de las ruedas rodando con el flujo del fluido que pasa bajo el vehículo.

El efecto del número de Reynolds es también preponderante debido a que los modelos de turbulencia están generalmente basados en flujos de Reynolds elevados, en donde la turbulencia tiende a comportarse de manera insensible al Reynolds. Estas condiciones

también niegan las características de flujo laminar y de corte de transición que pueden ser frecuentes en la cara frontal de muchos vehículos de carretera. En vehículos pesados por ejemplo, el flujo alrededor de las caras frontales de la cabina está caracterizado por flujos de bajos Reynolds, con características muy diferentes de turbulencia de las que tienen vehículos ligeros. Si bien existen técnicas para simular movimientos inestables de flujo a gran escala alrededor de un vehículo (por ejemplo: Large Eddy Simulation, LES, y Detached Eddy Simulation, DES), estas implican mayores tiempos de resolución y son menos eficientes cuando se usan para el diseño.

Dadas las dificultades que tiene la simulación CFD, los resultados que arroje deben ser validados con resultados experimentales para asegurar que se esté llegando a resultados certeros y representativos. Esto debido a que los dispositivos que reducen el arrastre aerodinámico generalmente son usados en lugares donde los efectos de corte, flujo inestable y turbulencia son importantes, lo cual hace necesaria la utilización de más de un método de evaluación de los dispositivos.

Los costos de la utilización de CFD constan principalmente del costo del software (costo de licencias más costo por poder utilizar procesos paralelo), del costo del hardware (costo del sistema dividido por el número de núcleos) y costos operacionales (costo de HH multiplicado por el tiempo de resolución) [10].

2.3.4.4.3. Metodología simulación CFD

Para realizar una simulación CFD con el objetivo obtener el coeficiente de arrastre aerodinámico de un vehículo se deben realizar los siguientes pasos:

- Identificar el dominio del modelo
- Obtener el diseño del vehículo en formato Computer Aided Design (CAD)
- Definir el volumen de control
- Crear el mallado del modelo
- Definir parámetros del problema:
 - Condiciones de borde: superficie basal fija o móvil, ruedas fijas o móviles, ángulo del viento (en general entre 0° y 10°).
 - Condiciones iniciales.
 - Propiedades del material
 - Modelo de turbulencia
- Correr el modelo
- Analizar los resultados

2.3.4.4.4. Modelos de turbulencia [11]

A continuación se presentan algunos modelos de turbulencia generalmente utilizados en la modelación CFD:

- Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS): modelo que se basa en la promediación de las ecuaciones de Navier-Stokes, en donde las distintas magnitudes son representadas como la suma de su valor medio más un valor fluctuante.
 - Modelos de dos ecuaciones: Existen varios submodelos de los modelos RANS, entre los cuales los de dos ecuaciones son los más empleados. Dentro de ellos los más conocidos son:
 - Modelo κ - ε : Este modelo utiliza dos ecuaciones de balance en derivadas parciales en las que se ven involucradas la energía cinética del fluido turbulento (κ) y su velocidad de disipación ε .
 - *Modelo κ - ω* : En este modelo, al igual que en el anterior, se utilizan ecuaciones de balance en derivadas parciales, en donde las variables involucradas son la energía cinética (κ) y la disipación específica (ω).
- Large Eddy Simulations (LES): Modelo basado en el filtrado espacial o frecuencial de las ecuaciones que gobiernan al fluido, de manera de eliminar las escalas más bajas de solución.
- Detached Eddy Simulation (DES): Este modelo intenta utilizar los puntos fuertes de los modelos RANS y LES. De RANS se aprovecha su eficacia para modelar cerca de la frontera del contorno, y de LES se aprovecha su buena modelación en lugares lejanos de ella.
- Direct Numerical Simulation (DNS): Modelo que calcula las ecuaciones de Navier-Stokes de forma directa, lo que la convierte en el modelo que ofrece mayor exactitud en sus resultados, pero a un elevado costo computacional.

2.3.4.4.5. Softwares CDF

A continuación se detallan las características de algunos softwares CFD disponibles en el mercado.

ANSYS Fluent

El software ANSYS Fluent posee una amplia capacidad para modelar flujos, turbulencia, transferencia de calor y aplicaciones industriales como flujos de combustión provenientes de hornos, columnas de burbujas en plataformas petroleras, entre otras. Modelos especiales han servido para ampliar su alcance, permitiendo realizar modelaciones sobre combustión interna, aeroacústica, turbo-maquinería y sistemas de multifásicos.

COMSOL Multiphysics, CFD Module

El módulo CFD de COMSOL es una plataforma que permite simular dispositivos y sistemas que involucran modelos sofisticados de flujos de fluidos, entre los que se

encuentran flujos compresibles, no isotermales, no newtonianos, multifase, y porosos, tanto para regímenes laminares como turbulentos.

ADINA CFD

El software ADINA CFD provee herramientas de elementos finitos y volúmenes de control para analizar flujos compresibles e incompresibles. Los flujos pueden contener superficies libres e interfaces móviles entre fluidos o entre fluidos y estructuras. Algunas asunciones usadas para modelar flujos de fluidos son:

- Ecuaciones completas de Navier-Stokes o ecuaciones de Euler.
- Flujos incompresibles o totalmente compresibles.
- Análisis transiente o estacionario.
- Flujos laminares o turbulentos.
- Flujos con o sin transferencia de calor.
- Transferencia de masa.

OpenFOAM

Open FOAM, es un software CFD de código abierto y gratuito que abarca casi todas las áreas de ingeniería y ciencias. OpenFOAM tiene una amplia gama de utilidades y módulos para resolver flujos de fluido complejos, incluyendo reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, dinámica de sólidos y electromagnetismo. Incluye herramientas de mallado, en particular snappyHexMesh, un mallador paralelizado para geometrías CAD complejas y para pre y post procesamiento. Además, OpenFOAM ofrece variados métodos y modelos para simular turbulencia, entre los que se encuentran: RANS, LES, DES y DNS.

SU2

SU2 suite es una colección de herramientas software de código abierto escritas en C++. Se utiliza, para realizar análisis de Ecuaciones Diferenciales Parciales para resolver problemas de optimización. El set de herramientas está diseñada con la idea de desarrollar problemas de fluido dinámica computacional y optimización aerodinámica, sin embargo su uso se ha extendido para tratar ecuaciones del campo de la electrodinámica, reacciones químicas en flujos y otros.

Este software es desarrollado por el Laboratorio de Diseño Aeroespacial del departamento de Aeronáutica y Astronáutica de la Universidad de Stanford.

ELEMENTS

ELEMENTS es un software suite dedicada al diseño de vehículos, cuyo objetivo es disminuir la brecha entre estilistas, ingenieros y gerencia, ofreciendo un sistema de integración completo que permite disminuir los tiempos de obtención de productos,

mejorar eficiencia en vehículos y todo esto a un bajo costo. Actualmente, el software se centra principalmente en análisis CFD y optimización de: cubiertas aerodinámicas, manejo térmico debajo del capó, climatización y confort de la cabina, aero-acústica y gestión del agua.

Este programa está basado en HELYX, que a su vez está basada en OpenFOAM, con el fin de ofrecer una herramienta rentable que reúne prácticas de simulación para el diseño automotriz con el software de código abierto más avanzado. La empresa desarrolladora de ELEMENTS es Streamline Solutions.

2.3.4.5. Metodología Potencia Específica Vehicular (VSP)

2.3.4.5.1. Descripción general [12]

La Potencia Específica Vehicular o Vehicle Specific Power (VSP) corresponde a la potencia requerida para operar un vehículo por unidad de peso en unidades de kilowatt por tonelada, y representa el estado energético de un vehículo en un instante dado. Esta variable es considerada como un buen método para estimar emisiones vehiculares, según los modelos internacionales de estimación de emisiones International Vehicle Emissions (IVE) y Motor Vehicle Emissions Simulator (MOVES). Su desarrollo teórico se encuentra ampliamente reportado en la literatura especializada, destacándose el trabajo de tesis de José Luís Jiménez [13].

La metodología ocupada por IVE permite obtener el VSP teniendo datos de velocidad, aceleración y diferencia de altura segundo a segundo en un viaje. Una vez obtenidos los datos de VSP, estos se relacionan con el estado de emisiones.

Con los datos de emisiones vehiculares se puede calcular el consumo de combustible a través de los factores de emisión del 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, que indican cuanto CO₂ se emite al consumir cierta cantidad de energía, para distintos combustibles.

2.3.4.5.2. Obtención del VSP [12]

A continuación, se describe la metodología para obtener el VSP de acuerdo a cómo lo hace el modelo IVE. La Figura 6 muestra esquemáticamente todos los términos considerados en la determinación del parámetro VSP, se identifican las fuerzas cinética, potencial, de rodadura, aerodinámica y por roce mecánico del vehículo en desplazamiento. Estas fuerzas son consideradas para obtener la ecuación (8), expresión que considera los elementos mencionados anteriormente.

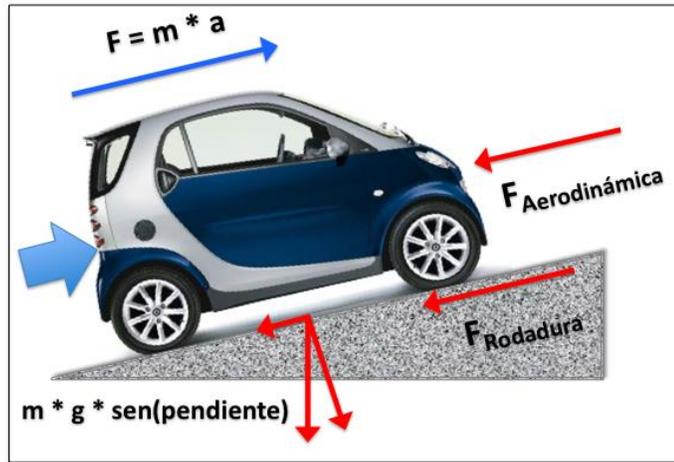


Figura 6. Fuerzas involucradas en el movimiento de un vehículo.

$$VSP \left[\frac{kW}{Ton} \right] = \frac{Potencia}{Masa} = \frac{\frac{d}{dt}(E_c + E_p) + F_{rodadura} \cdot v + F_{aerodinámica} \cdot v + F_{roceMecánico} \cdot v}{m} \quad (8)$$

Desarrollando la ecuación anterior obtenemos la ecuación (9), que muestra el detalle de cada componente de la potencia.

$$VSP \approx v \cdot a(1 + \epsilon_i) + g \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot v + g C_R v + \frac{1}{2} \rho_a C_D \frac{A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v + C_{RM} \cdot v \quad (9)$$

Donde:

- v : Velocidad [m/s]
- a : Aceleración [m/s²]
- ϵ_i : “Factor de Masa”, equivalente a la masa de los componentes rotatorios. Depende de la marcha
- g : Aceleración de gravedad [m/s²]
- α : Ángulo de la pendiente
- C_R : Coeficiente de rodadura
- ρ_a : Densidad del aire
- C_D : Coeficiente aerodinámico
- A : Área frontal del vehículo [m²]
- m : Masa del vehículo [kg]
- v_w : Velocidad del viento [m/s]
- C_{RM} : Coeficiente de roce mecánico

Para poder obtener el estado energético del vehículo de forma más sencilla, el IVE propone una simplificación, pudiendo obtener el VSP solo con los datos de velocidad, aceleración y cambio de pendiente, obteniéndose la ecuación (10). Para esto se consideran los siguientes valores como constantes:

$$\epsilon_i = 0,1$$

$$g = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$C_R = 0,0135$$

$$\rho_a = 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$C_D \cdot A/m = 0,0005 \text{ [m}^2\text{/kg]}$$

$$v_w = 0 \text{ [m/s]}$$

$$C_{RM} = 0$$

$$VSP \left[\frac{kW}{Ton} \right] = v \left[1,1 \cdot a + 9,81 \cdot \text{sen} \left(\tan^{-1} \left(\frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta d_i} \right) \right) + 0,132 \right] + 0,000302 \cdot v^3 \quad (10)$$

Donde:

h_i : Altura en el instante i

d_i : Distancia recorrida entre el segundo i y el i-1

El modelo IVE, además de utilizar el VSP como variable de estimación de emisiones, utiliza una segunda variable para mejorar aún más la correlación entre las variables dinámicas y las emisiones. Esta se conoce como el “Stress del motor” y depende la situación en que se encontraba el motor entre 1 y 21 segundos antes del instante analizado. La variable de Stress se obtiene utilizando la ecuación (11).

$$Stress \text{ [adimensional]} = RPMIndex + \left(0,08 \left[\frac{Ton}{kW} \right] \right) \cdot PreaveragePower \quad (11)$$

Donde:

$$PreaveragePower = \text{Promedio} \left(VSP_{t=-21 \text{ seg a } -1 \text{ seg}} \right) \left[\frac{kW}{Ton} \right] \quad (12)$$

RPMIndex: es una constante que se asocia a las revoluciones esperadas del vehículo, que depende de la velocidad y el VSP del vehículo en un instante dado. En la Tabla 3 se muestran los distintos valores del *RPMIndex*.

Tabla 3. Valores de *RPMIndex*.

Velocidad [m/s]	RPMIndex		Velocidad [m/s]	RPMIndex	
	VSP < 16	VSP ≥ 16		VSP < 16	VSP ≥ 16
0	0,900	0,900	25	1,923	5,000
1	0,900	0,900	26	2,000	5,200
2	0,900	0,900	27	2,077	5,400
3	1,000	1,000	28	2,154	5,600
4	1,333	1,333	29	2,231	5,800
5	1,667	1,667	30	2,308	6,000
6	1,200	2,000	31	2,385	6,200

7	1,400	2,333	32	2,462	6,400
8	1,600	2,667	33	2,538	6,600
9	1,286	1,800	34	2,615	6,800
10	1,429	2,000	35	2,692	7,000
11	1,571	2,200	36	2,769	7,200
12	1,714	2,400	37	2,846	7,400
13	1,000	2,600	38	2,923	7,600
14	1,077	2,800	39	3,000	7,800
15	1,154	3,000	40	3,077	8,000
16	1,231	3,200	41	3,154	8,200
17	1,308	3,400	42	3,231	8,400
18	1,385	3,600	43	3,308	8,600
19	1,462	3,800	44	3,385	8,800
20	1,538	4,000	45	3,462	9,000
21	1,615	4,200	46	3,538	9,200
22	1,692	4,400	47	3,615	9,400
23	1,769	4,600	48	3,692	9,600
24	1,846	4,800	49	3,769	9,800

Por último, el modelo IVE propone separar los niveles energéticos en grupos según VSP y según Stress, los cuales reciben el nombre de *bins*. Hay 20 grupos de VSP y 3 grupos de Stress, con lo cual se obtienen un total de 60 bins de potencia. Estos se pueden apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Distribución de bins.

Rango VSP [kW/Ton]	Bin		
	Estrés Bajo (entre -1,6 y 3,1)	Estrés medio (entre 3,1 y 7,8)	Estrés alto (entre 7,8 y 12,6)
-80,0 a -44,0	0	20	40
-44,0 a -39,9	1	21	41
-39,9 a -35,8	2	22	42
-35,8 a -31,7	3	23	43
-31,7 a -27,6	4	24	44
-27,6 a -23,4	5	25	45
-23,4 a -19,3	6	26	46
-19,3 a -15,2	7	27	47
-15,2 a -11,1	8	28	48
-11,1 a -7,0	9	29	49
-7,0 a -2,9	10	30	50
-2,9 a 1,2	11	31	51
1,2 a 5,3	12	32	52

5,3 a 9,4	13	33	53
9,4 a 13,6	14	34	54
13,6 a 17,7	15	35	55
17,7 a 21,8	16	36	56
21,8 a 25,9	17	37	57
25,9 a 30,0	18	38	58
30,0 a 100,0	19	39	59

2.3.4.5.3. Determinación del consumo de combustible a partir de emisión de CO₂

Para la determinación del consumo de combustible se utilizan factores de emisión de CO₂ asociados a cada bin, obtenidos previamente en el estudio *Actualización de Factores de Emisiones para Vehículos Livianos y Medianos (UNTEC 2007)*. Estos factores dependen del tipo de vehículo (liviano, mediano o pesado/ comercial o de pasajero) y el combustible. En la Tabla 5 se muestran los factores de emisión para vehículos livianos particulares.

Tabla 5. Factores de emisión de CO₂ por bin de vehículos livianos particulares. [14]

Bin	Factor de emisión [g/s]			Bin	Factor de emisión [g/s]			Bin	Factor de emisión [g/s]		
	Gasolina	Diesel			Gasolina	Diesel			Gasolina	Diesel	
		Euro 3	Euro 3			Euro 4	Euro 3			Euro 3	Euro 4
0	1,301	3,134	0,271	20	-	-	-	40	-	-	-
1	0,846	0,138	-	21	1,492	-	-	41	-	-	-
2	1,264	0,132	0,073	22	-	0,404	-	42	-	-	-
3	0,824	0,626	0,757	23	-	5,469	-	43	-	-	-
4	1,34	0,19	0,224	24	1,233	-	-	44	-	-	-
5	1,00	0,179	0,04	25	-	-	-	45	-	-	-
6	1,051	0,279	0,078	26	1,718	0,269	-	46	-	-	-
7	1,022	0,248	0,119	27	1,392	0	0,059	47	-	-	-
8	1,06	0,226	0,133	28	0,661	0,845	0,005	48	-	-	-
9	1,012	0,334	0,188	29	1,844	0,818	0,142	49	-	-	-
10	1,103	0,517	0,26	30	1,532	0,982	0,399	50	-	-	-
11	1,103	0,544	0,43	31	2,37	3,48	0,258	51	-	-	-
12	2,047	1,69	1,255	32	2,969	2,593	-	52	-	-	-
13	2,861	2,541	2,066	33	4,333	3,33	0,443	53	-	-	-
14	3,657	3,443	2,762	34	4,439	4,646	-	54	-	-	-
15	4,23	4,235	3,783	35	4,73	4,883	2,195	55	-	-	-
16	4,627	4,789	4,13	36	5,023	5,193	4,392	56	7,56	-	6,911
17	3,916	5,589	4,227	37	5,517	5,983	3,549	57	6,27	-	-
18	2,899	5,305	2,048	38	5,845	6,856	4,821	58	-	-	8,285
19	3,405	2,571	-	39	6,022	6,702	7,578	59	-	-	8,588

A partir de las estos factores, se calcula un factor de consumo en [lt/s] para cada bin, aplicando la ecuación (13).

$$FCBin_i = \frac{FEBin_i}{FE \times PCI} \times 10^6 \quad (13)$$

Donde:

$FCBin_i$: Factor de consumo de combustible por Bin [lt/s]

$FEBin_i$: Factor de Emisión por Bin [g/seg]

FE : Factor de emisión [kg/TJ]

PCI : Poder Calorífico Inferior [kJ/lt]

Para los valores de Factores de Emisión de la ecuación (13) se ocupan los valores que aparecen en el Capítulo 3 del 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [15], que se muestran en la Tabla 6. Aquí los factores de emisión están basados en la suposición de la oxidación completa del carbono contenido en los distintos combustibles al momento de ser utilizados en el motor, en el transporte caminero.

Tabla 6. Factores de emisión de CO₂, para distintos combustibles, en [kg/TJ].

Combustible	Factor de Emisión de CO ₂ [kg/TJ]		
	Promedio	Límite inferior	Límite superior
Gasolina	69.300	67.500	73.000
Diésel	74.100	72.600	74.800
Gas Licuado	63.100	61.600	65.600
Kerosene	71.900	70.800	73.700
Gas Natural Comprimido	56.100	54.300	58.300
Gas Natural Licuado	56.100	54.300	58.300

Para obtener el Poder Calorífico Inferior (PCI) en [kJ/lt] se ocupan los valores de densidad de cada combustible en [kg/lt] y el PCI en [kCal/kg], cuyos valores son los utilizados por el BNE 2012 del Ministerio de Energía, exceptuando los valores del GNC y GNL. Los valores de PCI se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Poder Calorífico Inferior para distintos combustibles.

Combustible	Densidad [kg/lt]	Poder Calorífico Inferior	
		kCal/kg	KJ/lt
Gasolina	0,730	11.200	34.208
Diésel	0,840	10.900	38.309
Gas Licuado	0,550	12.100	27.845
Kerosene	0,810	11.100	37.618
Gas Natural Comprimido [16]	0,000717	11.990	35,98
Gas Natural Licuado [17]	0,451	11.653	48,75

En la Figura 7 se pueden observar los factores de emisión de CO₂ en [g/s], transformados en factores de consumo en [lt/s] para cada bin, correspondientes a vehículos livianos particulares Euro 3 a gasolina. Estos factores de consumo son los que se utilizan en el presente trabajo de título.

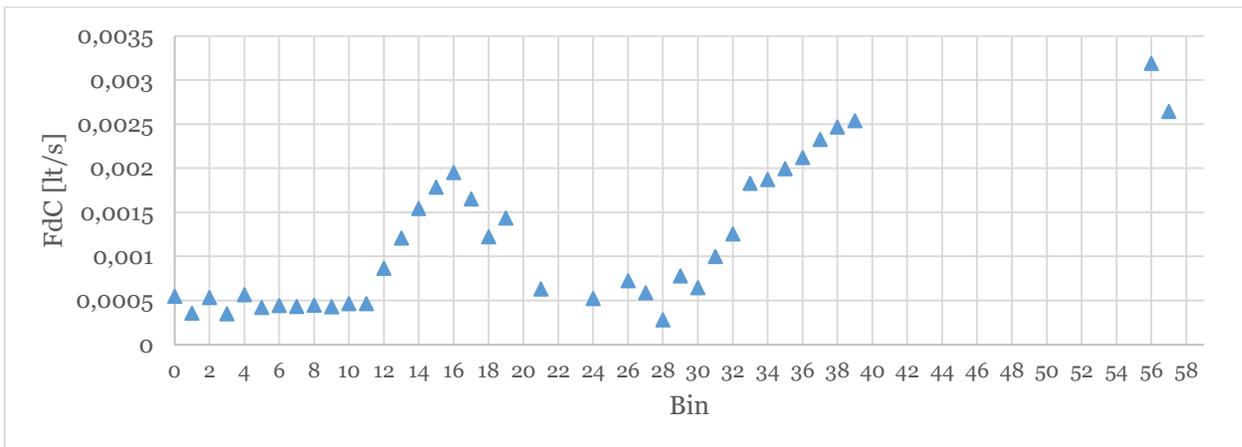


Figura 7. Factores de consumo de gasolina por bin para vehículos Euro 3 livianos particulares.

Finalmente, con los factores de consumo por bin en [lt/s], se calcula el consumo en un periodo determinado de tiempo sumando los consumos instantáneos, tal como se muestra en la ecuación (14).

$$\text{Consumo [lt]} = \sum_{i=1}^n \left(FCBin_i \left[\frac{\text{lt}}{\text{s}} \right] \times \Delta t_i [\text{s}] \right) \quad (14)$$

En donde el delta de tiempo corresponde a un segundo, y n queda determinado por el tiempo que se desea medir.

Otra manera de determinar el consumo de combustible a través de la metodología VSP es utilizar factores de consumo calibrados con consumo instantáneo obtenido a través del OBD-II.

3. Metodología experimental para medir el impacto de la medida Conducción Eficiente mediante VSP

Para analizar la metodología VSP como medidor del impacto de la conducción eficiente se realizan dos pruebas en donde se mide y estima el consumo de combustible en un total de 5 vehículos particulares a gasolina. La primera prueba se lleva a cabo en una pista, en donde se ven involucrados 4 vehículos, y la segunda se lleva a cabo en una ruta en condiciones reales de tránsito en donde se evalúa el desempeño de un vehículo. Para ambas pruebas se mide el consumo de combustible mediante OBD-II con información directa del computador interno de cada vehículo, y se registra con un GPS las velocidades segundo a segundo para estimar el consumo mediante VSP. Además, para las pruebas en pista se registra manualmente la tasa de consumo mostrada en el monitor de cada vehículo en los momentos de inicio y término de cada vuelta, que en conjunto con los kilómetros recorridos permite obtener el consumo de combustible de cada vuelta.

A continuación se explica la metodología que contempla tanto las pruebas como el tratamiento de datos para la obtención del consumo de combustible mediante OBD-II y VSP, más el posterior análisis de resultados.

3.1 Montaje

3.1.1 Pruebas en pista

La pista utilizada se ubica en el Club de Campo las Vizcachas, dirección Camino San José de Maipo N° 5669, y cuenta con un largo de 1,6 [km]. Para la realización de las pruebas se establecen ciertos obstáculos que simulan condiciones de manejo urbano, las que se muestran en el esquema de la Figura 8.

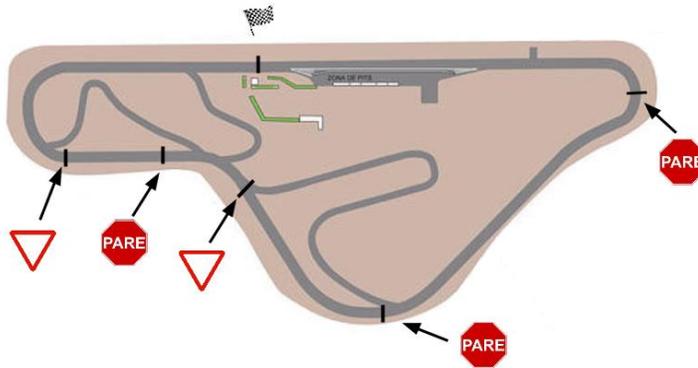


Figura 8. Esquema de la pista de pruebas.

El procedimiento que se lleva a cabo en estas pruebas consta de tres partes:

- a) Periodo de Línea Base (LB): consiste en 8 vueltas al circuito, en donde cada conductor maneja como lo hace usualmente.
- b) Auto-capacitación: luego del periodo de LB cada conductor estudia el contenido de la página www.conduccioneficiente.cl, donde se muestran distintas técnicas de manejo que permiten optimizar el gasto energético de un vehículo.
- c) Periodo Demostrativo de Ahorro (DA): luego de la auto-capacitación, cada conductor vuelve a dar 8 vueltas al circuito, aplicando lo aprendido sobre conducción eficiente.

Tanto en el periodo de LB como en DA la vuelta 1 es más larga que el resto, y la vuelta 8 es más corta, como se muestra en la Figura 9, Figura 10 y Figura 11.



Figura 9. Vuelta 1 de pruebas en pista



Figura 10. Vueltas 2 a 7 de pruebas en pista



Figura 11. Vuelta 8 de pruebas en pista

3.1.2 Prueba en condiciones reales de tránsito

La ruta elegida se ubica en el sector cercano a la salida norte de la ciudad de Curicó, ciudad ubicada a 200 km al sur de Santiago. El recorrido consta de 6 km aproximadamente, contemplando 1,8 km de trayecto en carretera y 4,2 km de trayecto urbano. La ruta se muestra en la Figura 12, y es recorrida en sentido anti horario.



Figura 12. Circuito de prueba en ruta

El procedimiento de esta prueba es el mismo del realizado en pista, en donde los periodos de LB y DA constan de 4 vueltas, y el proceso de auto-capacitación se lleva a cabo de la misma forma.

3.1.3 Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición utilizados en estas pruebas son los siguientes:

- a) Vam-Unit: GPS que guarda en archivos de texto datos segundo a segundo de: coordenadas, velocidad y altura (msnm). Estos datos son utilizados posteriormente para obtener el consumo de combustible mediante la metodología VSP.
- b) Conector OBD-II: el conector ELM 327, mostrado en la Figura 13, conecta el computador interno del vehículo a un computador portátil externo, permitiendo obtener información de los sensores del vehículo a través del programa ScanXL. De aquí se extrae la información del flujo de combustible consumido en [lt/hr], obteniéndose alrededor de 2 a 3 datos por segundo.



Figura 13. Conector OBD-II ELM 327

- c) Monitor del vehículo: algunos vehículos modernos muestran información de consumo de combustible en su pantalla. Esta información proviene del computador interno, al igual que la información que se obtiene del OBD-II. Para el presente experimento al partir la vuelta 1 se reinicia el contador (que puede ser de tasa de consumo [lt/100km] o de rendimiento [km/lt]), y luego se va anotando por cada vuelta el valor mostrado en pantalla, finalmente al final de la prueba se calculan los litros gastados por vuelta con la información anotada, más los kilómetros recorridos que son obtenidos a su vez con GPS o con la herramienta googlemaps.

3.1.4 Participantes

En total se contó con 5 conductores con sus vehículos particulares a gasolina, cuyos detalles se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Detalles de participantes.

ID	Conductor	Vehículo				Prueba	Fecha prueba
		Marca	Modelo	Transmisión	Año		
Vehículo 1	Matías Godoy	Mazda	3 Sedan	Manual	2013	Pista	4-11-13
Vehículo 2	Luís Marabolí	Toyota	Corolla	Automática	2011	Pista	4-11-13
Vehículo 3	Pablo Garrido	Honda	Fit	Manual	2009	Pista	5-11-13
Vehículo 4	Marcelo León	Ford	Focus	Manual	2014	Pista	5-11-13
Vehículo 5	José Ramírez	Toyota	Corolla	Manual	2012	Ruta	27-07-14

La información de consumo de cada vehículo se obtuvo de cuatro maneras: con OBD-II, con Monitor y con las dos variantes de VSP, uno con los factores de consumo obtenidos de un estudio sobre emisiones de CO₂, y otro con los factores de consumo calibrados con la información obtenida segundo a segundo con OBD-II. Sin embargo no todos los vehículos utilizaron todos los medidores, dado que el vehículo 3 no contó con mediciones con OBD-II en el periodo Demostrativo de Ahorro debido a dificultades técnicas, y el vehículo 5 no muestra información de consumo de combustible en el monitor.

3.2 Procesamiento de datos

3.2.1 Obtención del consumo de combustible

En la Figura 14 se muestran las etapas del procesamiento de datos que permiten obtener el consumo de combustible para un vehículo tanto con los datos del OBD-II como con los de la Vam-Unit.

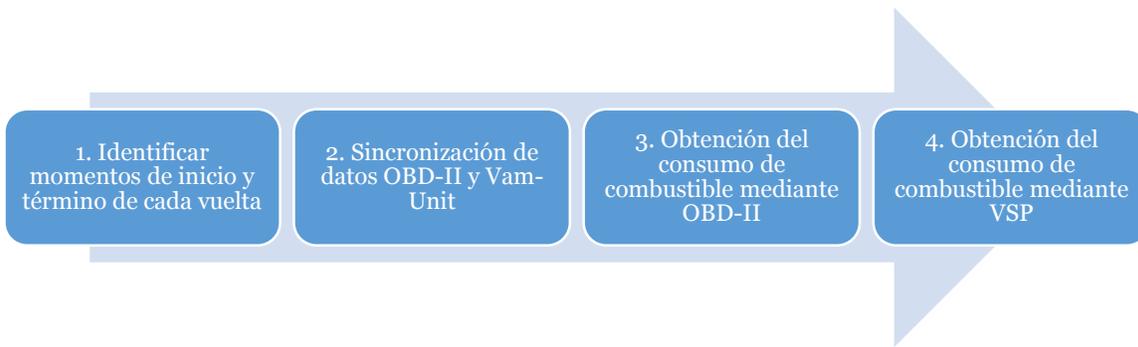


Figura 14. Etapas del procesamiento de datos para la obtención del consumo de combustible.

1. *Identificar momentos de inicio y término de cada vuelta*: lo primero que se debe hacer es identificar los momentos exactos del inicio y término de cada vuelta para los datos obtenidos con la Vam-Unit. Para esto se utilizan las coordenadas obtenidas, cuyo formato en grados decimales es compatible para ser visualizado con la herramienta web Google Maps.
2. *Sincronización de datos entre OBD-II y Vam-Unit*: dado que ambos instrumentos registran los tiempos con cierto desfase, es que los datos deben ser sincronizados, en particular el OBD-II se rige por el reloj del computador que obtiene los datos, y la Vam-Unit registra la hora del meridiano de Greenwich. Para realizar el ajuste se ve cuando coinciden las velocidades en al menos tres puntos, con lo que se calcula el desfase de tiempo. Luego para corroborar que el ajuste sea correcto se grafican las velocidades obtenidas con los dos instrumento y se verifica que ambos gráficos coincidan, en caso de no suceder esto se vuelve a calcular el desfase nuevamente. Con los datos sincronizados se pueden identificar los momentos de inicio y término de cada vuelta para los datos del OBD-II.
3. *Obtención del consumo de combustible mediante OBD-II*: una vez que se tienen los momentos de inicio y término de cada vuelta para los datos del OBD-II, se calculan los litros consumidos en cada intervalo de tiempo con la ecuación (15) (cada fila se representa con el índice i), y luego se agrupan los litros consumidos en cada segundo con la herramienta tabla dinámica de cualquier hoja de cálculo, procedimiento representado con la ecuación (16), en donde cada segundo j tiene alrededor de 2 o 3 datos de consumo. En caso de no haber datos en todos los segundos de la medición, los valores de consumo deben ser interpolados para dichos segundos, de esta manera se tendrá el consumo en [lt/s] para todos los segundos de las pruebas.

$$\Delta Consumo_i [lt] = Flujo_i \left[\frac{lt}{hr} \right] \times (t_i - t_{i-1}) [hr] \quad (15)$$

$$Consumo_j \left[\frac{lt}{s} \right] = \sum_i^n \Delta Consumo_i \quad (16)$$

Para calcular el consumo de una vuelta se suman los consumos de cada segundo de la vuelta respectiva.

4. *Estimación del consumo de combustible mediante VSP*: para la estimación del consumo mediante VSP se aplica la ecuación (9) para obtener el valor del VSP en [kW/Ton]. Para esto se utilizan los datos de velocidad [m/s] y altura [msnm] obtenidos con la Vam-Unit. La aceleración y la distancia recorrida en cada segundo se calcula a partir de la velocidad, utilizando las ecuaciones (17) y (18). Cabe destacar que como se tienen datos segundo a segundo, Δt es igual a 1 [s].

$$a_i \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{(v_i - v_{i-1}) \left[\frac{m}{s} \right]}{\Delta t [s]} \quad (17)$$

$$\Delta d_i [m] = v_i \left[\frac{m}{s} \right] \times \Delta t [s] \quad (18)$$

Una vez se tiene el valor del VSP, se calcula el valor del Stress, utilizando la ecuación (11). Luego con estos dos valores se asigna el bin correspondiente a cada segundo, utilizando la Tabla 4, y una vez se tienen los bins asignados se correlaciona cada bin con los factores de consumo en [lt/s] mostrados en la Figura 7.

Finalmente para el consumo de una vuelta se suman los valores de los factores de consumo correspondientes a esa vuelta, como se muestra en la ecuación (14).

Por otro lado, para obtener el consumo de combustible de una vuelta con los datos que entrega el monitor de cada vehículo se aplica la ecuación (19).

$$Consumo_i [lt] = Tasa\ de\ consumo_i \left[\frac{lt}{100km} \right] \times distancia\ vuelta_i [km] \times 10^{-2} \quad (19)$$

3.2.2 Obtención de nuevos factores de consumo

Con la información obtenida con el OBD-II y el VSP se pueden obtener nuevos factores de consumo para cada bin, para cada vehículo por separado. Esto permite obtener información más directa del consumo de combustible, ya que los factores de consumo utilizados son obtenidos a partir de factores de emisión de CO₂ calculados el año 2007.

Para obtener los nuevos factores de consumo se correlacionan los bins asignados en la etapa del cálculo del consumo de combustible con VSP al consumo instantáneo obtenido con OBD-II, y se calcula un promedio de los consumos que se asignaron a cada bin.

Una vez se tienen los nuevos factores de consumo se recalcula el consumo de combustible de cada vehículo, con el procedimiento descrito en la sección 3.2.1 d).

3.2.3 Comparación de consumos obtenidos por los distintos métodos utilizados

Para realizar este análisis se calcula la diferencia porcentual entre los consumos obtenidos en cada vuelta con OBD-II con los obtenidos con el resto de los métodos utilizados (ver ecuación (20)), y luego se calcula el promedio e intervalos de confianza para un nivel de confiabilidad del 95% para cada vehículo y periodo por separado. En el caso del vehículo 3, en el periodo Demostrativo de Ahorro se asume el consumo obtenido con el monitor del vehículo como el consumo de referencia, por no contarse con datos del OBD-II, y por ser los resultados obtenidos con estos medidores los más similares en el resto de los vehículos.

$$Diferencia \% vuelta_i = \frac{CC\ vuelta_i\ medidor_j - CC\ vuelta_i\ OBD - II}{CC\ vuelta_i\ OBD - II} \times 100 \quad (20)$$

Donde:

Diferencia % vuelta_i: Diferencia porcentual de la vuelta i

CC vuelta_imedidor_j: Consumo de combustible de la vuelta i, obtenido con el medidor j (Monitor, VSP (CO₂) o VSP (OBD-II))

CC vuelta i OBD - II: Consumo de combustible obtenido con OBD-II

3.2.4 Cuantificación de disminución del consumo de combustible debido a Conducción Eficiente

Para cuantificar la reducción del consumo de combustible gracias a la conducción eficiente se aplica formulario N°1 *Análisis Estadístico del Protocolo de Cuantificación de Reducción de Consumo Energético para el Transporte* de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (ver Anexo B.4), en donde se aplica un test-T para determinar la diferencia entre tasas de consumo de las vueltas de los periodos de Línea base y Demostrativo de Ahorro para luego cuantificar las reducción del consumo de combustible, y determinar si es que esta reducción es estadísticamente significativa. La ecuación utilizada en este formulario es la ecuación (1), que calcula el intervalo de confianza, dada una cierta probabilidad (90% es usado en este trabajo de título), de la diferencia de las de las tasas de consumo entre los periodos de Línea Base y

Demostrativo de Ahorro. Para determinar el impacto porcentual, se divide la reducción de la tasa de consumo por la tasa de consumo del periodo de Línea Base.

Un aspecto importante a señalar es que se realizan dos análisis, uno para cada vehículo por separado, y otro para los tres vehículos que tienen resultados para los 4 medidores utilizados (vehículos 1, 2 y 4), de manera de asegurar que los resultados sean comparables. Para lograr analizar el conjunto de estos tres vehículos lo que se realiza es agrupar sus consumos y kilómetros recorridos por vuelta, y con estos nuevos valores calcular las tasas de consumo respectivas a cada vuelta y a cada periodo. Importante mencionar que este segundo procedimiento es el indicado por el nuevo protocolo.

Ahora, para calcular el ahorro en litros de combustible de un vehículo en un año, se multiplica el impacto calculado en el segundo análisis (vehículos 1,2 y 4 agrupados) por el nivel de actividad anual de un vehículo particular, que en este trabajo de título se asume como 12.000 km. Lo anteriormente explicado corresponde a la ecuación (5).

4. Resultados y análisis

En este capítulo se muestran los resultados de este trabajo de título separados en los tres ejes principales definidos en la metodología general: cuantificación estandarizada y evaluación de la costo-efectividad de proyectos AChEE 2011-2013, evaluación de la costo-efectividad de la simulación CFD en la medición de impactos de mejoras aerodinámicas y evaluación de la costo-efectividad de la metodología VSP para la estimación del impacto de conducción eficiente.

4.1 Cuantificación estandarizada y evaluación de la costo-efectividad de proyectos AChEE 2011-2013

A continuación se muestran los resultados de la revisión de proyectos del Área de transporte de la AChEE, los resultados de la aplicación del protocolo estándar a estos proyectos, y finalmente la evaluación de la costo-efectividad de los medidores utilizados.

4.1.1 Revisión y caracterización de los proyectos AChEE en transporte

La revisión bibliográfica de los proyectos del periodo 2011-2013 del área de transporte de la AChEE se encuentra en el Anexo A. Esta revisión contiene el desglose de cada proyecto más una matriz resumen que contiene toda la información recabada.

En la Tabla 9 se encuentra una descripción de los proyectos revisados en la revisión bibliográfica, en conjunto con el identificador que se le asignó en este trabajo de título.

Tabla 9. Descripción de proyectos caracterizados.

N° de proyecto	ID	Nombre proyecto	Descripción	Año
1	TCo	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	Proyecto en donde se dio apoyo técnico para la elaboración e implementación de planes de Eficiencia Energética en 25 empresas del transporte de carga nacional. Cabe mencionar que en este estudio no se implementó ninguna MMEE.	2011
2	TP1	Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago	Proyecto que tuvo como fin la mejora de los estándares de gestión energética en empresas	2011

			del transporte de pasajeros. En esta ocasión se realizó un trabajo con la empresa Alsacia Express, que presta servicios a Transantiago, en donde se implementaron una serie de MMEE de forma experimental, las cuales fueron evaluadas paralelamente en distintos vehículos.	
3	CTC	Evaluación del Programa Cambia tu Camión	Proyecto que consistió en la evaluación del Programa Cambia tu Camión, en donde se reemplazaron 144 camiones con una antigüedad superior a 20 años a través de un incentivo económico para sus propietarios, enfocado a los microempresarios del sector transporte que estuvieron dispuestos a renovar su vehículo y en ese momento no contaban con financiamiento para adquirir camiones nuevos y más eficientes. La evaluación consistió en la comparación del consumo de combustible de 31 camiones antiguos, 31 camiones nuevos, y los mismos 31 camiones nuevos con sus choferes capacitados en conducción eficiente.	2011
4	TC1	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	Proyecto en donde se dio apoyo técnico en temas de EE a 15 empresas del rubro del transporte de carga. Del total de las empresas se logró medir en 4 de ellas el impacto de las MMEE implementadas.	2012
5	TP2	Servicio para Incentivar la Mejora de Estándares de Gestión Energética de Buses	Proyecto continuación del proyecto TP1, en donde prosiguió el trabajo en conjunto	2012

		en Santiago	con la empresa Alsacia Express. Se implementaron MMEE en dos depósitos completos, para los cuales se calculó la reducción del consumo en base a información registrada por la empresa.	
6	ICE1	Programa de incentivo la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente	Proyecto que consistió en el desarrollo de una página web (www.conduccioneficiente.cl) que incentiva la adopción voluntaria de técnicas de conducción eficiente mediante su difusión. Esta página está enfocada en los conductores particulares, los del transporte de carga y los del transporte de pasajeros, dando consejos acordes a cada uno de ellos. En la página existe la posibilidad de crear cuentas de usuario, donde cada uno puede registrar datos de consumo de combustible y kilometraje, para realizar un seguimiento del aprendizaje de las técnicas. Sin embargo esta información corresponde solo a la del periodo Demostrativo de Ahorro, pues se asume que la conducción eficiente se aplica desde el primer momento del registro de datos.	2012
7	TC2	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	Proyecto continuación de TC1, en donde se dio apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas del transporte de carga. En este proyecto se trabajó con 16 empresas, las que involucran en su conjunto	2013

			2.384 camiones. Del total de estas, en 5 se alcanzó a medir el efecto de las MMEE aplicadas en la reducción del consumo de combustible de sus flotas.	
8	TP3	Apoyo Técnico en la Elaboración e Implementación de Planes de Eficiencia Energética en Empresas de Transporte de Pasajeros	Siguiendo la línea de los proyectos TP1 y TP2, en este se busca mejorar los estándares de gestión energética en empresas del rubro transporte de pasajeros. En esta tercera etapa se trabaja con las empresas Tur Bus, Trolebuses de Valparaíso y Expreso Norte, sin embargo solo se mide el impacto de la aplicación de MMEE en la primera.	2013
9	ICE2	Servicio de Mantenimiento del Sitio Web de Adopción Voluntaria de las Técnicas de Conducción Eficiente www.conduccioneficiente.cl	Proyecto continuación de ICE1, en donde se continúa con la difusión de las técnicas de conducción eficiente mediante una página web (www.conduccioneficiente.cl), con la diferencia que en este proyecto se mide el impacto de la página en la reducción del consumo de combustible que ocupan sus usuarios mediante una prueba realizada en una pista con condiciones controladas (número de conductores, condiciones simuladas de tránsito urbano, kilómetros recorridos, número de ciclos, etc.)	2013
10	AP	Cofinanciamiento de Dispositivos Aerodinámicos para Vehículos de Transporte de Carga Caminero	Proyecto que consistió en el incentivo a la compra e instalación de dispositivos aerodinámicos para vehículos del transporte de carga caminero, mediante el cofinanciamiento por parte de	2013

			la AChEE de un porcentaje del valor de los dispositivos, sujeto al cumplimiento de las bases del programa. Del proyecto participaron diez empresas transportistas.	
11	IMT	Desarrollo de mecanismos económicos y regulatorios que incentiven mejoras tecnológicas en vehículos existentes	En este proyecto se diseña un sistema de certificación con cobertura nacional, que permite evaluar las distintas tecnologías disponibles en el mercado que aportan en la disminución del consumo de combustible en vehículos de transporte de carga por carretera. Si bien en este proyecto no se cuantifica la disminución de consumo de energía producto de la aplicación de alguna MMEE, aporta elementos a considerar en el diseño de la nueva metodología de M&V para el transporte.	2012

Como resultado de la revisión bibliográfica se identificaron los elementos comunes entre los proyectos y se realizó una caracterización de estos. Estos elementos son: tipo de transporte, tipo de alcance, MMEE utilizadas, medidor utilizado, y factores estáticos.

4.1.1.1 *Tipos de transporte*

Los proyectos revisados se pueden clasificar en tres grandes grupos, dependiendo del tipo de transporte en el cual se aplican las MMEE, los cuales son:

- Proyectos enfocados en el transporte de carga: Proyectos que dan apoyo en la implementación de planes de EE a empresas del transporte de carga terrestre. En estos proyectos se trabajó con más de 23 empresas y 144 beneficiarios particulares, los cuales involucran a más de 2.500 vehículos.
- Proyectos enfocados en el transporte particular: Proyectos que buscan reducir el consumo de combustible en el transporte particular, difundiendo las técnicas de Conducción Eficiente. En estos proyectos se implementó y mantuvo un sitio web, el cual cuenta con más de 6.000 visitantes únicos.

- Proyectos enfocados en el transporte de pasajeros: Proyectos que dan apoyo en la implementación de planes de EE a empresas del transporte de pasajeros, tanto en rutas interurbanas como urbanas. En estos proyectos se trabajó con 4 empresas, las que involucran a más de 3.000 vehículos.

4.1.1.2 *Tipo de alcance*

Además, se diferencia por el tipo de alcance de los proyectos, existiendo los que buscan una implementación a nivel de flota, denominados como proyectos masivos, y los que realizan pruebas en un número reducido de vehículos, más conocidos como proyectos piloto. En los primeros, los sistemas son flotas completas con un número elevado de vehículos, por lo tanto requieren una mayor logística y organización de parte de la empresa beneficiaria, mientras que en los segundos los sistemas consisten en la aplicación de medidas a escala reducida, para mostrar los posibles ahorros que se podrían generar a mayor escala. Los proyectos piloto se pueden llevar a cabo en un periodo corto de tiempo mediante la utilización de medidores cuya precisión sea alta, y dado que el número de vehículos es reducido los costos en medidores no se elevan en gran medida. Por otro lado, los proyectos masivos necesitan un mayor tiempo de recopilación de datos de consumo de combustible y kilómetros recorridos, pues al existir una gran cantidad de vehículos involucrados se necesitan medidores de menor costo, y por consiguiente menor precisión. Dentro de los proyectos revisados uno de ellos pertenece a la categoría de proyecto masivo (TP2), mientras que el resto son de carácter piloto.

4.1.1.3 *Identificación de MMEE utilizadas*

Dentro de los proyectos se utilizaron distintas MMEE abarcando los tres tipos (tecnológico, de gestión y educacional-cultural), como por ejemplo la instalación de dispositivos aerodinámicos en camiones, gestión de la presión del aire de neumáticos, conducción eficiente, entre otras. A continuación se presenta la lista completa de MMEE, según el tipo de transporte al cual fueron aplicadas:

Transporte de carga

- Conducción Eficiente: capacitación a los choferes en las técnicas de conducción eficiente.
- Dispositivos aerodinámicos: dispositivos que reducen el coeficiente de arrastre aerodinámico en camiones.
- Gestión de velocidad: control de la velocidad máxima de los vehículos.
- Recambio de vehículo: consiste en dar de baja un vehículo antiguo y de alto consumo e incorporar un vehículo más eficiente.

Transporte particular

- Conducción Eficiente: capacitación a los choferes en las técnicas de conducción eficiente.

Transporte de pasajeros

- Conducción Eficiente: capacitación a los conductores en las técnicas de conducción eficiente.
- Control electromecánico de la aceleración: elemento electromecánico que impide la aceleración total en función de la cantidad de pasajeros transportados.
- Control mecánico de la aceleración: dispositivo que impide al conductor pisar el pedal a fondo y por lo tanto mantiene la operación del motor en el rango de menor consumo.
- Gestión de la presión del aire en neumáticos: inspección periódica de la presión del aire en neumáticos.
- Gestión de ralentí: sistema automático de parada de motor, cada vez que el vehículo se encuentra detenido y sin acelerar por un periodo superior a 3 minutos.
- Monitoreo Explícito: dar conocimiento a los conductores que el consumo de su vehículo está siendo monitoreado electrónicamente.
- Optimización electrónica de caja de cambios: Actualización del software que controla la caja de cambios, que adapta su operación a la topografía donde opera el vehículo.
- Restricción RPM en neutro: limitación electrónica de las RPM a un máximo de 1.500 vueltas por minuto en marcha neutral.

4.1.1.4 Medidores utilizados

En las mediciones de los proyectos se utilizaron variados medidores para determinar el consumo de combustible, como por ejemplo datos de las empresas obtenidos de las cargas de combustible realizadas en las bombas de bencina, medidor denominado como surtidor de combustible, también se utilizó en un proyecto en particular la información de consumo que proveen algunos vehículos en su monitor, entre otros. Para entender en mayor detalle cada uno de ellos, se describen a continuación:

- Surtidor de combustible: esto corresponde a registrar los litros cargados en la bomba de bencina.
- Equipo de medición on-board: equipo que registra consumo de combustible y kilómetros recorridos, entre otras variables, desde el computador del vehículo.
- Equipo i1010 AC/DC CurrentClamp más datalogger: equipos que registran datos de voltaje y corriente, utilizados para determinar el gasto energético de vehículos eléctricos.
- Monitor vehicular: Datos de consumo mostrados en el tablero de los vehículos.

- **Flujómetro:** Equipo que mide el flujo de combustible que va hacia el motor del vehículo.

Además, para medir la cantidad de kilómetros recorridos se utilizaron los siguientes dos instrumentos:

- **Odómetro:** utilizado para registrar los kilómetros recorridos cada vez que se realiza una carga de combustible.
- **GPS:** utilizado para registrar los kilómetros recorridos en un viaje.

Por último, a continuación en la Tabla 10 se presentan los medidores utilizados según el tipo de transporte del proyecto en donde fueron utilizados:

Tabla 10. Medidores aplicados según tipo de transporte de proyectos en los que fueron aplicados

Tipo de transporte	Medidor utilizado
Transporte de carga	Flujómetro
	Surtidor de combustible
Transporte particular	Monitor del vehículo
Transporte de pasajeros	On board diagnostic
	Surtidor de combustible

Los medidores más utilizados en los distintos proyectos resultaron ser el surtidor de combustible en conjunto con el odómetro, siendo estos medidores los más económicos de utilizar por incurrir solo en gastos del registro y análisis de los datos.

4.1.1.5 Metodologías de análisis de datos

Al revisar los distintos proyectos se ratificó la necesidad de la existencia de un protocolo único para determinar los impactos de las MMEE, dado que se observaron distintas metodologías entre los proyectos, además de errores en los análisis estadísticos para llegar a resultados. A continuación se enumeran estas diferencias:

- Hay casos en que se determinan los impactos de cada vehículo por separado y luego calcula un promedio entre ellos (proyectos TP1, TP3, ICE2, 8 casos de AP, TC1 y TC2). Por otro lado, hay casos en que se determinó el impacto considerando al grupo de vehículos como si fuera uno solo (CTC, TP2, 2 casos de AP).
- Hay un proyecto en que el impacto equivalente es resultado de la ponderación del promedio del impacto por vehículo, por el porcentaje de vehículos con diferencias estadísticamente significativas (DES) y por el nivel de confiabilidad (TP1). En el resto de proyectos no se pondera por el porcentaje de vehículos con DES ni por el nivel de confiabilidad.

- En los proyectos en su mayoría se realizan análisis estadísticos con los datos de rendimientos [km/lt], y luego la variación de este es considerada como la variación del consumo, acción que es incorrecta algebraicamente dado que el consumo está en el denominador del rendimiento, por lo tanto sus variaciones no son directamente proporcionales. Esto es evidente cuando se tiene una variación del consumo a bajos consumos, ya que si consideramos los kilómetros fijos, el rendimiento cambia de manera mucho más alta. Es por esto que se recomienda utilizar la tasa de consumo (indicador inverso al rendimiento) para el análisis estadístico, debido a que una variación en esta si representa una variación directa del consumo por estar este en el numerador.
- Para calcular los intervalos de confianza hay proyectos que utilizan la distribución normal, siendo que el número de datos considerados para las repeticiones son menores que 30, por lo cual esta distribución no es la más adecuada (se recomienda para muestras superiores a 30).
- Hay un caso en que se calcula el impacto sin evaluar diferencias estadísticamente significativas entre los rendimientos de los periodos de Línea Base y Demostrativo de Ahorro.
- Por último, para los proyectos AP se tienen diferencias con respecto al resto debido a que en los proyectos originales se realiza un tratamiento previo a los datos, descartando aquellos más alejados del promedio.

4.1.1.6 Caracterización

A continuación se presenta la caracterización de los proyectos revisados de acuerdo a 4 elementos que permiten dar una idea de como se desarrollaron los diversos reportes de eficiencia energética. Por un lado se clasifica según tipo de transporte en el que se trabajó, por otro según el tipo de alcance, además se mencionan las MMEE aplicadas y los medidores utilizados en las mediciones de cada proyecto.

Tabla 11. Caracterización de proyectos del Área de Transporte de la AChEE

Proyecto	Tipo de transporte	Tipo de alcance	MMEE utilizada	Medidores utilizados
TCO	T. Carga	-	-	-
TP1	T. Personas	Piloto	Control electromecánico de la aceleración, Monitoreo Explícito, Conducción Eficiente, Corte Ralentí sobre 3 min, Optimización electrónica de cada de cambios, Control mecánico de aceleración, Restricción RPM	Equipo de medición On-board
CTC	T. Carga	Piloto	Recambio de vehículo, Conducción Eficiente	Flujómetro

TC1	T. Carga	Piloto	Dispositivos aerodinámicos, Control de presión de neumáticos, Gestión de ralenti, Control de velocidad, Conducción Eficiente	Surtidor de combustible, odómetro, gps
TP2	T. Personas	Masivo	Gestión de ralenti	Surtidor de combustible, odómetro
ICE1	T. Particular	-	Conducción Eficiente	Surtidor de combustible, odómetro
TC2	T. Carga	Piloto	Conducción Eficiente, Gestión de velocidad, Gestión de ralenti, Dispositivos aerodinámicos y Gestión de información	Surtidor de combustible, odómetro
TP3	T. Personas	Piloto	Control de presión de neumáticos	Surtidor de combustible, odómetro
ICE2	T. Particular	Piloto	Conducción Eficiente	Cuentas de consumo eléctrico, equipo i1010 AC/DC CurrentClamp y datalogger
AP	T. Carga	Piloto	Dispositivos aerodinámicos	Surtidor de combustible, odómetro
IMT	T. Carga	N/A ⁵	N/A	N/A

4.1.2 Aplicación del nuevo protocolo a los proyectos del área de transporte de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética en el periodo 2011 – 2013

Como actividad de este trabajo de título el protocolo diseñado por la AChEE para determinar la reducción del consumo energético en el transporte fue aplicado a sus proyectos del periodo 2011-2013, revisados en la sección anterior, que realmente aplicaron alguna MMEE en sus vehículos y que presentaron los elementos mínimos requeridos por el protocolo para poder aplicarse, como lo son mediciones de consumo en periodo de Línea Base y Demostrativo de Ahorro. Los proyectos que cumplieron esta condición fueron 8 de los 11 revisados, quedando fuera los proyectos TCo (por no aplicar MMEE), ICE1 (por no contar con periodo de Línea Base), y el proyecto IMT (por no aplicar ninguna MMEE); además.

⁵ N/A: no aplica.

Para realizar el análisis, en cada proyecto se definieron grupos de vehículos o *sistemas* a los cuales se les aplicó la misma MMEE, los cuales se trataron en conjunto para definir los impactos de las MMEE aplicadas a cada sistema, es decir la reducción de la tasa de consumo del periodo Demostrativo de Ahorro con respecto a la Línea Base, y los ahorros de combustible en litros por año de cada proyecto. Además, se calculan los ahorros de los proyectos según los impactos reportados en los proyectos originales (obtenidos de la revisión bibliográfica), aplicando los mismos supuestos que los que aplica el protocolo, de manera de poder comparar un antes y un después de esta nueva metodología para cuantificar reducción en el consumo energético. A continuación se muestran estos resultados.

4.1.2.1 Impactos obtenidos

Para obtener los impactos lo primero que se realiza es la recopilación de la información de consumos y kilómetros recorridos de cada sistema, información que es registrada en el formulario N° 8 del nuevo protocolo (ver Anexo B.3), y lo segundo es la aplicación de la sección de análisis estadístico del protocolo, descrita en el Anexo B.1, que consiste básicamente en la determinación de la variación entre las tasas de consumo del periodo Demostrativo de Ahorro con respecto a la Línea Base mediante la aplicación de un test estadístico T-Student (ver sección 2.3.3, ecuación (1)).

En la Tabla 12 se muestra el nombre con que cada sistema es identificado, donde las letras en mayúscula (ver Figura 15) corresponden a la línea de acción del proyecto (ver Tabla 12), el número contiguo a estas letras es la versión del proyecto, luego viene otro número tras un punto, el cual representa a la empresa y luego la letra minúscula que viene después de un guión representa la MMEE aplicada. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de identificador de un sistema.

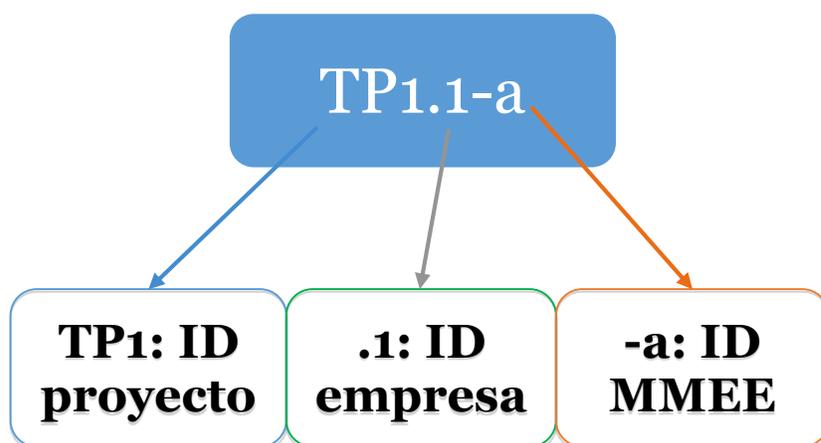


Figura 15. Nomenclatura de los sistemas

Tabla 12. Identificador de cada sistema

Identificador		Nombre de proyecto/empresa/MMEE	Año
TP1	TP1	Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago	2011
	TP1.1-a	MMEE: Control electromecánico de la aceleración	
	TP1.1-b	MMEE: Monitoreo explícito	
	TP1.1-c	MMEE: Conducción eficiente	
	TP1.1-d	MMEE: Gestión de ralentí	
	TP1.1-e	MMEE: Optimización electrónica de la caja de cambios	
	TP1.1-f	MMEE: Control mecánico de la aceleración	
	TP1.1-g	MMEE: Restricción de RPM	
TP2		Servicio para Incentivar la Mejora de Estándares de Gestión Energética de Buses en Santiago	2012
TP3	TP3	Apoyo Técnico en la Elaboración e Implementación de Planes de Eficiencia Energética en Empresas de Transporte de Pasajeros	2013
	TP3.1	Tur Bus	
ICE2		Servicio de Mantenimiento del Sitio Web de Adopción Voluntaria de las Técnicas de Conducción Eficiente www.conduccioneficiente.cl	2013
TC1	TC1	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2012
	TC1.1	Sotraser	
	TC1.2	Nazar	
	TC1.3	Transgesa	
	TC1.3-a	Conducción Eficiente	
	TC1.3-b	Aerodinámica	
	TC1.3-a	Límite de velocidad	
	TC1.4	Mercocargo	
TC2	TC2	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2013
	TC2.1	Transgesa	
	TC2.2	Transcomb	
	TC2.3	Travasa	
	TC2.4	Quilapilún	
	TC2.5	Interandinos	

CTC	CTC	Evaluación del Programa Cambia tu Camión	2011
	CTC.1-a	Renovación de vehículo	
	CTC.1-b	Renovación de vehículo + Conducción Eficiente	
AP	AP	Cofinanciamiento de Dispositivos Aerodinámicos para Vehículos de Transporte de Carga Caminero	2013
	AP.1	Transgesa	
	AP.2	Travasa	
	AP.3	Casablanca	
	AP.4	Jorquera Transportes S.A.	
	AP.5	Linsa	
	AP.6	Nazar	
	AP.7	Sotraser S.A	
	AP.8	TAN	
	AP.9	TNT-LitCargo	
	AP.10	TRAFYCO	

Como primer resultado se tienen los impactos de cada uno de los sistemas, los cuales se encuentran en la Tabla 31 del Anexo C.1. A partir de esto se determinan los casos con diferencias estadísticamente significativas, que resultaron ser 13 de 23 en el transporte de carga, 1 de 1 en el transporte particular y 2 de 9 en el transporte de pasajeros. En resumen, se tuvieron diferencias en 16 de 33 sistemas en total.

4.2.1.2.1. Impactos según MMEE

A partir de los impactos por sistema que sí tuvieron diferencias estadísticamente significativas se obtuvieron los impactos según MMEE, en donde el resultado es un promedio cuando la MMEE se repite dentro de un mismo tipo de transporte. Estos resultados se muestran en las Figura 16, Figura 17 y Figura 18.

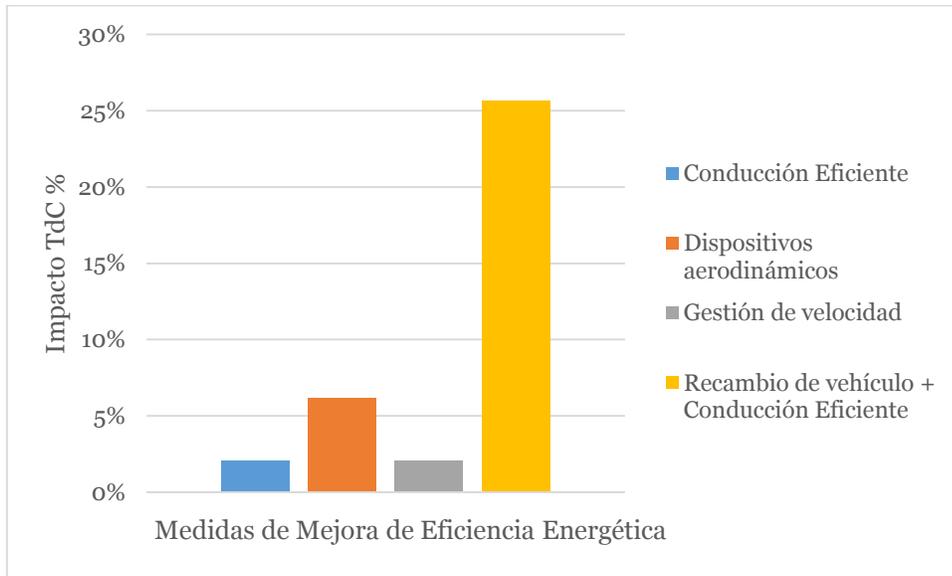


Figura 16. Impacto % de MMEE en el transporte de carga.

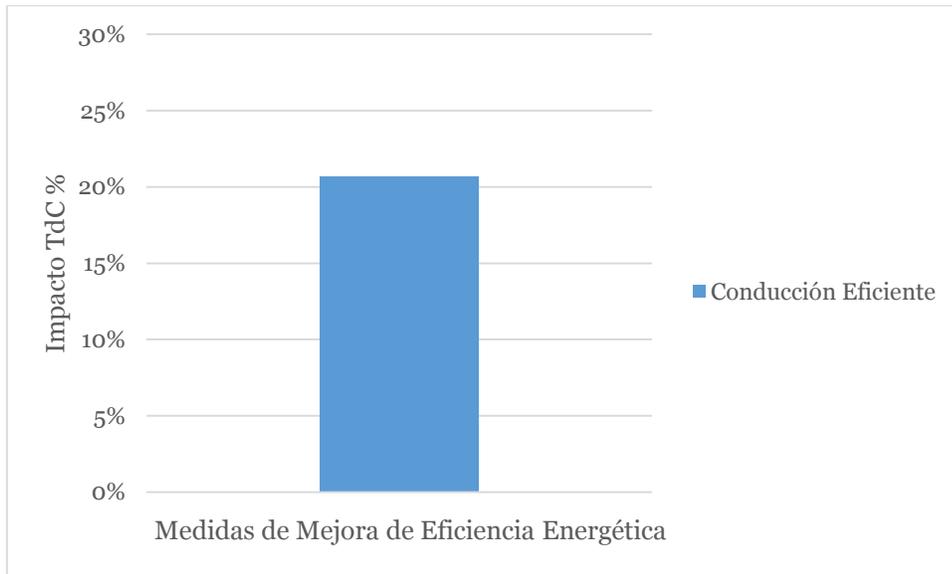


Figura 17. Impacto % de MMEE en el transporte particular

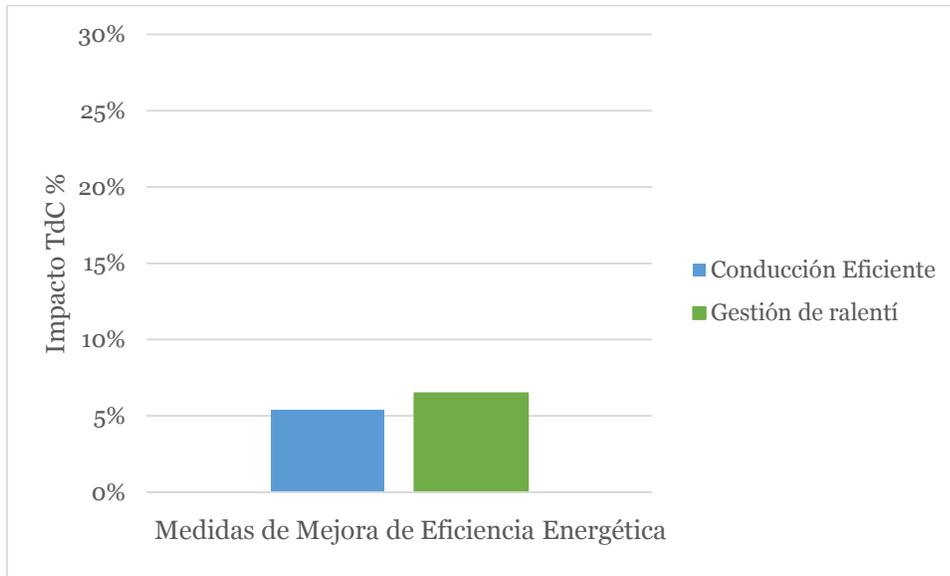


Figura 18. Impacto % de MMEE en el transporte de pasajeros

Las medidas control electromecánico de la aceleración, gestión de la presión del aire en neumáticos, monitoreo explícito, optimización electrónica de la caja de cambios y restricción de RPM en neutro no aparecen debido a que no obtuvieron diferencias estadísticamente significativas tras el análisis estadístico. Cabe señalar que esto se pudo deber a que el tipo de transporte en donde fueron aplicadas todas ellas (transporte de personas) requiere de mediciones que abarquen mayores periodos de tiempo que los utilizados (entre 3 y 4 semanas), cosa de minimizar los efectos de las variaciones de operación.

4.2.1.2.2 Precisión según medidor

Además de los impactos por MMEE, se obtuvo la precisión de los medidores según el tipo de transporte, resultado mostrado en las Figura 19, Figura 20 y Figura 21. En este caso se promediaron las precisiones según medidor y tipo de transporte, considerando tanto los sistemas con diferencias estadísticamente significativas como los que no.

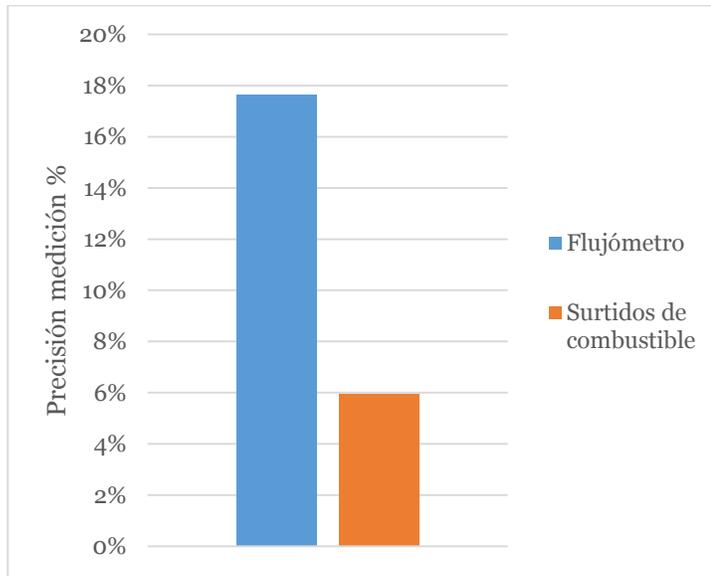


Figura 19. Precisión de las mediciones realizadas en el transporte de carga

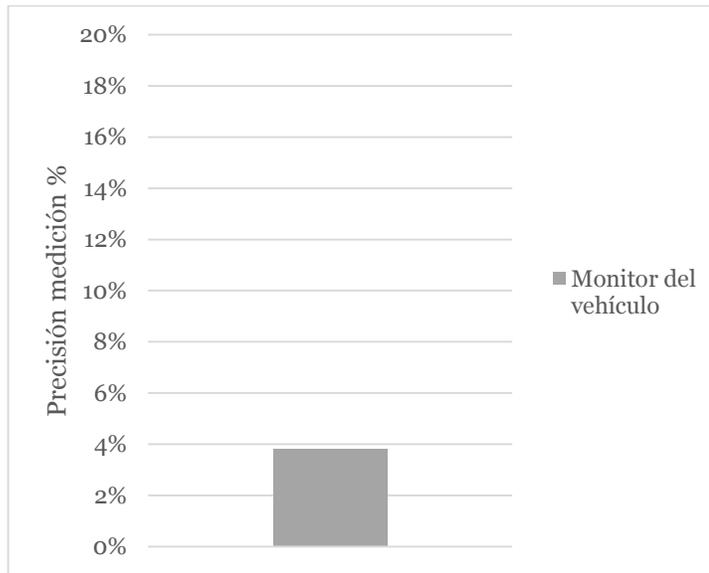


Figura 20 Precisión de las mediciones realizadas en el transporte particular

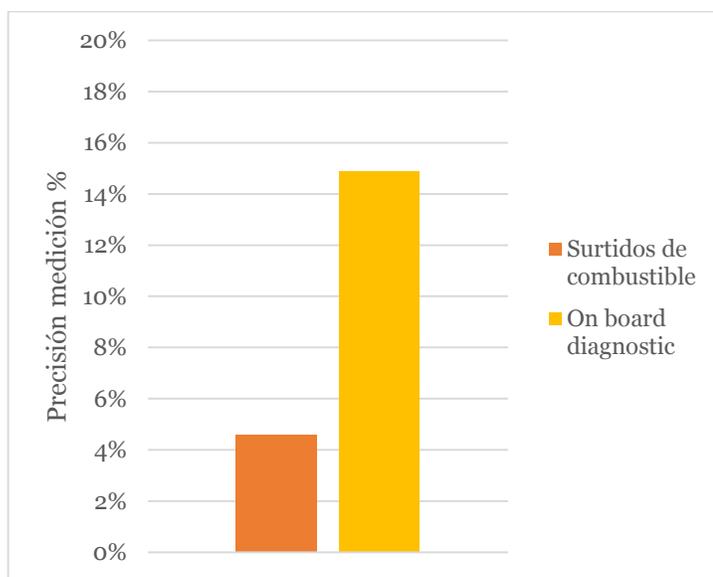


Figura 21. Precisión de las mediciones realizadas en el transporte de pasajeros

De manera de complementar la información con respecto a los medidores, en la Tabla 13 se muestra el número de sistemas que tuvieron diferencias estadísticamente significativas (DES) para los distintos medidores, separados según el tipo de transporte. Se observa que el monitor del vehículo resultó tener la mayor precisión dadas las condiciones de sus pruebas. Además, el surtidor de combustible tuvo buena precisión, sin embargo un 57,1% de sus mediciones logró obtener DES. Por otro lado el flujómetro con el On board diagnostic resultaron tener mala precisión, del orden del 16%, teniéndose DES solo para un 14%, mientras que el flujómetro tuvo un 50% de éxito, que sin embargo fue gracias a que la MMEE ocupada en estas mediciones tenía un alto impacto.

Tabla 13. Número de sistemas con diferencias estadísticamente significativas según medidor

Medidor	Con DES	Sin DES	% DES
Carga			
Flujómetro	1	1	50%
Surtidor de combustible	12	9	57,1%
Particular			
Monitor del vehículo	1	0	100%
Pasajeros			
On board diagnostic	1	6	14,3%
Surtidor de combustible	1	1	50%

4.1.2.2 Ahorros obtenidos

Una vez calculados los impactos por sistema se obtuvieron los ahorros anuales, tanto para lo reportado en los proyectos originalmente como para lo obtenido con el protocolo. La metodología utilizada es básicamente multiplicar los impacto por la tasa de consumo

de Línea Base y por los kilómetros que recorren anualmente los vehículos de la muestra y luego sumar los ahorros de los sistemas de un mismo proyecto. A continuación en la Tabla 14 se muestran dichos ahorros diferenciando entre los distintos tipo de transporte y también mostrando separadamente el proyecto masivo dado mayor volumen de ahorro en comparación con el resto.

Tabla 14. Ahorros por proyecto con y sin aplicación del protocolo.

Proyecto	Ahorro anual sin aplicación del protocolo [lt]	Ahorro anual con aplicación del protocolo [lt]
Proyectos piloto		
Transporte de carga		
AP	323.912	295.644
CTC	72.974	58.612
TC1	33.657	25.299
TC2	31.945	15.017
Transporte particular		
ICE2	2.780	2.712
Transporte de pasajeros		
TP1	31.446	20.408
TP2	1.300.152	1.333.959
Proyectos masivo		
Transporte de pasajeros		
TP3	34.010	0
Total	1.830.877	1.751.652

Se observa que tras la aplicación del protocolo hay 79.225 [lt/año] menos de ahorro en comparación con los proyectos originales. Para una mayor claridad de la presentación de los resultados de ahorros, en las Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25 estos se muestran graficados.

Proyectos piloto

Estos proyectos se clasifican como piloto dada la reducida cantidad de vehículos en las que fueron aplicadas. Corresponden a todos los proyectos revisados, salvo el proyecto TP2, que corresponde a un proyecto masivo, en donde se intervino la flota de dos patios completos de la empresa Alsacia.

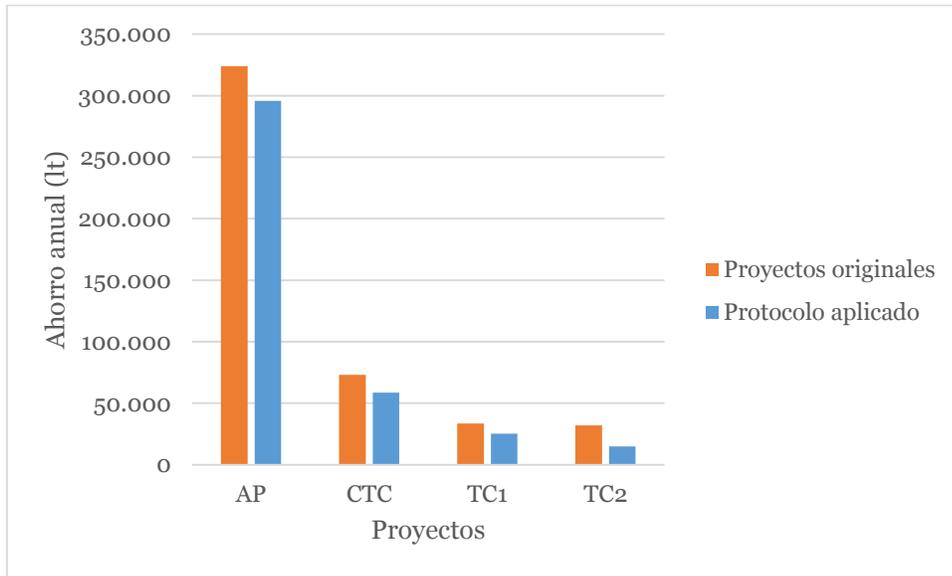


Figura 22. Comparación del ahorro anual de proyectos del transporte de carga entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.

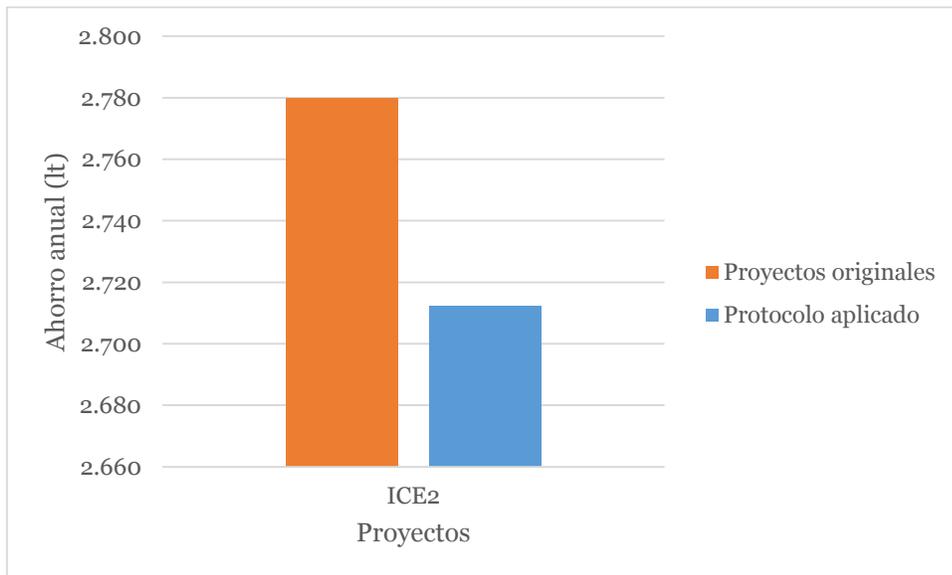


Figura 23. Comparación del ahorro anual de proyectos del transporte particular entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.

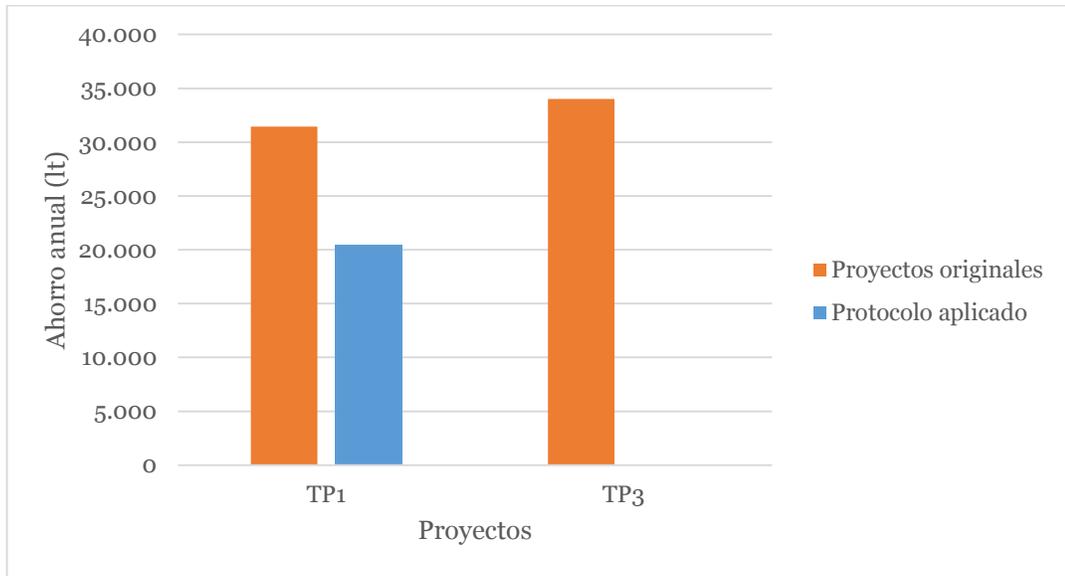


Figura 24. Comparación del ahorro anual de proyecto piloto del transporte de pasajeros entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.

Proyecto masivo

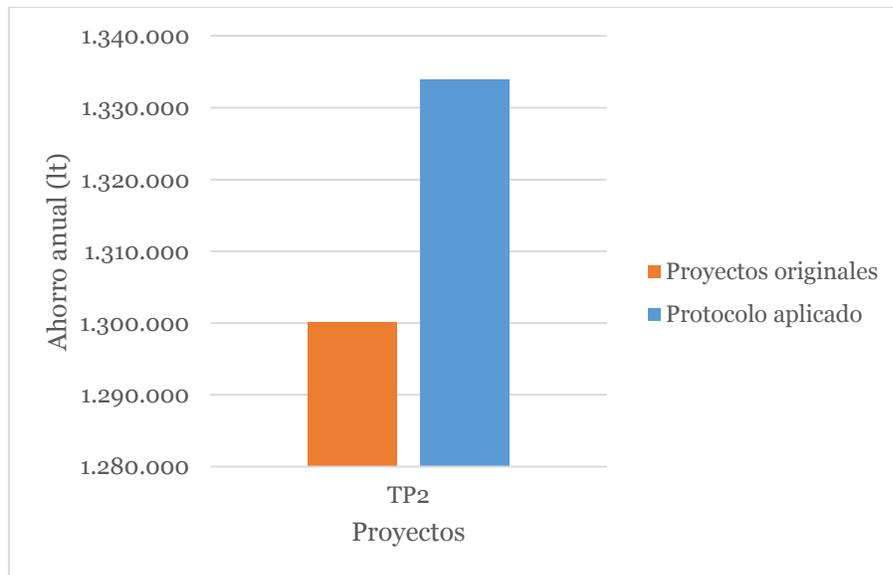


Figura 25. Comparación del ahorro anual de proyecto masivo del transporte de pasajeros entre resultados con y sin la aplicación del protocolo.

Como se puede observar, la aplicación del protocolo ha significado una disminución de los ahorros anuales en aproximadamente 80.000 lt, esto es debido a que el nuevo protocolo es más exigente gracias a la utilización del test T-Student, dejando varios sistemas fuera del cálculo de ahorros que antes si fueron considerados.

Por último,

4.1.2.3 Aprendizajes por proyecto

A continuación se presenta en la Tabla 15 los aprendizajes que se obtuvieron al aplicar el nuevo protocolo a proyectos de la AChEE del periodo 2011-2013. Por un lado se muestran las brechas detectadas, y por otro se explica cómo se encarga la Metodología de superar estas brechas.

Tabla 15. Tabla de aprendizajes al aplicar Metodología a proyectos AChEE 2011-2013.

Proyecto⁶	Brecha detectada	Cómo se encarga el protocolo
TP1	Se cuenta con resultados a una escala pequeña (semanas), lo cual dificulta la obtención de diferencias estadísticamente significativas.	El protocolo exige recoger niveles de actividad típicos para la toma de datos según el tipo de transporte al que se esté apuntando.
	En el análisis del proyecto original se descartan resultados de vehículos que no presentan diferencias estadísticamente significativas, perdiéndose esa información.	El protocolo considera en primer lugar un análisis general a nivel de flota, en donde se comparan todos los datos de LB con los de DA, y si no se encuentran DES, se pasa a un análisis a un nivel más específico. El resultado final incluye tanto a los grupos con DES como los sin DES, ponderando el promedio de los impactos de los grupos con DES por el número de estos sobre los casos totales.
TP2	Se tienen dos depósitos, con consumo semanal, en donde en el proyecto original no se considera un periodo de implementación de las medidas.	En el protocolo se excluye el período de implementación de los valores medidos debido a que se considera como un periodo de acondicionamiento y etapa de pruebas de la MMEE.
	Queda a criterio del consultor si se calcula el impacto de flotas por separado o en conjunto.	El criterio de desagregación establecido en el protocolo presenta una forma única de tratamiento de los datos aplicable a todos los proyectos, permitiendo que los resultados resulten comparables entre ellos. Así, para este proyecto en particular se agruparon los datos considerando una

⁶ Los indicadores de proyectos están descritos en la Tabla 9.

		única flota y analizándolos de manera mensual.
TP3	En el proyecto original sólo registran datos de rendimiento [km/lt], no se registra nivel de actividad ni consumos, lo que dificulta agrupar datos en distintos periodos de tiempo	El protocolo requiere que se tomen los datos de consumo de combustible y nivel de actividad, y sólo en el caso de no contar con estos, se calcula la tasa de consumo a partir del rendimiento.
	En el proyecto original se considera el porcentaje de incremento en rendimiento para calcular una meta en m ³ /año, realizando esta estimación de manera imprecisa.	En el protocolo se utiliza el indicador Tasa de Consumo, el cual sí representa el potencial de ahorro en litros (u otra unidad de energía equivalente).
ICE 2	En el proyecto original se considera el rendimiento [km/lt] de cada vehículo y se calcula el impacto individual, luego, estos impactos se promedian para determinar el ahorro del grupo.	El protocolo considera en primer lugar un análisis general a nivel de flota, en donde se comparan todos los datos de LB con los de DA, y si no se encuentran DES, se pasa a un análisis a un nivel más específico, que en este caso sería a nivel vehicular. El resultado final incluye tanto a los grupos con DES como los sin DES, ponderando el promedio de los impactos de los grupos con DES por el número de estos sobre los casos totales.
AP	Se considera el porcentaje de incremento en rendimiento para calcular los litros potenciales a ahorrar, estimándolos de manera imprecisa.	En el protocolo se utiliza el indicador Tasa de Consumo el cual sí representa el potencial de ahorro en litros (u otra unidad de energía equivalente).
	En proyecto original se consideran los resultados de vehículos sin diferencias estadísticamente significativas.	El protocolo exige la aplicación de un test T-Student para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de LB y DA, para poder determinar si hay disminución efectiva en el consumo de combustible desde un periodo a otro.
	Hay mediciones en que no se	El protocolo exige el registro de las

	registran las fechas de la toma de datos.	fechas correspondientes al momento de la toma de datos, para poder así agrupar mediciones cuando sea necesario.
CTC	Sólo se tiene un dato por vehículo, lo que en caso de no haber DES a nivel grupal no permite hacer un análisis estadístico por vehículo.	Para el análisis de vehículos individuales, la metodología propone un mínimo de repeticiones de la prueba. En este caso particular, el criterio de desagregación analiza la flota como conjunto, logrando diferencias estadísticamente significativas a este nivel. Sin embargo, para impactos menores esto podría no haberse logrado, poniendo en riesgo la evaluación del proyecto.
TC1	En proyecto original se consideran vehículos sin diferencias estadísticamente significativas.	En el protocolo se aplica un test T-Student para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de LB y DA, para poder determinar si hay disminución significativa efectiva en el consumo de combustible desde un periodo a otro.
TC2	En proyecto original se consideran vehículos sin diferencias estadísticamente significativas.	Se aplica un test T-Student para determinar si hay diferencias estadísticamente entre las muestras de LB y DA, para poder determinar si hay disminución efectiva en el consumo de combustible desde un periodo a otro.

4.1.3 Evaluación de la costo-efectividad de los proyectos analizados

Para evaluar la costo-efectividad de los proyectos analizados se utiliza una estimación obtenida de la revisión bibliográfica de los costos de cada uno de ellos, que considera el número de vehículos y número de empresas intervenidas. Esta, en conjunto con los ahorros obtenidos de la sección anterior, se utilizan para aplicar el criterio que entrega el IPMVP que dice que el costo del proceso de medida y verificación no puede sobrepasar el 10% de los ahorros anuales de cada proyecto.

En la Tabla 16 se encuentran los resultados que permiten determinar si cada proyecto es costo-eficiente o no. Cabe señalar que para calcular los ahorros monetarios por proyecto se utiliza el precio promedio del diésel (\$ 675/lt) y de la bencina 95 octanos (\$922/lt) para la comuna de Santiago al día 10 de octubre del 2014 [18].

Tabla 16. Resultados de la costo-efectividad de proyectos

Proyecto	Medidor	Ahorro anual (\$)	Ahorro destinado a M&V (\$)	Costo mediciones (\$)	Costo-eficiencia
Carga					
AP	Surtidor de combustible	\$ 199.559.529	\$ 19.955.953	\$ 10.000.000	Sí
CTC	Flujómetro	\$ 39.563.216	\$ 3.956.322	\$ 25.000.000	No
TC1	Surtidor de combustible	\$ 17.077.008	\$ 1.707.701	\$ 5.000.000	No
TC2	Surtidor de combustible	\$ 10.136.529	\$ 1.013.653	\$ 5.000.000	No
Particular					
ICE2	Monitor	\$ 2.500.543	\$ 250.054	\$ 3.000.000	No
Pasajeros					
TP1	On board diagnostic	\$ 13.775.532	\$ 1.377.553	\$ 10.000.000	No
TP2	Surtidor de combustible	\$ 900.422.380	\$ 90.042.238	\$ 5.000.000	Sí
TP3	Surtidor de combustible	\$ 0	\$ 0	\$ 1.000.000	No

Con estos resultados podemos ver que solo dos proyectos fueron costo-eficientes considerando el ahorro de los vehículos muestreados, destacando el caso del proyecto TP2, que tuvo un ahorro sobresaliente por ser un proyecto de tipo masivo y un costo relativamente bajo por utilizar surtidor de combustible. Sin embargo la situación puede cambiar si se considera que las MMEE se pueden aplicar a un número mayor de vehículos sin que estos sean muestreados. Para realizar este análisis se calcula el ahorro que se debería obtener para satisfacer la condición de costo-efectividad dados los costos actuales, que en conjunto con el ahorro anual promedio por vehículo se determina el número necesario de estos para alcanzar los ahorros requeridos. Estos resultados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Cantidad de vehículos necesarios para que los proyectos sean costo-efectivos

Proyecto	Costo-efectivo	Ahorro anual promedio por vehículo (\$)	Ahorro necesario ⁷	Cantidad de vehículos necesarios	Vehículos que lograron tener ahorros
Carga					
AP	Sí	\$ 2.071.137	\$ 100.000.000	49	82
CTC	No	\$ 1.276.233	\$ 250.000.000	196	31
TC1	No	\$ 2.435.584	\$ 50.000.000	21	14
TC2	No	\$ 1.134.965	\$ 50.000.000	45	7
Particular					
ICE2	No	\$ 208.379	\$ 30.000.000	144	12
Pasajeros					
TP1	No	\$ 2.755.106	\$ 100.000.000	37	5
TP2	Sí	\$ 1.501.034	\$ 50.000.000	34	600
TP3	No	\$ 0	\$ 10.000.000	-	-

Como se puede observar, para los dos proyectos que si son costo-efectivos, el número de vehículos necesarios es menor al que participaron de sus mediciones y que lograron tener ahorros. Para el resto de los casos la situación no es tan desfavorable, puesto que la cantidad de vehículos necesarios para implementar las MMEE para hacer costo-efectivas las pruebas no es muy superior a los vehículos con diferencias estadísticamente significativas (vehículos que lograron tener ahorros).

Analizando cada caso, para los proyectos TC1, TC2 y TP1 se tiene que la brecha de vehículos a implementar no es tan alta (en particular para TC1), esto gracias a que se lograron detectar sistemas con diferencias estadísticamente significativas, lo que sumado a que los vehículos del transporte de carga y pasajeros recorren una gran cantidad de kilómetros anuales, se traduce en grandes ahorros monetarios. Por esto se recomienda utilizar los tiempos y número de vehículos que sean necesarios para las mediciones para lograr detectar reducción en el consumo, además de procurar controlar lo más posible las variables que afectan el desarrollo de las pruebas.

Los casos más críticos son los de los proyectos CTC, ICE2 y TP3, sin embargo hay que considerar que en el proyecto CTC los 31 vehículos medidos son una muestra del total de 144 vehículos intervenidos, así que la brecha consta de 52 vehículos solamente. Para el caso de ICE2 el caso es más desfavorable, dado que es complejo replicar las condiciones que se lograron en este proyecto a los 144 vehículos requeridos, por lo cual se

⁷ Ahorro necesario para que el proyecto sea costo-efectivo, corresponde al 1000% de los costos de las mediciones de cada proyecto.

recomienda realizar pruebas en condiciones de tránsito reales (más económicas), compensando con un mayor número de repeticiones y tiempos de medición.

Por último, se observa que el proyecto TP3 dio los peores resultados, dado que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas tras la aplicación de su respectiva MMEE (control de la presión de neumáticos), esto pudo deberse a una mala gestión en la aplicación de la MMEE, o a que se necesitó una mayor precisión de las pruebas dado que el impacto fue muy bajo.

4.2 Evaluación de costo-efectividad de la simulación CFD en la medición de impactos de mejoras aerodinámicas

Para la evaluación técnico económica se realizó una revisión bibliográfica de publicaciones que estudian la variación del coeficiente de arrastre en camiones debido a la incorporación de mejoras aerodinámicas, esta revisión es presentada en el Anexo E.1. En ellos se aborda el trabajo con túneles de viento, test en ruta, y simulación CFD, con un mayor énfasis en este último. Además, en el Anexo E.2.1 se muestra una cotización de dos softwares CDF: ANSYS y COMSOL que sirve como insumo para el modelo de costos diseñado en este trabajo de título. A continuación se muestran los resultados del análisis.

4.2.1 Resultados de la revisión bibliográfica

A continuación en la Tabla 18 se presentan los principales elementos que caracterizan a los estudios revisados, entre ellos está el método de medición que utilizan, los dispositivos que evalúan, entre otros.

Tabla 18. Resumen de resultados

Estudio	Método de medición	Dispositivos	Impacto en Cd	Error con respecto a túnel de viento	Requerimientos de malla
1	Túnel de viento	Carenado superior, carenado superior + carenado frontal, carenado superior + faldones laterales cortos, carenado superior + faldones laterales largos, carenado superior + carenado frontal + faldones laterales cortos y carenado superior +	Entre 17% y 26%	-	-

		Carenado frontal + Faldones laterales largos			
2	CFD	Deflector trasero, carenado frontal, 3 tipos de tapa barro	Entre 0,2% y 15%	-	66 millones de elementos, principalmente tetraedros y prismas
3	CFD	Deflector delantero	15%	Entre 5% y 7%	1,5 millones de elementos triangulares
4	Modelo	Se calcula reducción en	10% significa 3,8% ⁸	-	-
5	Test en ruta	carenado superior + carenado frontal	Entre 12 y 15% ⁹	-	-

De la revisión de publicaciones internacionales se rescata que efectivamente se puede estimar reducción en el coeficiente de arrastre con análisis CFD gracias a la implementación de dispositivos aerodinámicos. En particular, en los estudios que utilizaron CFD se validó con resultados obtenidos en túneles de viento, obteniéndose bajas diferencias. En particular, en el cuarto estudio analizado (ver Anexo E.1.3) se tienen diferencias entre 5% y 7% para los resultados obtenidos con túnel de viento y CFD.

Por otra parte, de la revisión bibliográfica se obtuvo un modelo (estudio 4, ver Anexo E.1.4) que permite asociar la disminución en el coeficiente de arrastre a disminución en el consumo de combustible, para los resultados de este modelo se obtuvo que para un camión de 40 Ton con un ciclo de conducción de carretera, un 10% en la reducción del coeficiente de arrastre implica un 3,8% de reducción en consumo. Esta información se puede utilizar para comparar los resultados de los distintos estudios, como se muestra a continuación:

- En el estudio 3 (ver Anexo E.1.3) se simula el efecto de un carenado superior mediante CFD, obteniéndose como resultado una reducción del 15% en el coeficiente de arrastre.
- En el estudio 1 (ver Anexo E.1.1) se tiene una reducción de un 16% aproximadamente gracias al mismo artefacto, mediante un ensayo en túnel de viento.
- En el estudio 5 (ver Anexo E.1.5) se tiene una reducción en el consumo de combustible de un 11,96% gracias a la instalación de un carenado superior más uno frontal, en un test en ruta (Norma SAE J1321).

Si aplicamos lo obtenido del modelo del estudio 4, con la simulación CFD se obtiene un 5,7% de ahorro en combustible, mientras que con la prueba en túnel de viento se tiene

⁸ Impacto en el consumo de combustible.

⁹ Impacto en el consumo de combustible.

un 6,08% de ahorro en combustible. Esto nos muestra que con el ensayo en ruta NCh331 se mide un ahorro mayor que el estimado con CFD y túnel de viento.

Ahora si analizamos otro dispositivo tenemos:

- En el estudio 1 (ver Anexo E.1.1), con un túnel de viento se obtiene una reducción de un 18% aproximadamente debido al kit: carenado superior + carenado frontal + faldón lateral del remolque.
- En el estudio 5 (ver Anexo E.1.5), con un test en ruta se obtiene un ahorro de 13,64% con el mismo kit + faldón lateral del tracto.

Al aplicar el modelo ya mencionado, con el túnel de viento se obtiene un 6,84% en reducción del consumo de combustible. Resultado similar al encontrado anteriormente.

Cabe señalar que para realizar una mejor comparación, se debería aplicar el modelo del estudio 4 con el mismo peso del camión utilizado en el estudio 5, más el mismo ciclo de conducción. Lo importante de esta revisión bibliográfica es que muestra los procedimientos ocupados para obtener la reducción del coeficiente de arrastre con simulaciones CFD, más un método que permite transformar la dicha reducción en reducción del consumo de combustible.

4.2.2 Análisis de costos

A continuación se realiza una estimación de costos para realizar un análisis CFD que permita estudiar la incorporación de dispositivos aerodinámicos.

El modelo utilizado para obtener el costo de simular un dispositivo es el mostrado en la ecuación (26).

$$\text{Costo} \left[\frac{CLP}{\text{dispositivo}} \right] = HH \times t + \frac{L}{12} \times m \quad (21)$$

Donde:

- HH*: Costo de la hora hombre [\$/hr].
- t*: Horas estimadas de modelación.
- L*: Costo de la licencia del software.
- m*: Duración en meses del proyecto.

El costo obtenido se obtiene utilizando las siguientes condiciones:

- La HH tiene un costo de 1 UF (\$24.000 aproximado al 4 de agosto).
- La modelación de un dispositivo tarda un mes.
- Las horas estimadas de modelación son 200 hr.
- Se utiliza el costo del software COMSOL (el más barato, ver Anexo E.2.1). Este tiene un costo de \$11.514.240, con un valor del dólar de \$576.

Como resultado se tiene que el costo de realizar una simulación CFD para un dispositivo es de \$5.759.520, o aproximadamente \$5.800.000.

Este resultado se puede ver condicionado por tener que comprar un computador con las capacidades adecuadas, o por otro costo de licencia, puesto que la licencia de COMSOL es perpetua, el modelo puede ser mejorado resultando un costo menor de la simulación CFD. Un antecedente que avala esto es que en el estudio 2 se utiliza un super computador para realizar las pruebas en CFD, lo cual resulta inviable de replicar. Estas pruebas sin embargo requerían un detalle elevado, puesto que analizaron partes muy pequeñas del camión que afectan a la aerodinámica, como lo son distintos diseños de tapabarro. Por otro lado, en este estudio se realizaron numerosas simulaciones, las cuales sobrepasan los alcances que de pruebas que solo quieren obtener el coeficiente de arrastre. Además, comparando con el estudio 3, queda en evidencia la diferencia de requerimiento, dado que en el este se utilizaron 1,5 millones de elementos triangulares, mientras que en el estudio 2 (el de requerimientos elevados), se utilizaron 65 millones de elementos entre elementos tetraédricos y prismas.

Finalmente, aplicando el criterio del IPMVP que indica que los costos de la Medida y Verificación deben ser no mayores a un 10% de los ahorros anuales, y los resultados de la cuantificación estandarizada de proyectos del Área de Transporte de la AChEE, para lograr que el análisis CFD sea costo-efectivo se deben obtener ahorros equivalentes a \$58.000.000 aproximadamente, lo cual se puede lograr si se analizara un modelo de camión con un carenado superior, y luego este se aplicara a 25 camiones. Estos resultados se obtienen con lo señalado en la Tabla 19, información obtenida del sistema AP.3, más el resultado de la aplicación del modelo del estudio 4 a los resultados del estudio 3.

Tabla 19. Número de beneficiarios para cumplir condición de costo-efectividad del análisis CFD.

Dispositivo	Impacto en consumo según modelación CFD del estudio 3	Impacto según sistema AP.3	Costo mediciones con CFD	Ahorro por vehículo según sistema AP.3 (\$)	N° de beneficiarios requeridos
Carenado superior	5,7%	5,98%	\$5.800.000	\$ 2.390.640	25

4.3 Evaluación de la costo-efectividad de la metodología VSP para la estimación del impacto de conducción eficiente

A continuación se presentan los resultados respecto a la evaluación de la costo-efectividad de la metodología VSP como estimador del impacto de conducción eficiente,

en donde se realizaron pruebas experimentales para dicho fin que contaron con mediciones de diversos medidores de consumo, entre ellos el VSP.

4.3.1 Velocidades OBD-II y Vam-Unit

Para comprobar que los datos obtenidos con OBD-II y Vam-Unit están bien sincronizados, en el Anexo D.1 se muestran graficadas las velocidades obtenidas con ambos instrumentos. A modo de ejemplo en la Figura 26 se muestran las velocidades para el vehículo 1 en el periodo de Línea Base. Como se puede observar, los datos efectivamente están sincronizados, pues la curva obtenida con OBD-II concuerda con la obtenida con Vam-Unit.

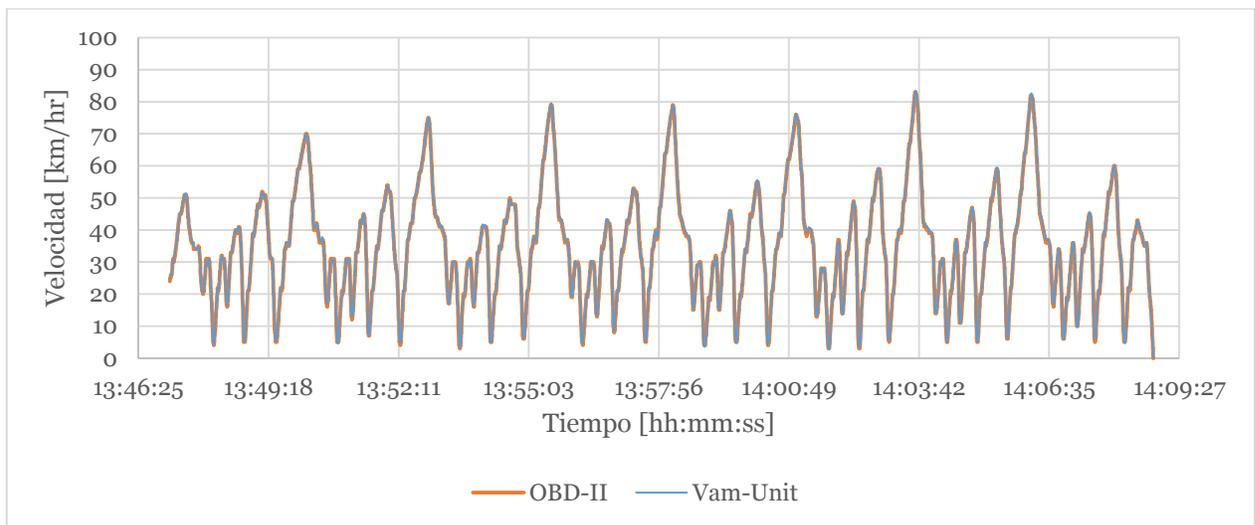


Figura 26. Velocidad vehículo 1, periodo de Línea Base

4.3.2 Histograma de bins

En la Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30 y Figura 31 se presentan los histogramas de bins de cada vehículo, en donde se muestra el porcentaje de tiempo de viaje en que se está en cada estado energético.

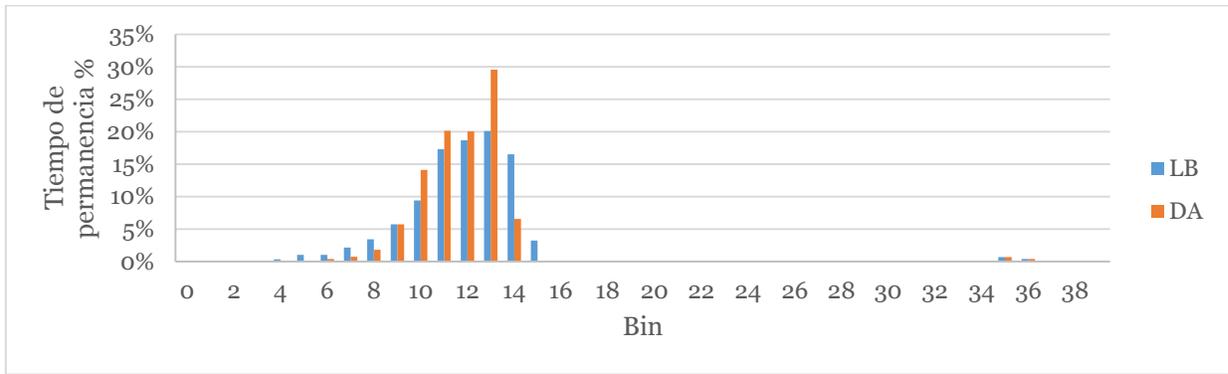


Figura 27. Histograma de bins del vehículo 1

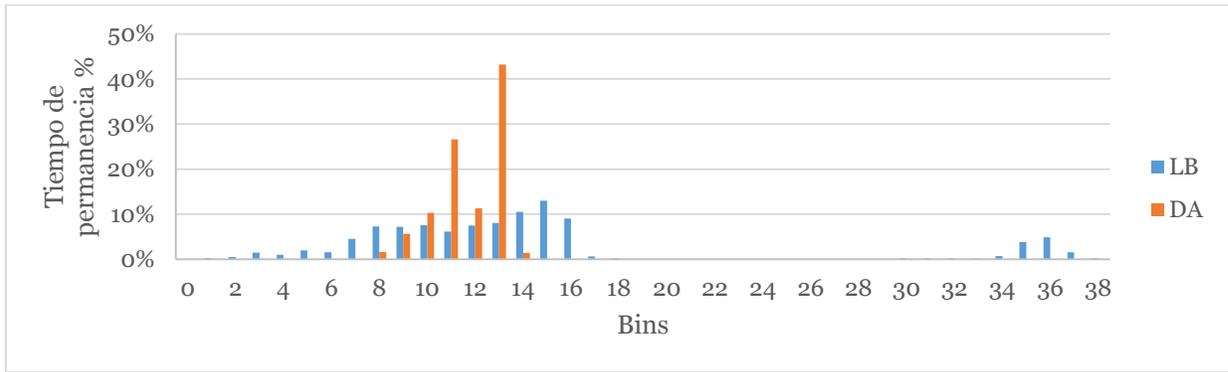


Figura 28. Histograma de bins del vehículo 2

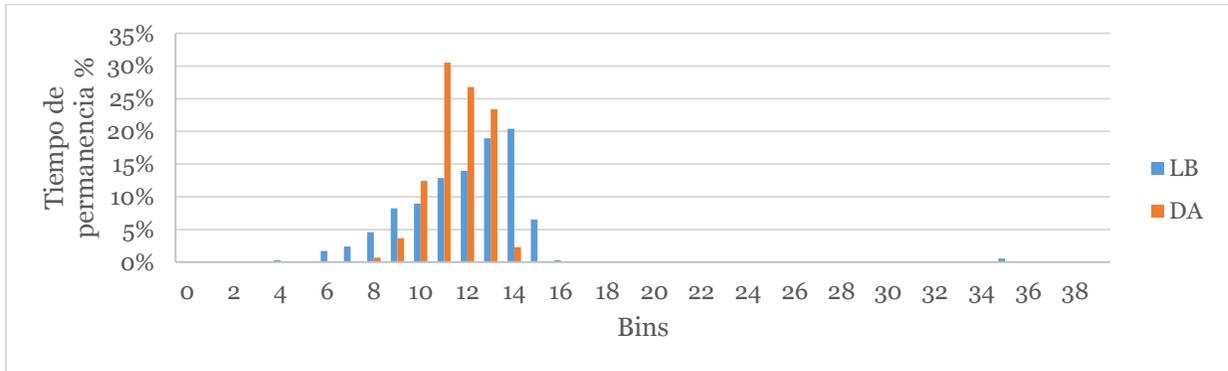


Figura 29. Histograma de bins del vehículo 3

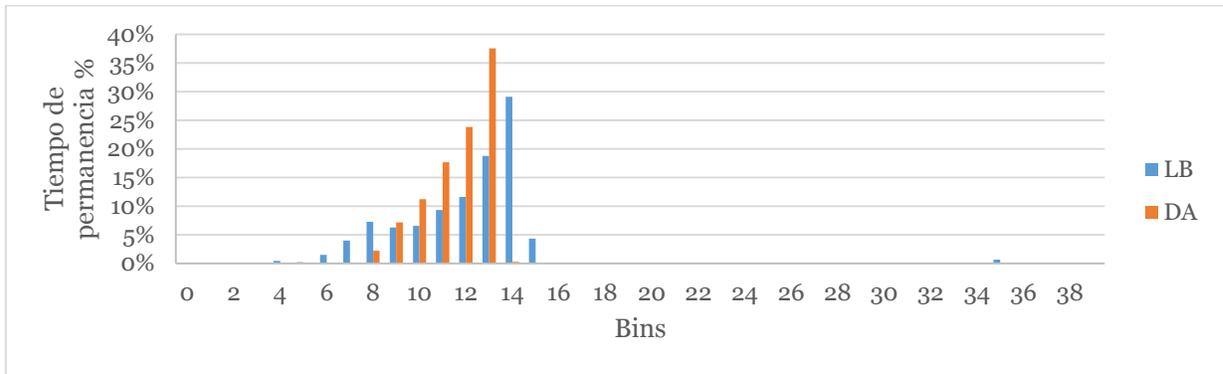


Figura 30. Histograma de bins del vehículo 4

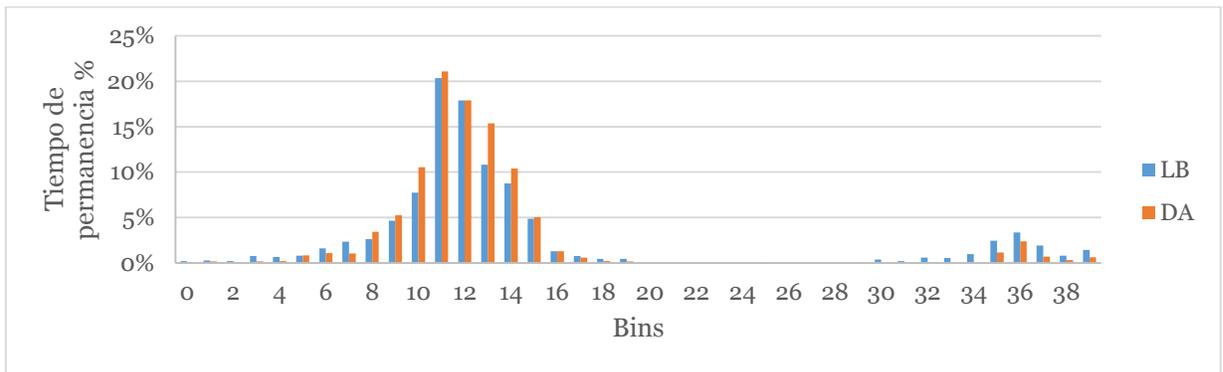


Figura 31. Histograma de bins del vehículo 5

Al observar los histogramas de bins obtenidos se observa claramente que en conducción eficiente el estado energético de los vehículos pasa a estar la mayor parte del tiempo entre el bin 11 y el 15. El único caso en que este fenómeno se aprecia en menor medida es el del vehículo 5, debido a que las pruebas fueron realizadas en una ruta real, en que las condiciones de tránsito condicionan los resultados.

4.3.3 Resultados de consumo de combustible

A continuación se muestran los resultados de la campaña experimental realizada tanto en pista como en ruta de los consumos de combustibles obtenidos con OBD-II, con el monitor del vehículo y con el método VSP (con factores de consumo a partir de literatura y calibrados con los resultados del OBD-II), además de los resultados de la cuantificación de la disminución del consumo de combustible debido a conducción eficiente.

En la Tabla 20 se muestran los resultados del consumo de combustible de los distintos vehículos para los periodos de Línea Base (LB) y Demostrativo de Ahorro (DA), para las distintas vueltas realizadas en los circuitos respectivos. Cabe señalar que el vehículo 3 no cuenta con datos de consumo obtenidos con OBD-II en el periodo Demostrativo de Ahorro, además, el vehículo 5 al no mostrar información del consumo en su monitor, no presenta resultados para dicho medidor.

Tabla 20. Resultados de campaña experimental

Vehículo	Vuelta	Periodo LB				
		Distancia [km]	Consumo [lt]			
			OBD-II	Monitor	VSP (Literatura)	VSP (Calibrado)
1	1	1,686	0,1417	0,159	0,1587	0,1418
	2	1,624	0,1371	0,133	0,1506	0,1353
	3	1,630	0,1367	0,130	0,1517	0,1364
	4	1,651	0,1379	0,132	0,1509	0,1359
	5	1,632	0,1388	0,131	0,1514	0,1356
	6	1,628	0,1481	0,130	0,1591	0,1473
	7	1,632	0,1485	0,134	0,1562	0,1447
	8	1,500	0,1225	0,123	0,1374	0,1224
2	1	1,662	0,1747	0,185	0,1554	0,1784
	2	1,614	0,1722	0,170	0,1453	0,1690
	3	1,636	0,1788	0,170	0,1492	0,1774
	4	1,626	0,1746	0,168	0,1474	0,1728
	5	1,616	0,1944	0,168	0,1547	0,1880
	6	1,629	0,1869	0,170	0,1596	0,1866
	7	1,645	0,1902	0,173	0,1718	0,2069
	8	1,496	0,1602	0,157	0,1325	0,1592
3	1	1,651	0,1445	0,140	0,1590	0,1400
	2	1,630	0,1392	0,134	0,1552	0,1403
	3	1,640	0,1397	0,132	0,1580	0,1409
	4	1,621	0,1336	0,128	0,1490	0,1337
	5	1,639	0,1321	0,128	0,1523	0,1335
	6	1,609	0,1257	0,124	0,1522	0,1283
	7	1,626	0,1321	0,124	0,1518	0,1351
	8	1,497	0,1071	0,113	0,1366	0,1099
4	1	1,675	0,1636	0,170	0,1519	0,1631
	2	1,635	0,1669	0,161	0,1518	0,1668
	3	1,623	0,1690	0,155	0,1486	0,1605
	4	1,627	0,1522	0,153	0,1443	0,1524
	5	1,640	0,1478	0,150	0,1415	0,1498
	6	1,626	0,1472	0,147	0,1445	0,1496
	7	1,626	0,1330	0,145	0,1471	0,1543
	8	1,516	0,1330	0,133	0,1366	0,1414
5	1	6,038	0,4806	0,159	0,4772	0,4470
	2	6,084	0,4696	0,133	0,4695	0,4385
	3	6,085	0,4857	0,130	0,4828	0,4489
	4	5,938	0,4452	0,132	0,4651	0,4313

Vehículo	Vuelta	Periodo DA				
		Distancia [km]	Consumo [lt]			
			OBD-II	Monitor	VSP (Literatura)	VSP (Calibrado)
1	1	1.664	0,1396	0,126	0,1609	0,1415
	2	1.641	0,1255	0,125	0,1457	0,1280
	3	1.615	0,1284	0,118	0,1465	0,1290

	4	1.637	0,1267	0,120	0,1457	0,1276
	5	1.629	0,1269	0,119	0,1478	0,1297
	6	1.622	0,1260	0,117	0,1462	0,1282
	7	1.622	0,1194	0,115	0,1427	0,1249
	8	1.478	0,1058	0,105	0,1314	0,1141
2	1	1,659	0,1290	0,126	0,1460	0,1420
	2	1,644	0,1237	0,121	0,1344	0,1303
	3	1,620	0,1180	0,109	0,1392	0,1349
	4	1,635	0,1203	0,111	0,1410	0,1371
	5	1,632	0,1134	0,109	0,1328	0,1290
	6	1,621	0,1169	0,107	0,1371	0,1337
	7	1,631	0,1155	0,107	0,1376	0,1325
	8	1,504	0,1085	0,096	0,1278	0,1231
3	1	1,593	-	0,113	0,1506	0,1302
	2	1,628	-	0,103	0,1517	0,1303
	3	1,626	-	0,100	0,1451	0,1262
	4	1,626	-	0,098	0,1428	0,1219
	5	1,627	-	0,097	0,1452	0,1223
	6	1,613	-	0,095	0,1482	0,1228
	7	1,632	-	0,094	0,1508	0,1238
	8	1,493	-	0,085	0,1469	0,1109
4	1	1,682	0,1317	0,152	0,1495	0,1414
	2	1,620	0,1200	0,121	0,1370	0,1325
	3	1,632	0,1205	0,119	0,1387	0,1315
	4	1,624	0,1160	0,116	0,1313	0,1249
	5	1,627	0,1199	0,116	0,1317	0,1263
	6	1,626	0,1219	0,115	0,1413	0,1361
	7	1,635	0,1204	0,115	0,1391	0,1322
	8	1,508	0,1099	0,106	0,1365	0,1338
5	1	5,907	0,4028	-	0,5070	0,4730
	2	5,999	0,3933	-	0,4337	0,3968
	3	5,979	0,3784	-	0,4334	0,3988
	4	5,854	0,3845	-	0,4460	0,4106

Además, estos resultados se presentan graficados en las siguientes figuras: Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40 y Figura 41.

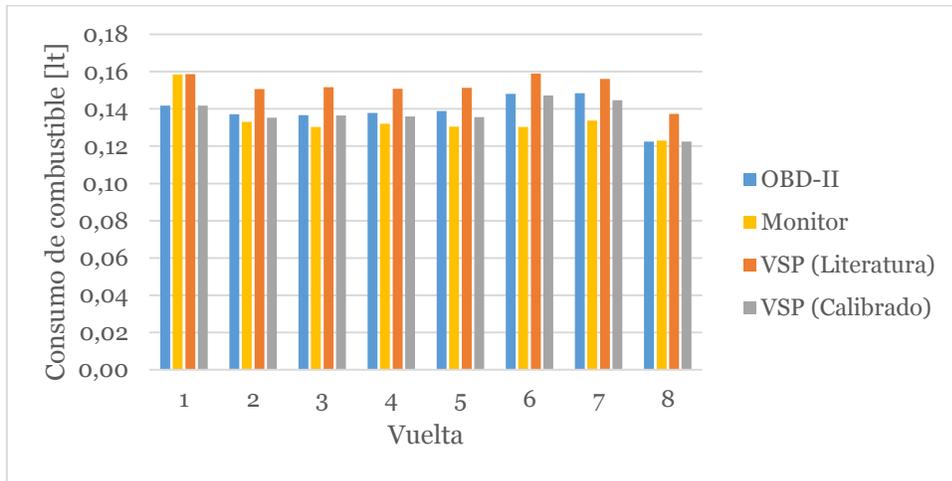


Figura 32. Consumo del vehículo 1 en el periodo de Línea Base

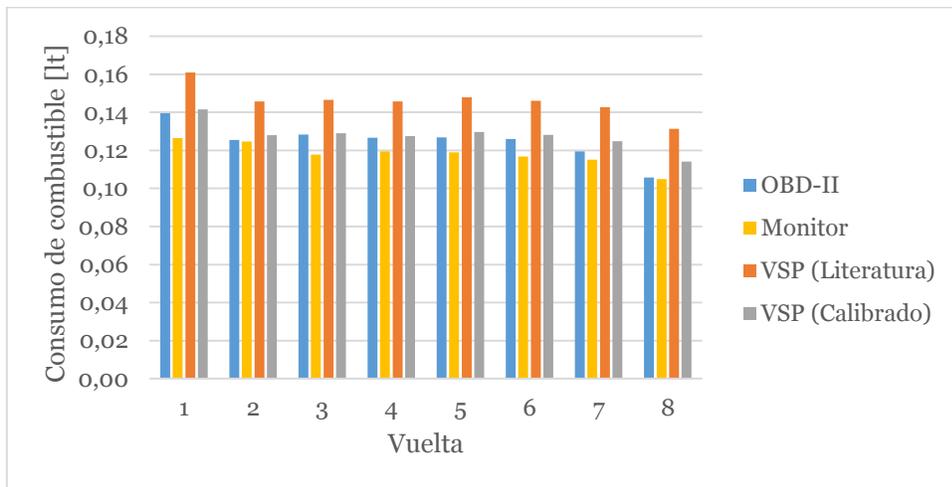


Figura 33. Consumo del vehículo 1 en el periodo Demostrativo de Ahorro

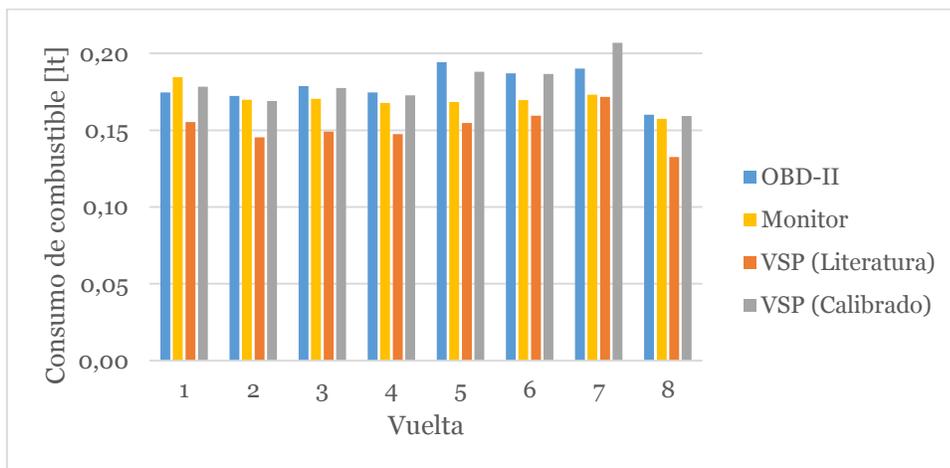


Figura 34. Consumo del vehículo 2 en el periodo de Línea Base

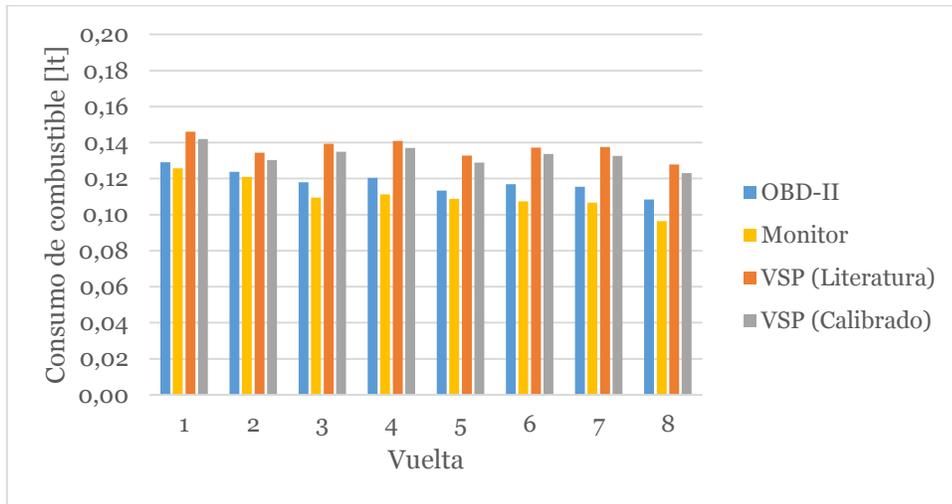


Figura 35. Consumo del vehículo 2 en el periodo Demostrativo de Ahorro

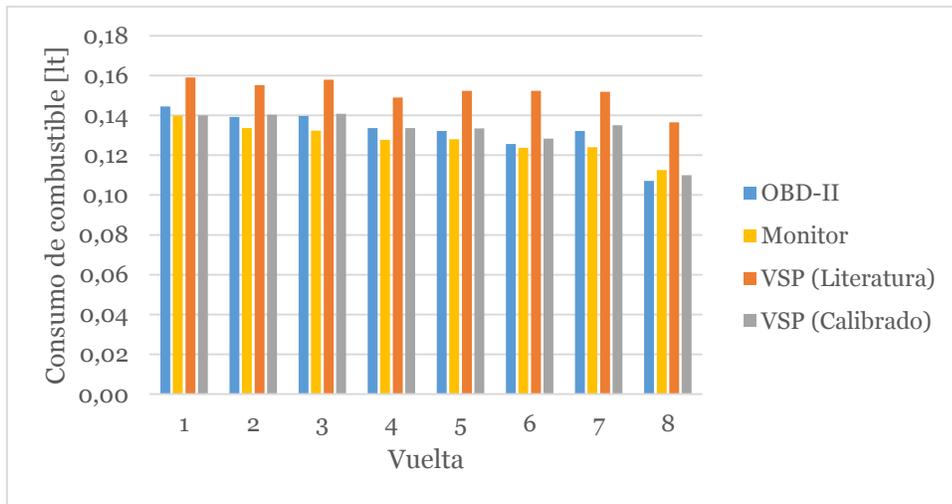


Figura 36. Consumo del vehículo 3 en el periodo de Línea Base

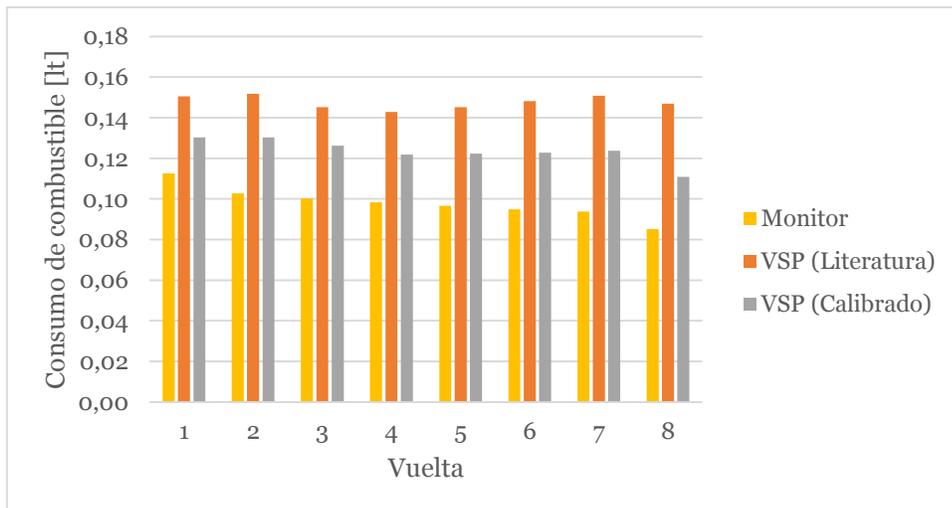


Figura 37. Consumo del vehículo 3 en el periodo Demostrativo de Ahorro

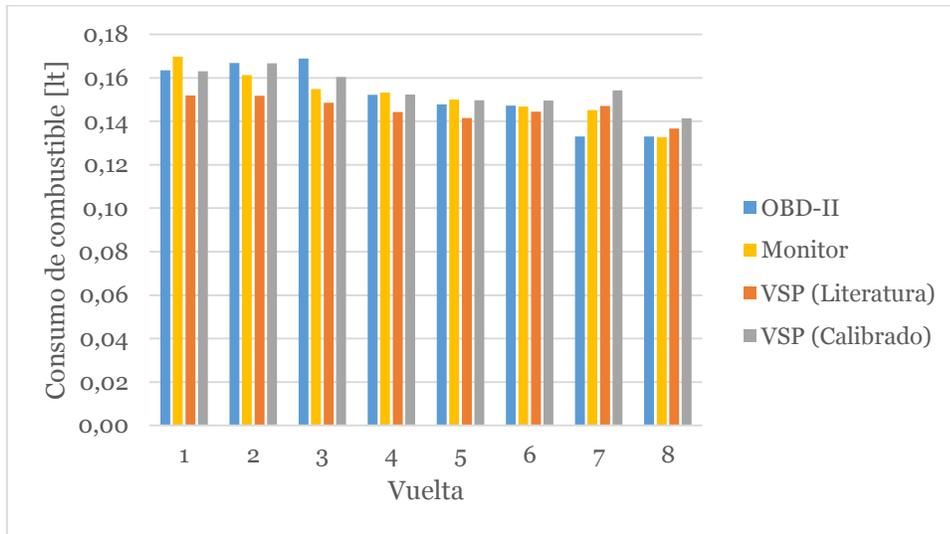


Figura 38. Consumo del vehículo 4 en el periodo de Línea Base

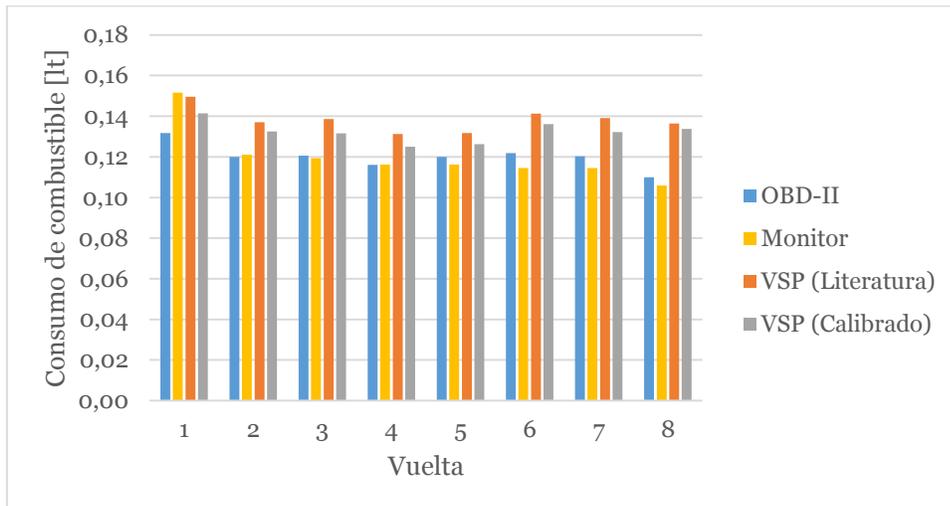


Figura 39. Consumo del vehículo 4 en el periodo Demostrativo de Ahorro

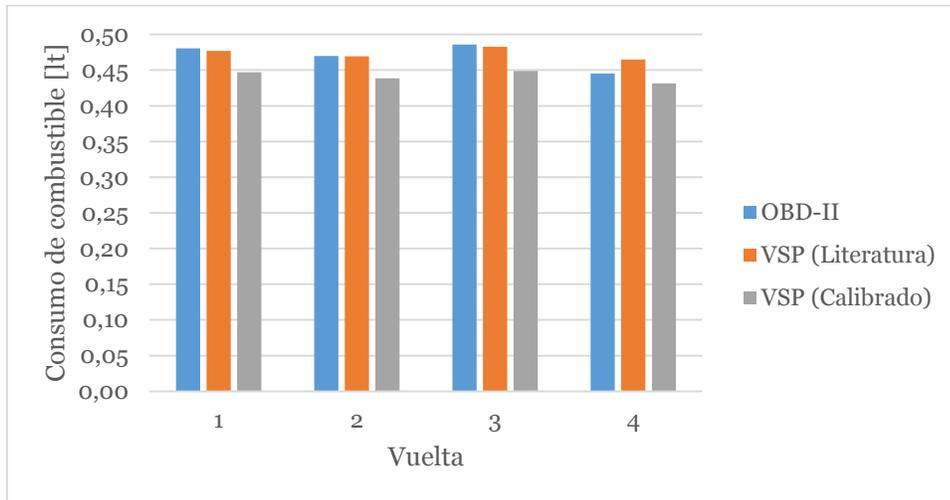


Figura 40. Consumo del vehículo 5 en el periodo de Línea Base

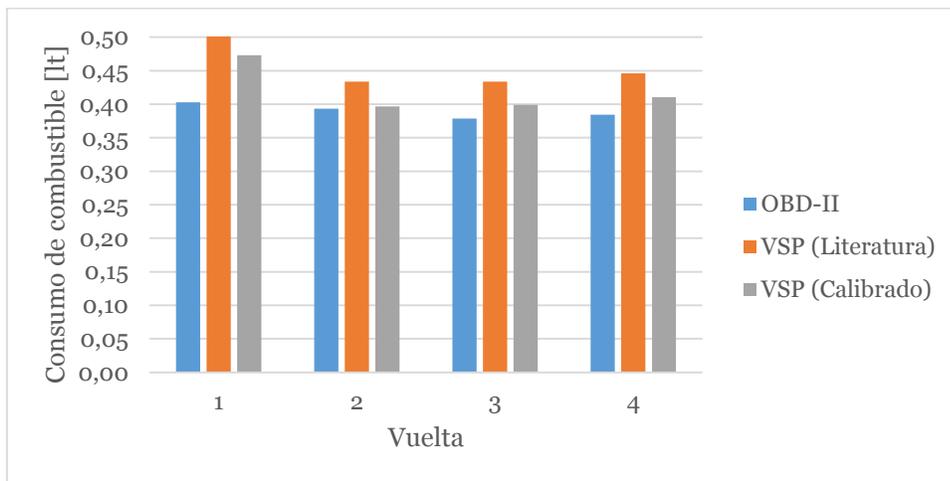


Figura 41. Consumo del vehículo 5 en el periodo Demostrativo de Ahorro

Además de los consumos de combustible obtenidos por vuelta en cada vehículo, en el Anexo D.2 se muestra el consumo instantáneo obtenido por los distintos métodos ya descritos. Además, en estos gráficos se muestra el valor del VSP instantáneo en [kW/Ton] obtenido. A modo de ejemplo, en la Figura 42 y en la Figura 43 se muestra el consumo instantáneo para la vuelta N°1 del periodo de Línea Base y el Demostrativo de Ahorro del vehículo 1.

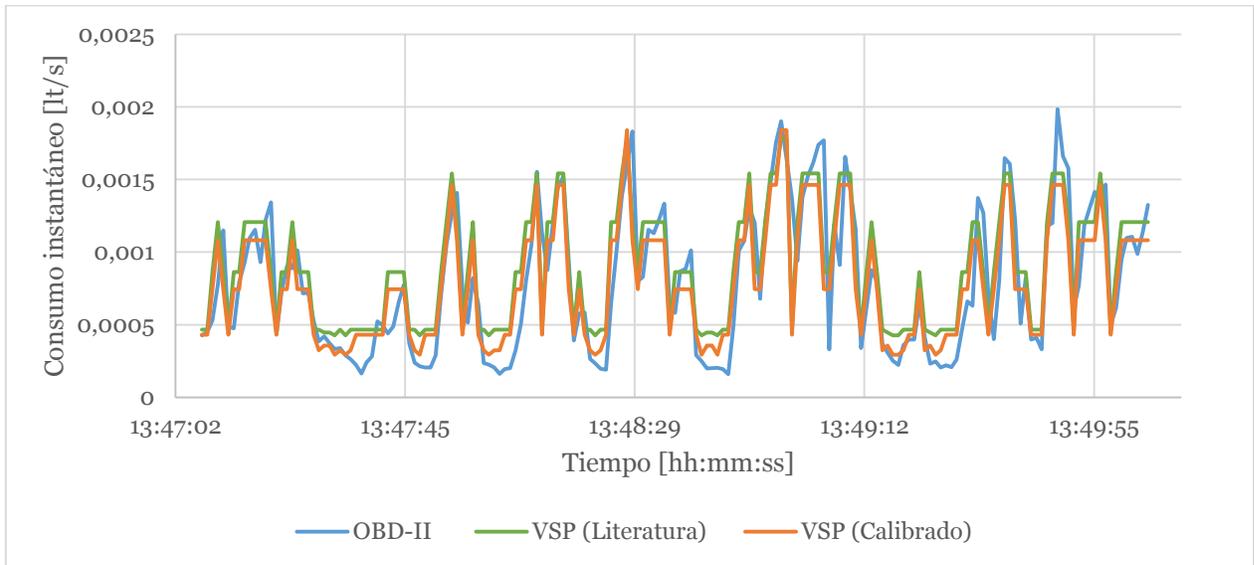


Figura 42. Vuelta 1 del periodo LB del vehículo 1

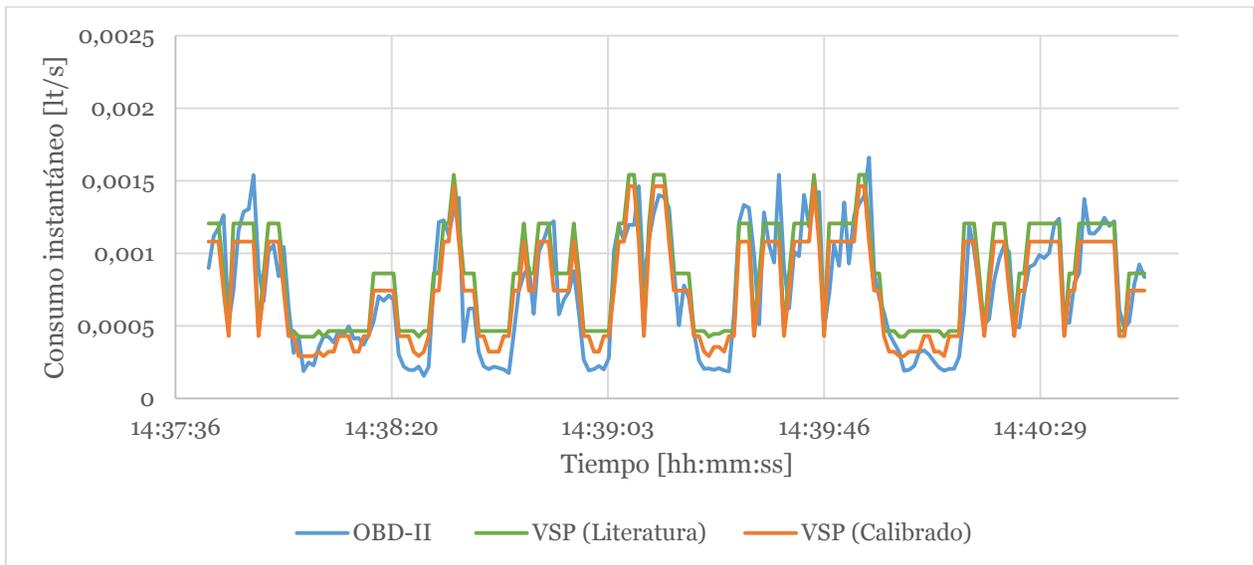


Figura 43. Vuelta 1 del periodo DA del vehículo 1

4.3.3.1 Comparación de consumos obtenidos por los distintos métodos utilizados

En esta sección se compara el consumo de combustible obtenido mediante OBD-II, con el obtenido mediante el monitor del vehículo y mediante VSP (tanto con factores de consumo obtenidos de la literatura como obtenidos con calibración con los resultados del OBD-II). En este caso el consumo obtenido mediante OBD-II es considerado como el consumo de referencia por obtener información de la fuente más directa disponible (computador a bordo del vehículo).

En la Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53 se muestran las diferencias porcentuales obtenidas para cada

vehículo y periodo. Se observa que las diferencias en el periodo de Línea Base son mucho menores a las del periodo Demostrativo de Ahorro, sin embargo hay que considerar que los consumos en este periodo son menores a los de la Línea Base. Además, es destacable que los consumos obtenidos con VSP (Calibrado) en la Línea Base son los más similares a los del OBD-II, seguidos muy de cerca por los consumos obtenidos con monitor, con diferencias menores al 5%, sin embargo, los resultados en el periodo Demostrativo de Ahorro muestran que el monitor obtiene mejores resultados que el VSP (Calibrado).

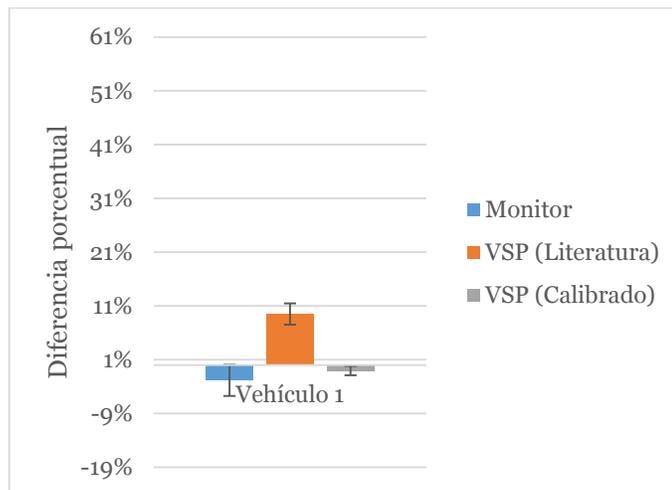


Figura 44. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 1 en su periodo de Línea Base

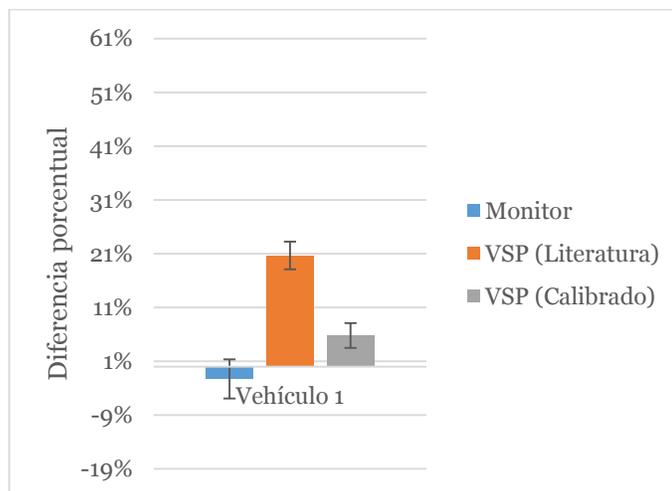


Figura 45. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 1 en su periodo Demostrativo de Ahorro

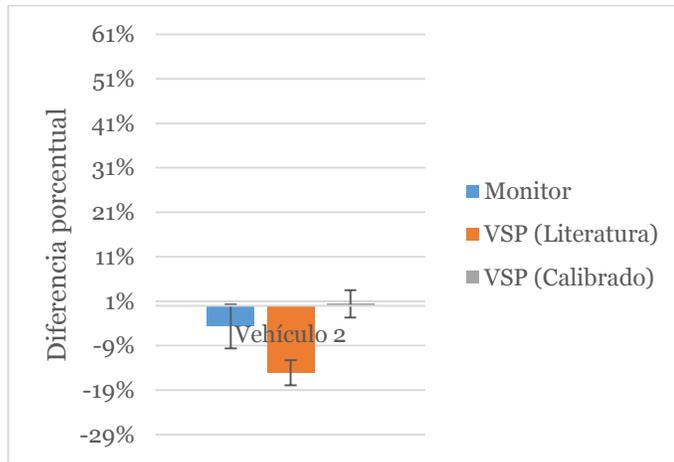


Figura 46. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 2 en su periodo de Línea Base.

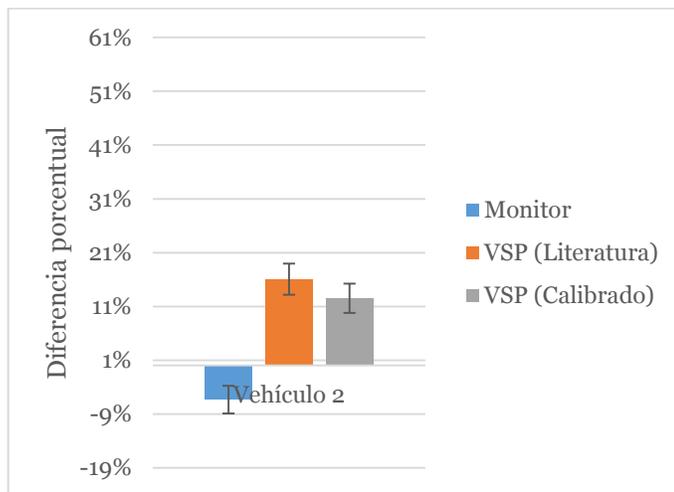


Figura 47. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 2 en su periodo Demostrativo de Ahorro

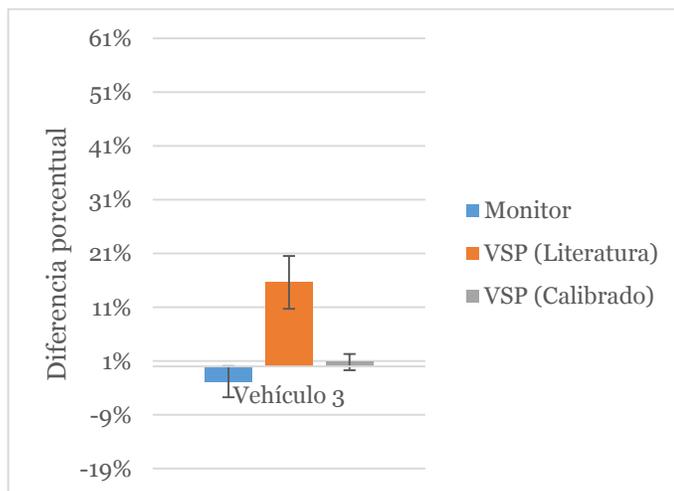


Figura 48. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 3 en su periodo de Línea Base

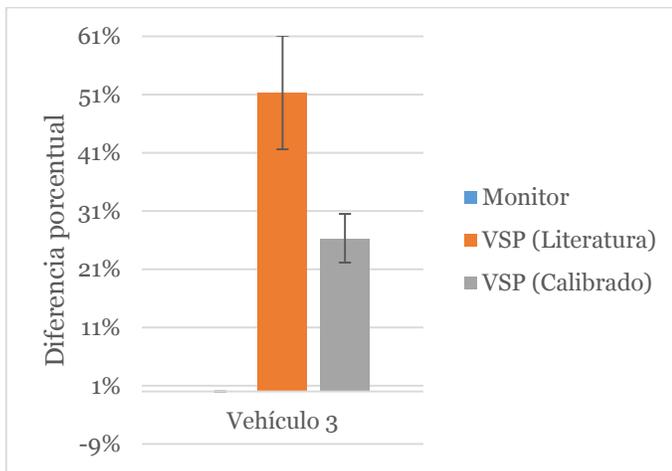


Figura 49. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 3 en su periodo Demostrativo de Ahorro

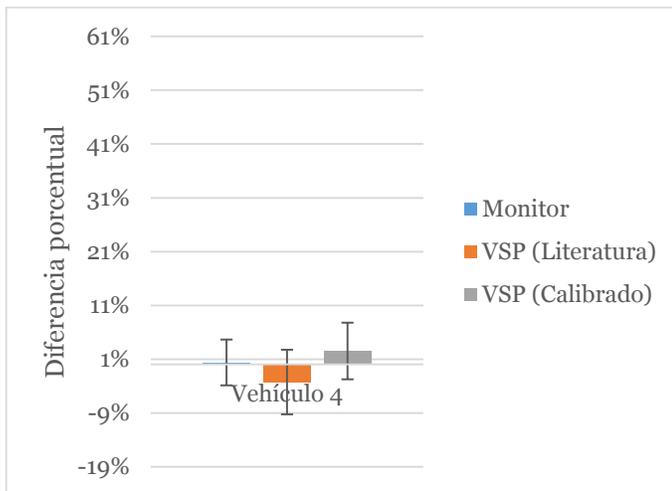


Figura 50. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 4 en su periodo de Línea Base

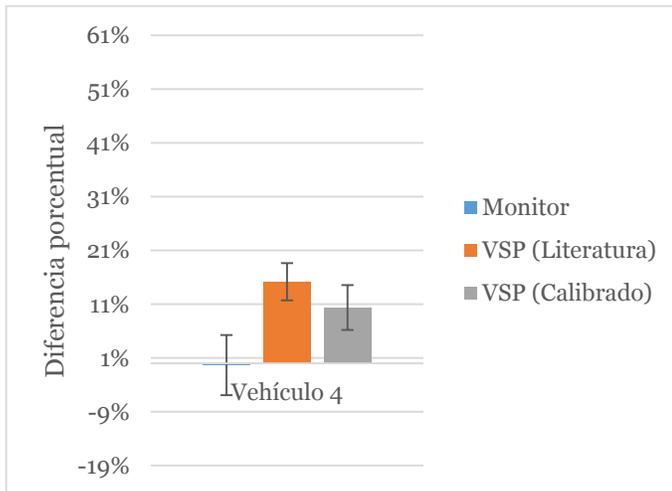


Figura 51. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 4 en su periodo Demostrativo de Ahorro

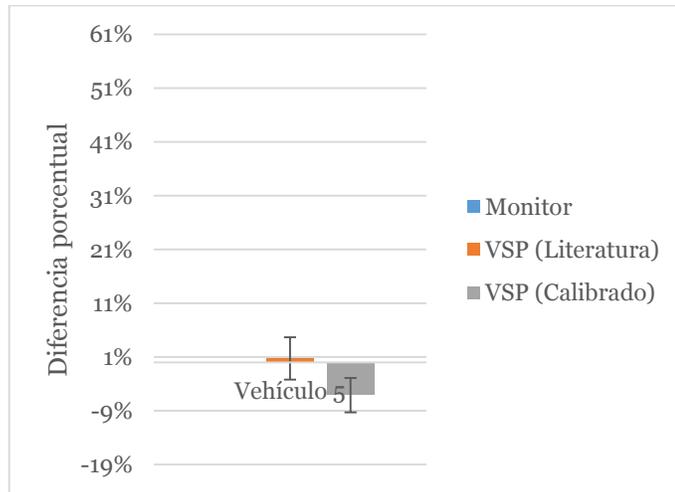


Figura 52. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 5 en su periodo de Línea Base

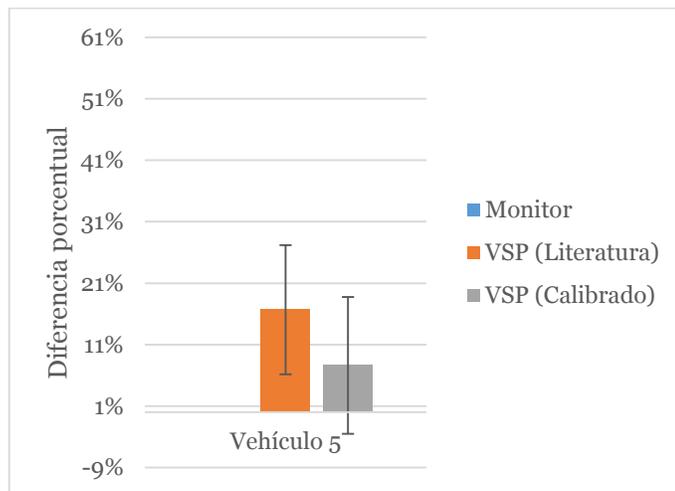


Figura 53. Diferencia porcentual promedio entre consumo de vueltas obtenidos con los distintos medidores vs lo obtenido con OBD-II para el vehículo 5 en su periodo Demostrativo de Ahorro

Si observamos los resultados de las dos estimaciones con VSP, tenemos que la que utiliza los factores de consumo obtenidos de la literatura son más alejados que los factores de consumo calibrados con los datos del OBD-II, lo cual es lógico, puesto que estos factores se determinaron para cada vehículo en particular. Esto puede ser ratificado al observar los consumos instantáneos de las pruebas, mostrados en el Anexo D.2. Además, se observa que en los periodos de Línea Base el VSP (Calibrado) estima de buena manera los consumos obtenidos con el OBD-II, mientras que en los periodos Demostrativo de Ahorro la diferencia entre estos aumenta, dejando a entrever que el proceso de asignación de bins pierde resolución, entregando consumos mayores al real.

4.3.4 Nuevos factores de consumo a partir de calibración de bins con el consumo de combustible obtenido con OBD-II

Una vez se obtiene el consumo de combustible y los bins segundo a segundo con el OBD-II y la metodología VSP respectivamente, gracias a la asociación entre ellos se obtienen nuevos factores de consumo calculando el promedio del consumo en [lt/s] para cada bin. En la Figura 54 se muestran los nuevos factores de consumo de los distintos vehículos, mientras que en la Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58 y Figura 59 se muestran los factores de consumo para cada vehículo por separado, incluyendo la cantidad de datos que se tiene por bin y la dispersión de cada factor dado un nivel de confianza del 95%. Cabe señalar que los resultados de la estimación del consumo de combustible con los nuevos factores de consumo ya están incluidos en la sección 4.3.3

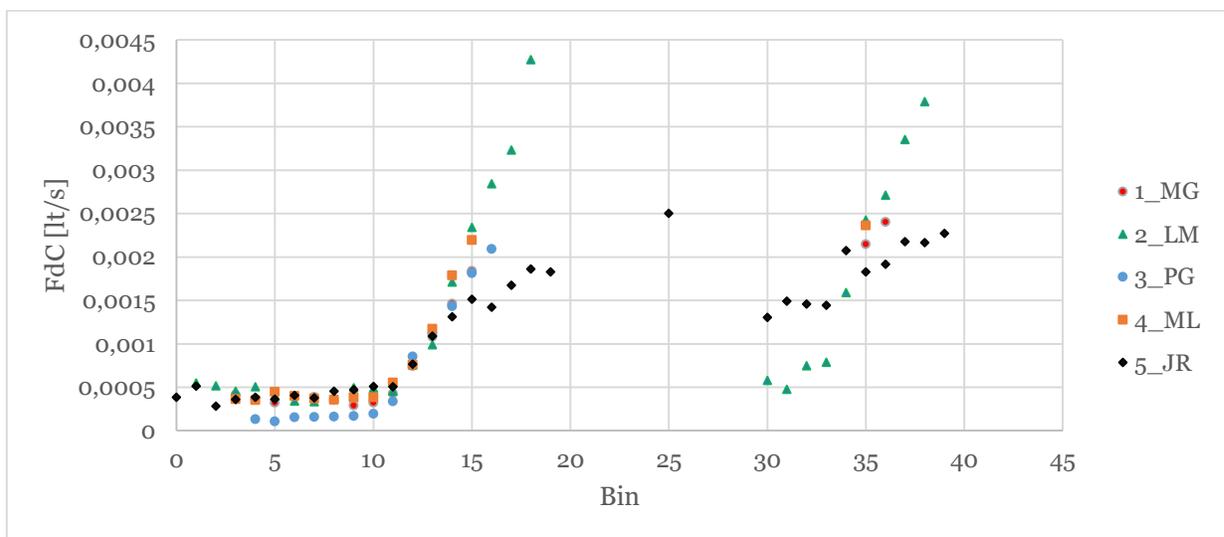


Figura 54. Factores de consumo por bin obtenidos con datos de OBD-II

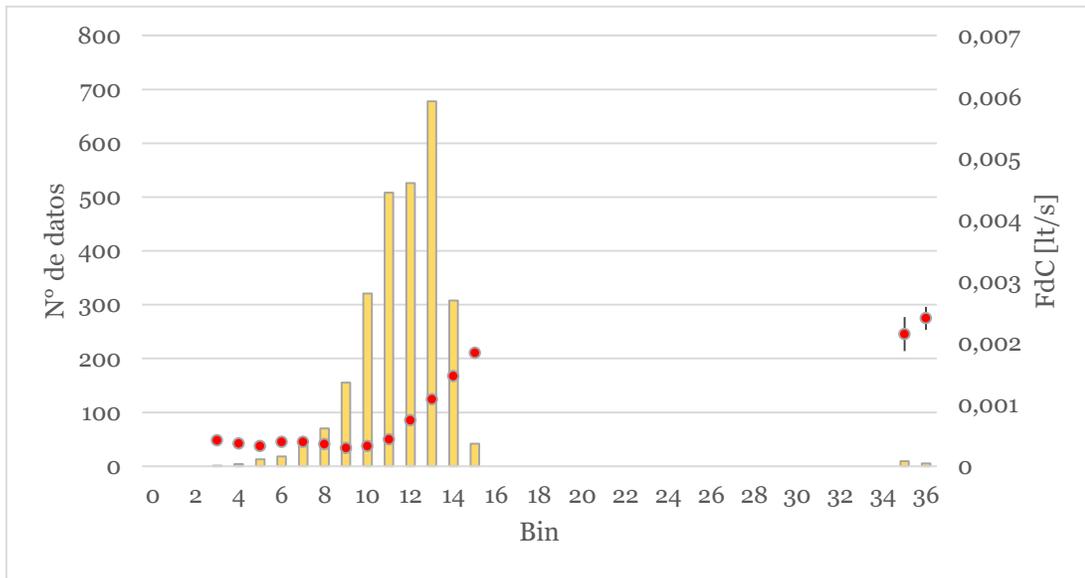


Figura 55. Factores de consumo del vehículo 1

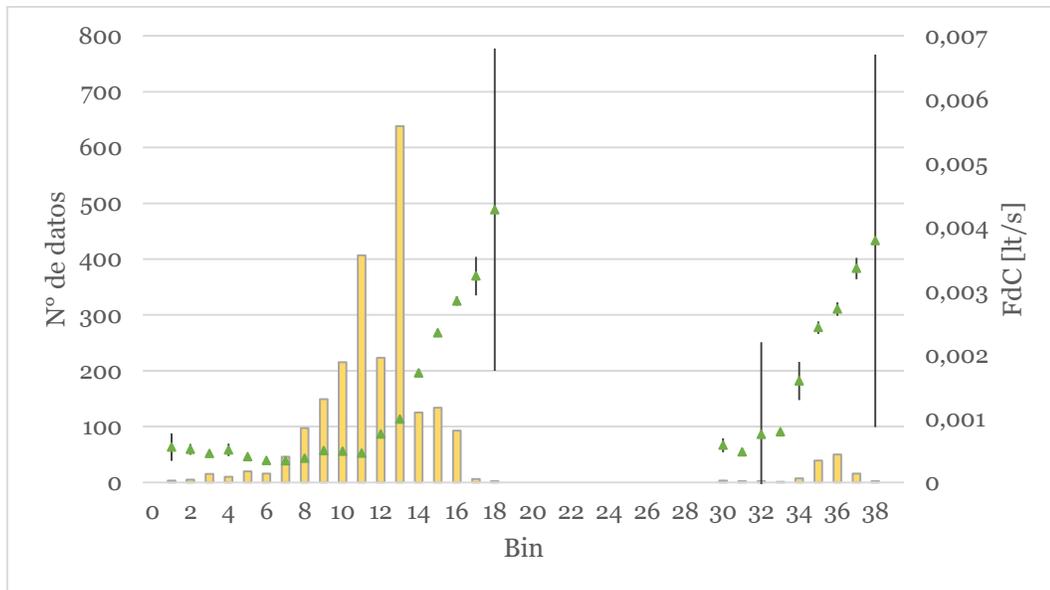


Figura 56. Factores de consumo del vehículo 2

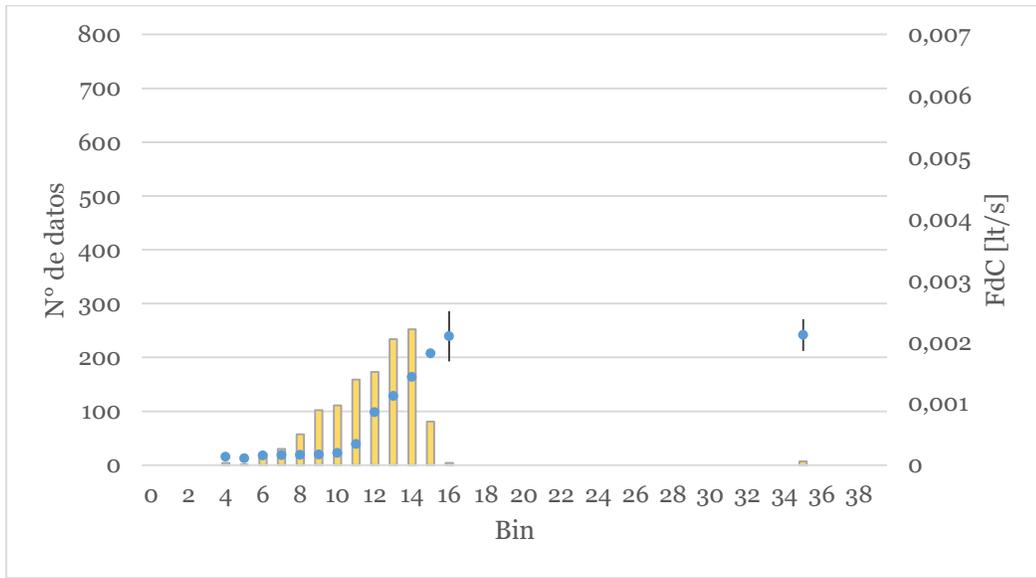


Figura 57. Factores de consumo del vehículo 3

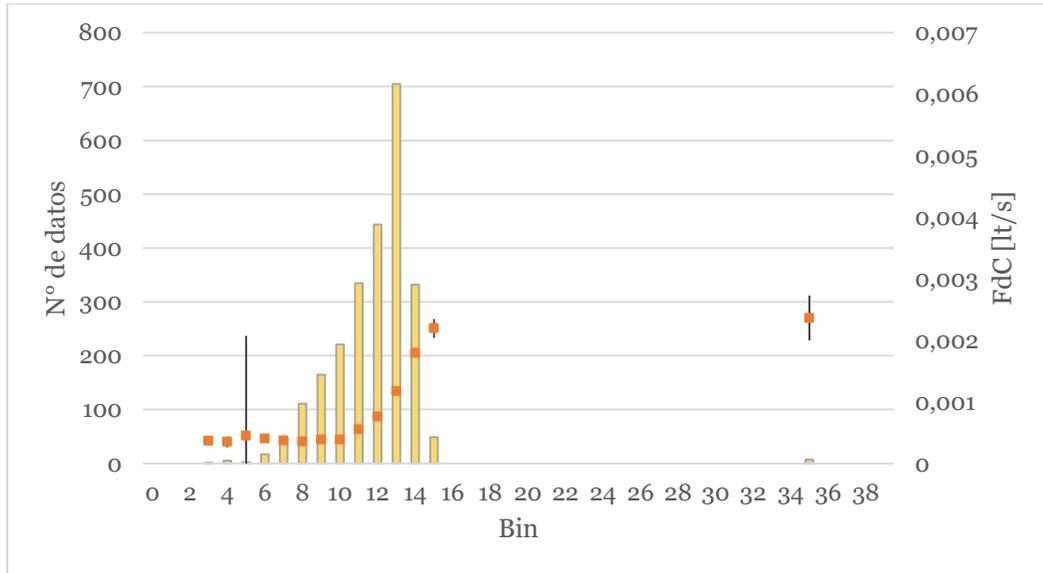


Figura 58. Factores de consumo del vehículo 4

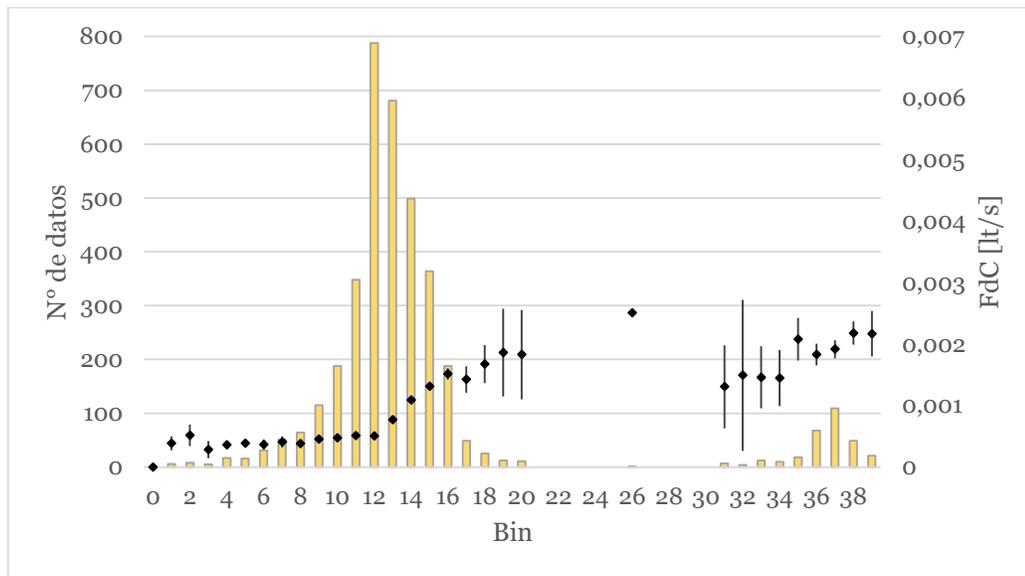


Figura 59. Factores de consumo del vehículo 5

De estos resultados se aprecia que cada vehículo tiene sus propios factores de consumo diferentes del resto, dadas las características de su constitución interna. También se puede observar que para vehículos con el mismo modelo se obtienen distintos factores, como es el caso de los Toyota Corolla, cuya diferencia es el año de fabricación.

Además, si se compara la totalidad de los factores de consumo obtenidos, se puede observar de la que los factores de consumo entre los bins 11 y 14 son los más similares entre los vehículos, mientras que para el resto hay diferencias importantes, en especial para los bins más altos.

4.3.5 Reducción del consumo de combustible gracias a conducción eficiente

Para el cálculo de la reducción en el consumo de combustible debido a conducción eficiente se sigue la metodología descrita en la sección 3.2.4, en donde se aplica un test-T a las tasas de consumo de los periodos de Línea base y Demostrativo de Ahorro de los vehículos para determinar si es que hay diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Cabe señalar que por un lado se analizan los vehículos por separado, y por otro en conjunto, como se menciona en la metodología señalada anteriormente.

4.3.5.1 Análisis de vehículos por separado

En la Tabla 21, Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24 se muestran los resultados de la cuantificación de reducción del consumo de combustible de cada vehículo por separado, para los distintos métodos utilizados. Cabe señalar que para el vehículo 3 al no contar con los datos de consumo obtenidos con OBD-II en el periodo Demostrativo de Ahorro, no se cuantifica la reducción en el consumo de combustible con este medidor. Además, el vehículo 5 al no mostrar información del consumo en su monitor, no presenta resultados para este caso.

Tabla 21. Disminución de consumo de combustible medido con OBD-II en cada vehículo por separado.

Vehículo	Medidor: OBD-II		
	Reducción [lt/100km]	IC ¹⁰ [lt/100km]	Aprueba Test-T
1	0,83	0,46	Sí
2	3,78	0,56	Sí
3	-	-	-
4	1,93	0,78	Sí
5	1,22	0,48	Sí

Tabla 22. Disminución de consumo de combustible medido con Monitor del vehículo en cada vehículo por separado.

Vehículo	Medidor: Monitor		
	Reducción [lt/100km]	IC [lt/100km]	Aprueba Test-T
1	0,94	0,49	Sí
2	3,69	0,44	Sí
3	1,80	0,49	Sí
4	1,96	0,75	Sí
5	-	-	-

Tabla 23. Disminución de consumo de combustible estimado con VSP (CO₂) en cada vehículo por separado.

Vehículo	Medidor: VSP (CO ₂)		
	Reducción [lt/100km]	IC [lt/100km]	Aprueba Test-T
1	0,33	0,33	Sí
2	0,94	0,54	Sí
3	0,19	0,36	No
4	0,46	0,36	Sí
5	0,18	1,34	No

Tabla 24. Disminución de consumo de combustible medido con VSP (OBD-II) en cada vehículo por separado.

Vehículo	Medidor: VSP (OBD-II)		
	Reducción [lt/100km]	IC [lt/100km]	Aprueba Test-T
1	0,32	0,45	No
2	3,39	0,92	Sí
3	0,51	0,45	Sí
4	1,37	0,47	Sí
5	0,24	1,36	No

¹⁰ IC: Intervalo de confianza

Los resultados anteriores se muestran graficados en la Figura 60.

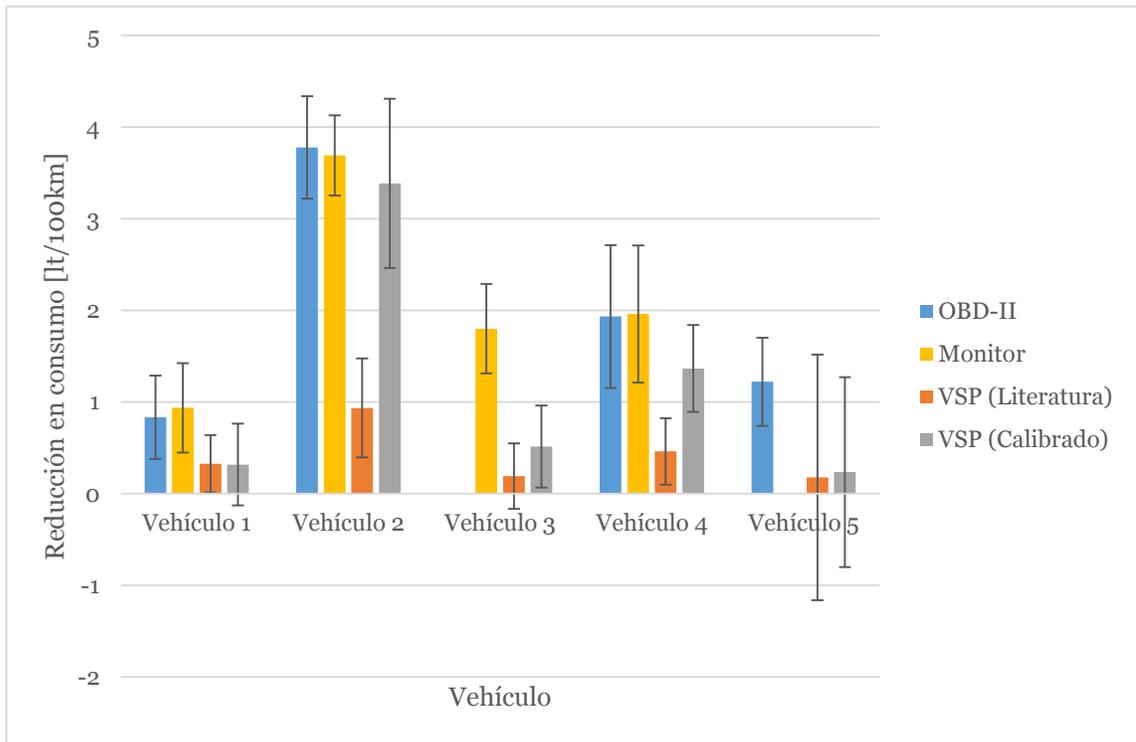


Figura 60. Reducción de consumo de combustible debido a conducción eficiente

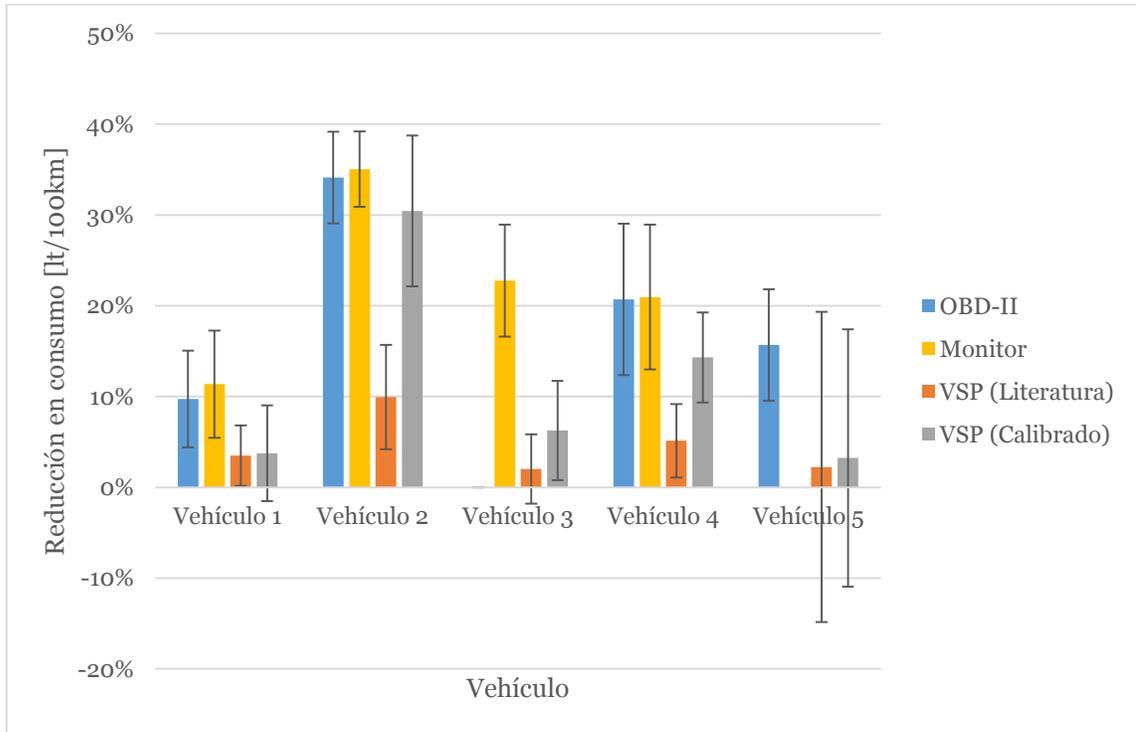


Figura 61. Reducción porcentual del consumo de combustible debido a conducción eficiente

Se puede observar que con el medidor Monitor se distinguen los ahorros mayores, obteniéndose diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confiabilidad para el total de vehículos de las pruebas. Además, es evidente la similitud con los resultados obtenidos del monitor de los vehículos. Esto se entiende por la procedencia común de los datos entregados por estos medidores.

Por otro lado, los resultados obtenidos con VSP distinguen ahorros menores, existiendo 4 de 10 casos sin diferencias estadísticamente significativas para un 95% de confiabilidad. Ahora, diferenciando entre VSP (Literatura) y VSP (Calibrado) se tienen mejores resultados para el último de estos dos, obteniéndose ahorros más cercanos a los mostrados por los medidores OBD-II y Monitor. Esto muestra que el VSP necesita de una calibración previa de los factores de consumo con datos obtenidos con OBD-II para cada vehículo en específico que se desee medir su consumo de combustible.

4.3.5.2 *Análisis de vehículos en conjunto*

Para la realización de este análisis se utilizaron los resultados de los vehículos 1, 2 y 4 y se agruparon de manera de tener el consumo y kilómetros por vuelta del conjunto. En la Tabla 25 se muestran los impactos obtenidos para un 90% de confiabilidad.

Tabla 25. Impactos y ahorro obtenido para el grupo de vehículos 1,2 y 4.

Medidor	TdC LB [lt/100km]	TdC DA [lt/100km]	Impacto %	Precisión %	Ahorro anual por vehículo (lt)
OBD-II	9,66	7,48	22,6%	2,68%	262
Monitor	9,26	7,06	23,8%	2,27%	264
VSP (Literatura)	9,25	8,62	6,86%	2,64%	76
VSP (Calibrado)	9,72	8,02	17,5%	5,09%	204

Estos resultados se encuentran graficados en la Figura 62, donde se observa que el mayor impacto es medido con el Monitor con un 23,8%, arrojando un valor muy similar al OBD-II (22,6%), luego viene el VSP (Calibrado) con un 17,5% y finalmente más abajo está el VSP (Literatura), con un 6,86%. Con esto queda en evidencia que este último medidor subestima en gran medida los ahorros, mientras que el VSP (Calibrado) a pesar de también ser conservador entrega resultados mucho mejores, como era de esperar. Esto último debido a que los factores de consumo del VSP (Calibrado) se obtienen para cada vehículo por separado.

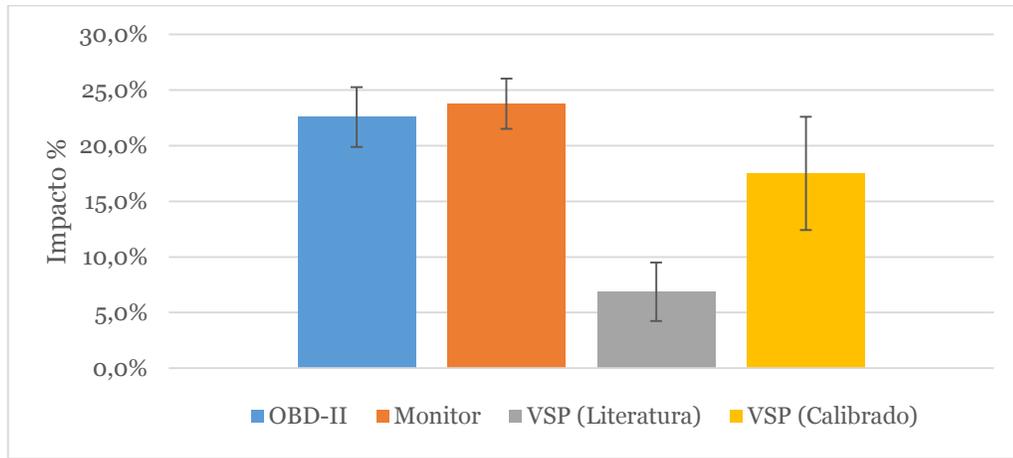


Figura 62. Impactos porcentuales de los vehículos 1, 2 y 4 medidos con los distintos medidores

4.3.6 Estimación de costos para medidores

En esta sección se modelan los costos del uso de los distintos medidores considerando su aplicación en las pruebas realizadas en pistas.

Para la estimación de los costos se modela cada uno de los medidores considerando el arriendo de equipos, de vehículos, de la pista, las horas de las pruebas, las horas de análisis de datos y la calibración del VSP. Las ecuaciones utilizadas se describen a continuación para cada medidor:

a) OBD-II

$$Costo_{OBD-II} \left[\frac{\$}{veh} \right] = HH_{ing} \times t_{análisis} + HH_{téc} \times t_{pruebas} + C_{eq} + C_{veh} + C_{pista} \quad (22)$$

b) Monitor

$$Costo_{Monitor} \left[\frac{\$}{veh} \right] = HH_{téc} \times (t_{análisis} + t_{pruebas}) + C_{veh} + C_{pista} \quad (23)$$

c) VSP (Literatura)

$$Costo_{VSP(Literatura)} \left[\frac{\$}{mes} \right] = HH_{ing} \times t_{análisis} + C_{eq} + C_{veh} + C_{pista} \quad (24)$$

d) VSP (Calibrado)

$$Costo_{VSP(Calibrado)} \left[\frac{\$}{mes} \right] = HH_{ing} \times t_{análisis} + HH_{téc} \times t_{téc} + C_{eq} + C_{veh} + C_{pista} + C_{calibración} \quad (25)$$

Donde:

- HH_{ing} : Costo de la hora hombre del ingeniero que realiza el análisis de datos para determinar el consumo, igual 1 [UF/hr]= \$24.000/hr.
- $HH_{téc}$: Costo de la hora hombre de un técnico, igual a 0,5 [UF/hr]= \$12.000/hr.
- $t_{análisis}$: Horas estimadas del análisis de datos, depende del medidor (ver Tabla 26)
- $t_{pruebas}$: Tiempo de duración de las pruebas equivalente a 2 hrs.
- C_{eq} : Costo de arriendo de equipos, en donde para OBD-II y Monitor corresponde a un notebook y un conector OBD-II, equivalente a \$4.000/veh y para el VSP corresponde a la Vam-Unit, con un costo de 2.000/veh.
- C_{veh} : Costo de arriendo de un vehículo, equivalente a \$30.000/veh.
- C_{pista} : Costo de arriendo de pista para un vehículo, equivalente a \$200.000/veh.
- $C_{calibración}$: Costo de calibrar el VSP con datos del OBD-II, corresponde a una prueba de OBD-II sin el costo de la pista.

Los resultados de la modelación se presentan en la Tabla 26, y para un mejor entendimiento se muestran graficados en la Figura 63. Como queda en evidencia, el uso de monitor en este caso es el más económico, mientras tanto el VSP (Calibrado) es el más costoso dado que incluye el costo de calibrar con OBD-II.

Tabla 26. Resultados de modelación de costos para pruebas en pista según medidor

Medidor	Tiempo de análisis [hr]	Costo estimado [\$/veh]
OBD-II	4	\$ 354.000
Monitor	1	\$ 266.000
VSP (Literatura)	5	\$ 352.000
VSP (Calibrado)	5	\$ 501.000

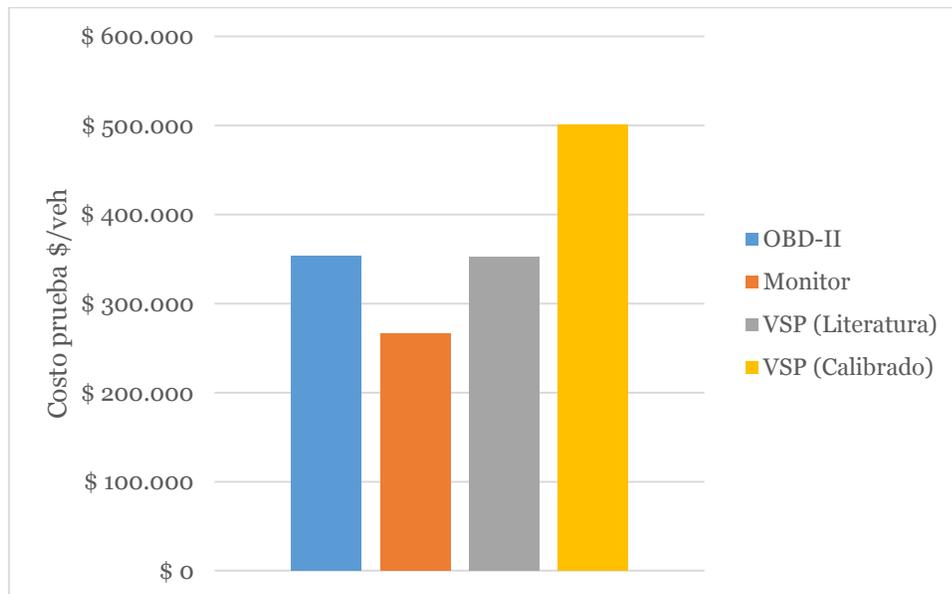


Figura 63. Costo de pruebas en pista por vehículo para cada medidor

4.3.7 Costo-efectividad medidores

Para evaluar el uso de los distintos medidores en esta sección se determina la costo-efectividad. Para este fin por un lado se analizan el costo y la precisión en conjunto, y por otro se aplica el criterio dado por el IPMVP que indica que los costos de las mediciones no pueden superar el 10% del ahorro anual.

4.3.7.1 Análisis costo-precisión de pruebas

Con la información de las precisiones y los costos de pruebas en pista calculados en las secciones 4.3.5.2 y 4.3.6 respectivamente, se construye la Figura 64 para analizar la costo-precisión de los medidores ocupados en esta experiencia. Cabe señalar que como la precisión alcanzada se obtuvo para los vehículos 1, 2 y 4, los costos consideran el uso de estos también. Además, dentro de los medidores presentados no se considera el VSP (Literatura) puesto que se evidenció que sus estimaciones de reducción del consumo eran demasiado conservadoras. Del gráfico se puede observar que la mejor relación costo-efectividad para pruebas en pista está dada para el monitor, seguido por el OBD-II y en último lugar queda el VSP.

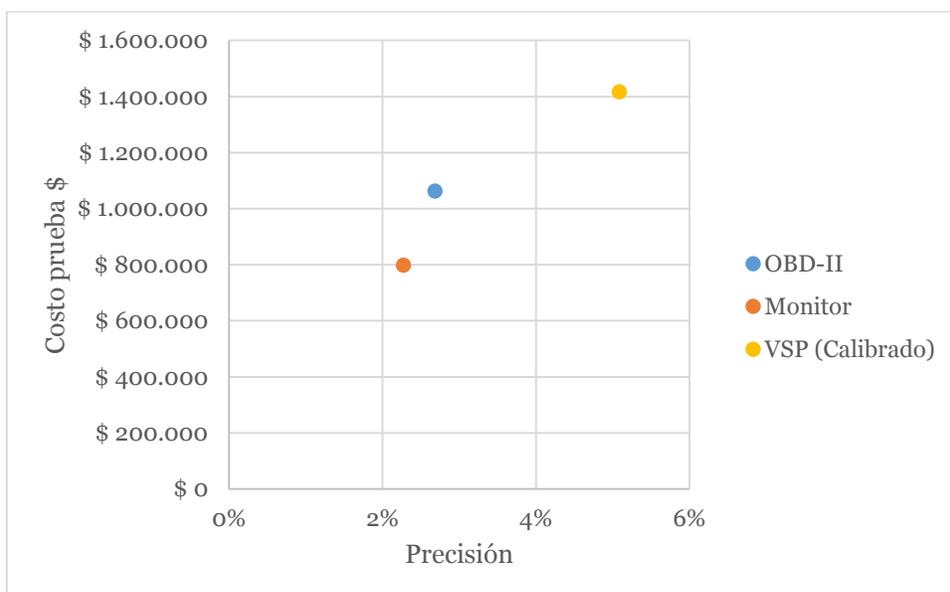


Figura 64. Costo vs precisión de medidores OBD-II, Monitor y VSP (Calibrado)

4.3.7.2 Número de beneficiarios para que las mediciones sean costo-efectivas

Para determinar la costo-efectividad de los medidores utilizados en estas pruebas se aplicó el criterio dado por el IPMVP que indica que las mediciones no deben superar en costos al 10% de los ahorros anuales. Dado que los ahorros anuales no alcanzan a superar siquiera el costo de las pruebas (para todos los medidores), se deben capacitar en conducción eficiente a más conductores (beneficiarios) con vehículos de las mismas características de las de los vehículos utilizados en las pruebas, sin realizar mediciones con ellos, si no que estimando su ahorro con los resultados ya encontrados en las pruebas experimentales. Esto es en verdad factible dado que la página que realiza difusión de las técnicas de conducción eficiente (www.conduccioneficiente.cl) registró durante el 2013 alrededor de 5.000 visitas únicas [19], lo cual es un número bastante elevado.

Otro aspecto relevante a considerar es que dado que los medidores reportan resultados diferentes de ahorro, en particular el VSP (Calibrado) comparado con el OBD-II y el Monitor, se necesita un número distinto de beneficiarios a justificar. Este número se considera válido ya que los ahorros reportados con VSP son menores a los reales en un cierto porcentaje, lo que significa que el número de beneficiarios es aún mayor a solicitar.

Para encontrar finalmente dicha cantidad de beneficiarios, se calcula en primer lugar el ahorro monetario anual necesario para cumplir la condición antes descrita, que corresponde a multiplicar por 10 el costo de las pruebas (considerando 3 vehículos) según cada medidor. Y en segundo lugar se calcula la cantidad de vehículos necesarios

para alcanzar ese ahorro con el ahorro monetario anual por vehículo (calculado con el precio de la bencina de 95 octanos utilizado en la sección 4.1.3 (\$922/lt)). Los resultados de lo descrito anteriormente se encuentran en la Tabla 27.

Tabla 27. Número de beneficiarios para que las mediciones sean costo eficientes para las pruebas realizadas

Medidor	Costo pruebas	Ahorro anual necesario (\$)	Ahorro anual por vehículo (\$)	Beneficiarios necesarios
OBD II	\$ 1.062.000	\$ 10.620.000	\$ 240.733	45
Monitor	\$ 798.000	\$ 2.660.000	\$ 242.996	33
VSP (Calibrado)	\$ 1.503.000	\$ 5.010.000	\$ 187.915	80

Se observa que el mejor resultado se obtuvo para el monitor, dados sus bajos costos en comparación con el resto. Por otro lado, como era de esperarse el número de beneficiarios del VSP (Calibrado) es mayor al resto, siendo este cerca del doble del OBD-II. Estos valores confirman la factibilidad de que esos beneficiarios se puedan alcanzar, dado que el número de visitas únicas es más de 60 veces mayor que el número mínimo de beneficiarios necesitados para lograr la costo-efectividad.

Ahora, considerando otros escenarios, se puede determinar el número de beneficiarios necesarios para realizar mediciones costo-efectivas en pistas aplicando otros tipos de MMEE. En la Tabla 28 se encuentra la cantidad de beneficiarios para cada medidor, considerando los costos de las pruebas estimados en la sección 4.3.6, una tasa de consumo de un vehículo promedio de 9 [lt/100km], y teniendo como variable independiente el impacto esperado.

Tabla 28. Número de beneficiarios necesarios para que las mediciones sean costo efectivas según impacto esperado

Impacto esperado	Ahorro anual/veh	Beneficiarios necesarios		
		OBD-II	Monitor	VSP (Calibrado)
1%	\$ 4.979	2.133	1.603	3.019
2%	\$ 9.958	1.067	801	1.509
3%	\$ 14.936	711	534	1.006
4%	\$ 19.915	533	401	755
5%	\$ 24.894	427	321	604
6%	\$ 29.873	356	267	503
7%	\$ 34.852	305	229	431
8%	\$ 39.830	267	200	377
9%	\$ 44.809	237	178	335
10%	\$ 49.788	213	160	302
15%	\$ 74.682	142	107	201
20%	\$ 99.576	107	80	151
30%	\$ 149.364	71	53	101

50%	\$ 248.940	43	32	60
-----	------------	----	----	----

Estos resultados se presentan en la Figura 65, en donde las líneas punteadas representan la zona en donde no corresponde aplicar los medidores debido a que las precisiones obtenidas en las mediciones experimentales (entre 2% y 3% para el Monitor y el OBD-II y cercano al 4% para el VSP (Calibrado)) no permiten detectar impactos tan bajos. Por otro lado, se puede observar que para impactos superiores al 10% la cantidad de beneficiarios es menor a 150 vehículos.

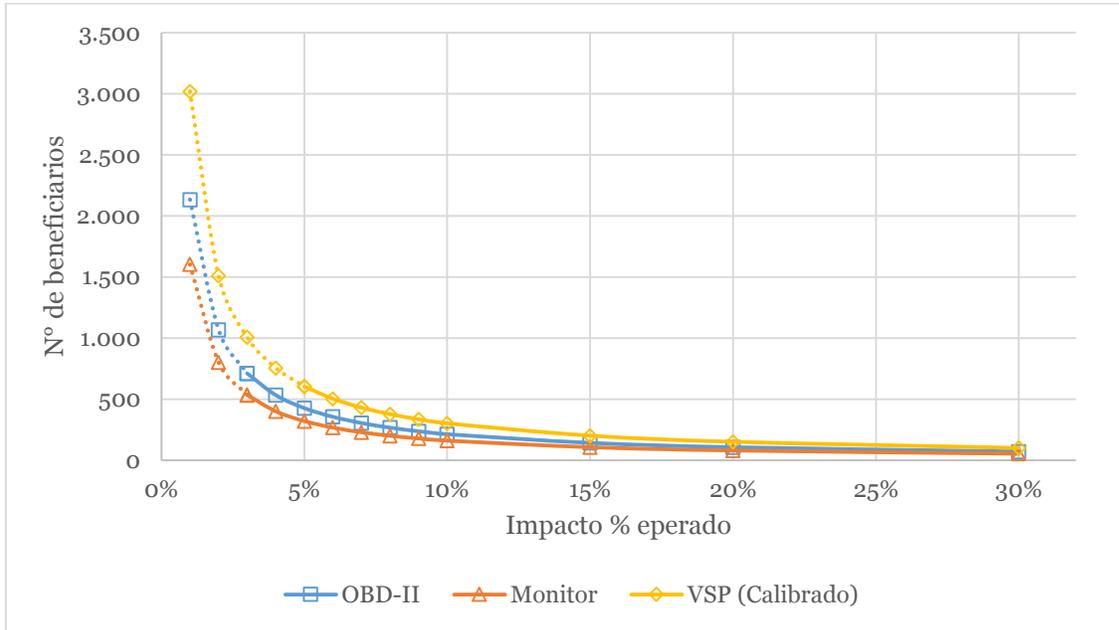


Figura 65. Número de beneficiarios para que las mediciones sean costo-efectivas en función del impacto esperado

5. Conclusiones

A continuación se muestran las conclusiones de este trabajo de título separadas en los tres ejes principales definidos en un principio.

5.1 Conclusiones respecto a la Cuantificación estandarizada y evaluación de la costo-efectividad de proyectos AChEE 2011-2013

Las conclusiones respecto a la cuantificación estandarizada y evaluación de la costo-efectividad de proyectos del Área de transporte de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) se dividen según las distintas actividades que se realizaron para determinar la costo-efectividad de sus proyectos, las cuales son: revisión y descripción del Protocolo Internacional de Medida y Verificación, caracterización de proyectos del área de transporte de la AChEE, comprensión del nuevo protocolo AChEE, cuantificación estandarizada de la reducción del consumo de combustible de proyectos caracterizados por medio de la aplicación del nuevo protocolo AChEE, y finalmente el análisis de la costo-efectividad de sus proyectos.

En primer lugar, de la revisión del IPMVP se constató que para lograr cuantificar una reducción en el consumo de combustible en proyectos de eficiencia energética en el sector del transporte deben determinarse los siguientes elementos:

- Medidas de Mejora de Eficiencia Energética (MMEE) a aplicar: medida que busca reducir el consumo energético.
- Sistema: grupo de vehículos que se monitorean, a los que se les aplica una MMEE.
- Periodos de Línea Base: periodo donde se mide el consumo de referencia sin la aplicación de ninguna MMEE.
- Periodo Demostrativo de Ahorro: periodo donde se mide el consumo estando aplicada la MMEE.
- Medidor: Herramienta que mide o estima el consumo energético del sistema.

En segundo lugar, como conclusión respecto a la caracterización de proyectos, se tiene que los 11 proyectos revisados se dividen según el tipo de transporte en donde se aplican (transporte de carga, particular y de pasajeros) y según el tipo de alcance (piloto o masivo). Dentro de los proyectos revisados, se tienen 5 del transporte de carga (todos piloto), 2 del transporte particular (pilotos) y 3 del transporte de pasajeros (2 piloto y uno masivo). Además, dentro de los proyectos revisados se aplicaron distintas MMEE (conducción eficiente, dispositivos aerodinámicos, control de la velocidad, entre otras) y se utilizaron distintos medidores (surtidor de combustible, flujómetro, monitor vehicular y on board diagnostic). Otra situación importante es que se identificó que en 2

de los 11 proyectos revisados no se aplicó alguna MMEE, y en uno no se midieron datos del periodo de Línea Base, por lo tanto en estos tres proyectos no se puede cuantificar la reducción del consumo de combustible. Por último, en esta etapa se concluye que es necesaria una cuantificación estandarizada de la reducción del consumo de combustible, ya que se constataron diversas formas de obtener los impactos¹¹ de las MMEE aplicadas.

En tercer lugar, con respecto al nuevo protocolo se identificaron los distintos pasos para su aplicación (registro de datos, cálculo de impactos y cálculo de ahorros¹²), de manera de poder llevar a cabo una cuantificación estandarizada de la reducción del consumo energético en los proyectos caracterizados. Con respecto a los impactos, con el nuevo protocolo se calculan con un test estadístico T-Student a diferencia de los proyectos originales, el cual permite determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre los promedios de las tasas de consumo¹³ de los periodos de Línea Base y Demostrativo de Ahorro. Con respecto a los ahorros, estos se calculan con el impacto multiplicado por el nivel de actividad¹⁴ anual de los vehículos del sistema.

En cuarto lugar, tras la aplicación del protocolo a los 8 proyectos que cumplieron las condiciones necesarias para cuantificar una reducción de consumo de combustible debido a la aplicación de una o varias MMEE, se obtuvieron los impactos promedios de las MMEE según tipo de transporte, concluyéndose que los mayores impactos se obtienen con recambio de vehículo en combinación con conducción eficiente en el transporte de carga, y para la conducción eficiente por si sola en el transporte particular. Además, se obtuvo que varios de los sistemas medidos no tuvieron diferencias estadísticamente significativas entre los consumos de los periodos de Línea Base y Demostrativo de Ahorro, por lo cual no presentaron ahorros. Con respecto a los medidores, se obtuvo la precisión promedio de las mediciones entre los distintos sistemas agrupados por tipo de transporte, concluyéndose que el monitor del vehículo aplicado en el transporte particular, bajo condiciones de tránsito simuladas, es el medidor más preciso, seguido de cerca del surtidor de combustible aplicado en el transporte de carga y de pasajeros. La diferencia entre estos dos es principalmente el costo de las pruebas en que fueron utilizadas y los periodos de medición en que se involucran sus pruebas, teniéndose que el surtidor de combustible requiere periodos mucho más largos de tiempo y costos menores dada la cantidad de vehículos que pueden medirse, además que el surtidor de combustible puede aplicarse a cualquier vehículo, mientras el monitor entrega información de consumo solo en algunos.

¹¹ Impacto: reducción de la tasa de consumo del periodo Demostrativo de Ahorro con respecto a

¹² Ahorro: reducción del consumo de combustible.

¹³ Tasa de consumo: valor que corresponde a los litros consumidos de combustible en un periodo de tiempo, normalizados por la cantidad de kilómetros recorridos en ese periodo de tiempo.

¹⁴ Nivel de actividad: kilómetros recorridos.

Siguiendo con las actividades de la aplicación del protocolo, una vez obtenidos los impactos de forma estandarizada se calcularon de dos maneras los ahorros anuales de los distintos sistemas: con los impactos de los proyectos originales y los impactos obtenidos con el protocolo. Con este resultado se concluye que el protocolo es más riguroso que los procedimientos utilizados en originalmente, dado que con el nuevo protocolo se cuantificaron 79.225 [lt/año] menos que lo originalmente reportado, lo que es producto de que varios sistemas no presentaron diferencias estadísticamente significativas gracias al test T-Student.

Por último, se evaluó la costo-efectividad de cada proyecto verificando que se cumpliera la condición dada por el IPMVP que indica que los costos del proceso de reporte de ahorros no pueden ser mayores al 10% de los ahorros anuales. Para esto se calcularon los ahorros monetarios de cada proyecto y se compararon con los costos de las mediciones estimados de la revisión de cada proyecto, obteniéndose que solo dos proyectos resultaron ser costo-eficientes: el proyecto AP¹⁵ (caracterización: transporte de carga, proyecto piloto, MMEE dispositivos aerodinámicos, medidor surtidor de combustible) y el TP2 (caracterización: transporte de pasajeros, proyecto masivo, MMEE gestión del ralentí y medidor surtidor de combustible). Como insumo para el análisis de la costo-eficiencia de los proyectos, se estimó la cantidad de vehículos necesarios para lograr que los proyectos sean costo-efectivos, aplicando MMEE en ellos sin realizar mediciones adicionales, o sea estimando su ahorro con los impactos ya calculados en cada proyecto. Y con estos resultados se obtuvo que a los proyectos les falta una cantidad acotada de vehículos para ser costo-efectivos, en donde el proyecto con mejor pie lograr esto es el TC1 (caracterización: transporte de carga, proyecto piloto, MMEE dispositivos aerodinámicos, conducción eficiente y gestión de velocidad aplicados en sistemas diferentes y medidor surtidor de combustible).

A raíz de estos resultados se concluye que el medidor que más conviene utilizar es el surtidor de combustible (en particular para proyectos masivos), siempre y cuando se alcancen diferencias estadísticamente significativas. Para alcanzar esto es necesario periodos largos de tiempo de medición (de varios meses) y monitoreo de varios vehículos, cosa de tener una buena precisión. Además se recomienda la aplicación de MMEE con un alto impacto esperado, como lo son la conducción eficiente (para transporte particular en especial), los dispositivos aerodinámicos y el recambio de vehículos antiguos en el transporte de carga, y la gestión del ralentí en el transporte de pasajeros. Cabe señalar que para el transporte particular se recomiendan mediciones en lugares con condiciones de tránsito reales, que incluyan periodos más largos de medición y mayor cantidad de vehículos y conductores involucrados, cosa de contrarrestar las pérdidas de precisión por bajar los costos al controlar menos condiciones de las pruebas.

¹⁵ Nomenclatura de proyectos definida en Tabla 9.

5.2 Conclusiones respecto a la costo-efectividad del análisis de Fluidodinámica Computacional (CFD) para camiones con dispositivos aerodinámicos

Para la evaluación de la costo-efectividad del análisis CFD se realizó una revisión bibliográfica de estudios, mediante la cual obtuvieron antecedentes de que la aplicación de CFD para analizar dispositivos aerodinámicos en camiones es actualmente aplicada con éxito. Además, se encontraron experiencias en distintos test que permiten comparar sus resultados con el análisis CFD.

Por otro lado, se encontró y describió la utilización de un modelo que permite estimar disminución en el consumo de combustible gracias a los resultados de variación del coeficiente de arrastre entregados por CFD o por túnel de viento. Este modelo utiliza como parámetros de entrada la velocidad segundo a segundo de un viaje determinado, las cuales pueden obtenerse de ciclos de conducción estándar, o también desde un dispositivo GPS. Además, otros parámetros son el peso, y por su puesto el coeficiente de arrastre. Con esto se concluye que si existen formas de determinar mediante CFD la reducción del consumo de combustible gracias a la instalación de dispositivos aerodinámicos en camiones.

Otra actividad realizada fue la estimación de los costos de conlleva una simulación con CFD suponiendo la utilización de un computador de requerimientos accesibles para empresas especializadas en el rubro y universidades, resultando que para evaluar un dispositivo se tiene un costo aproximado de \$5.800.000, el cual si comparamos con el costo de aplicar la norma NCh 3331 (\$24.500.000 aproximado, ver Anexo E.2.2) es mucho menor. Sin embargo, si se compara este costo con las experiencias de los proyectos AChEE resulta ser elevado, considerando que por el mismo valor se pueden medir en un plazo de meses una gran cantidad de vehículos. Por lo tanto se recomienda que este tipo de análisis sea utilizado en el proceso de diseño y puesta a prueba de dispositivos aerodinámicos. Cabe señalar que en el mundo académico se reconoce que los resultados de esta herramienta son complementarios a los de otras pruebas, y siendo necesaria la validación de sus resultados. De esta manera se puede hacer compatible el uso de CFD y otras herramientas de medición.

Como último análisis se aplicó la condición de costo-efectividad brindada por el IPMVP, y se obtuvo que se necesitan 25 camiones con carenado superior para hacer costo-efectiva las mediciones de CFD (utilizando los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica de estudios y de la cuantificación estandarizada del ahorro de los proyectos del Área de Transporte de la AChEE), lo cual es un buen resultado si se compara con otros proyectos del transporte de carga.

Para finalizar, se tienen las siguientes recomendaciones para continuar la el estudio de esta herramienta:

- Investigar la utilización de otros modelos que permitan traducir la reducción en el coeficiente de arrastre en reducción del consumo de combustible, como por ejemplo la metodología VSP.
- Realizar simulaciones con las mismas condiciones a las realizadas en el test del estudio 5 (test en ruta, norma SAE J1321) de la revisión bibliográfica de estudios (ver Anexo E.1.5).
- Aprovechar las nuevas líneas de apoyo de la AChEE, en particular la denominada *Ejecución de iniciativas de investigación, diseño y desarrollo de dispositivos aerodinámicos para vehículos de transporte caminero*. Instancia que subvenciona con el 60% de un presupuesto (máximo de \$20.000.000) para el diseño, análisis CFD, construcción y puesta a prueba con la norma NCh 3331 de un dispositivo aerodinámico para camiones [3]. Cabe mencionar que de lo estimado y presentado en este trabajo de título, la suma del costo en análisis CFD más pruebas con la norma NCh 3331 es de \$30.000.000 aproximadamente, que equivale al 90% del presupuesto total del proyecto.

5.3 Conclusiones respecto a la costo-efectividad de la metodología VSP como estimador del impacto de la conducción eficiente

Con respecto a la metodología VSP se concluye que estima el consumo de combustible de una buena manera cuando el conductor del vehículo maneja de una forma normal o “no eficiente”, teniéndose variaciones muy pequeñas con respecto al medidor utilizado como referencia. Sin embargo cuando se aplican las técnicas de conducción eficiente el VSP pierde resolución y estima consumos mayores a los reales, lo cual repercute en una cuantificación menor de la reducción del consumo debido a la aplicación de estas técnicas. Esto si bien no representa fielmente lo que ocurre en la realidad, se acepta como válido en este trabajo de título, puesto que cuantificar menos variación, es decir cuantificar un impacto menor, significa que se está siendo conservador al momento de reportar ahorros. Ahora, si se comparan las dos versiones del VSP analizadas (una con factores de consumo obtenidos de la literatura, y otra con factores de consumo calibrados con el OBD-II, que obtiene a su vez la información desde el computador del vehículo) se opta por la versión calibrada, ya que estima los consumos de manera más fiel.

Por otro lado, considerando los otros medidores utilizados en las pruebas experimentales, se concluye que el VSP es menos costo-efectivo que el OBD-II y el monitor, dada su precisión y sus costos más altos, además que es el medidor que está más lejos de alcanzar la condición recomendada por el IPMVP de no superar el 10% de los ahorros anuales con los costos de Medida y Verificación. Por lo que se recomienda su utilización en el caso que no se disponga de los otros medidores, lo cual es bastante factible porque el uso del OBD-II no resulta en todo vehículo dado que no todos

contienen el protocolo utilizado por este medidor, además que no todos los vehículos muestran información del consumo en sus monitores.

Analizando las pruebas realizadas, se concluye que el VSP es más efectivo en pruebas en pista, dado que para el caso con condiciones de tránsito reales no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Pero como es necesario reducir los costos de las pruebas para lograr una mayor costo-efectividad, se recomienda utilizar en pruebas con rutas reales, que involucren un mayor tiempo de toma de datos y mayores repeticiones que las utilizadas en las pruebas realizadas, de manera de disminuir los errores aleatorios, y obtener una baja precisión que permita observar reducción en el consumo. Cabe señalar que a su vez estos periodos no pueden ser tan altos tampoco, ya que existen otros medidores que pueden lograr buenas precisiones a bajo costo en periodos largos, como se observó en la evaluación de la costo-efectividad de los proyectos de la AChEE. Por lo tanto se recomienda que el periodo de tiempo a medir sea de días o semanas.

Finalmente, para mejorar esta metodología se recomienda analizar el proceso de estimación en los estados energéticos predominantes en la conducción eficiente, los cuales son los bins entre el 10 y el 14. Estos estados se dan cuando el conductor mantiene una conducción estable, sin frenadas ni aceleraciones bruscas. Adicionalmente, se recomienda probar otras aproximaciones para otros tipos de vehículos, pudiendo así expandir sus fronteras de aplicación.

6. Bibliografía

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook, París, 2012.
- [2] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «Balance Nacional de Energía,» 2012. [En línea]. Available: http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/06_Estadisticas/Balances_Energ.html. [Último acceso: noviembre 2013].
- [3] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, [En línea]. Available: <http://www.acee.cl/eficiencia-energetica/que-es>. [Último acceso: 20 agosto 2014].
- [4] Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles; National Research Council; Transportation Research, Technologies and Approaches to Reducing the Fuel, Washington, DC: The National Academies Press, 2010, p. 29.
- [5] Energy Saving Trust, Ecodriving, Smart efficient driving techniques, Londres: Treatise , 2005.
- [6] J. S. A. Rafa Poquet Vitoria, «La Medida y Verificación del ahorro energético en Comunidades de Regantes,» vol. 43, n^o 29, 2013.
- [7] Efficiency Valuation Organization, Protocolo Internacional de Medida y Verificación, Toronto, 2010.
- [8] «EPA United States Environmental Protection Agency,» [En línea]. Available: <http://www.epa.gov/obd/>. [Último acceso: 20 agosto 2014].
- [9] M. Belzile, «Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses,» Ottawa, 2012.
- [10] CD-adapco, «CFD and wind tunnel testing complimentary methods for aircraft desing,» [En línea]. Available: http://www.cd-adapco.com/sites/default/files/Presentation/Todd_Leighton.pdf. [Último acceso: 21 agosto 2014].
- [11] D. A. O. A. M. L. y. P. E. J.A. Capote, «Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para*

Cálculo y Diseño en Ingeniería, vol. 24, nº 230-235, 2008.

- [12 M. W. K. H. N. D. James Lents, «Handbook of air quality management,» [En línea].
] Available: <http://www.aqbook.org/read/?page=86&language=Sp>. [Último acceso:
10 enero 2014].
- [13 J. L. Jiménez-Palacios, «Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions
] with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing,» 1999.
- [14 UNTEC, «Actualización de factores de emisión para vehículos livianos y medianos,»
] Santiago de Chile, 2007.
- [15 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. II, Hayama: IGES,
] 2006, p. 3.16.
- [16 «Gasolineras Gaviota,» [En línea]. Available:
] <http://www.gasolineraslagaviota.com/wp-content/uploads/2012/11/Vehicular.pdf>.
[Último acceso: 14 enero 2014].
- [17 GIIGNL, GNL Custody Transfer Manual, 2011.
]
- [18 Comisión Nacional de Energía, Gobierno de Chile, «Sistema de información en línea
] de precios de combustibles en estaciones de servicio,» [En línea]. Available:
<http://www.bencinaenlinea.cl/web2/buscador.php?region=10>. [Último acceso: 10
octubre 2014].
- [19 Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «Programa de incentivo a la adopción
] voluntaria de las técnicas de conducción eficiente,» Santiago, Chile, 2013.
- [2 H. Chowdhury, «A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck,» Elsevier,
o] Melbourne, 2013.
- [21 D. G. Hyams, «Computational simulation of model and full scale Class 8 trucks with
] drag reduction devices,» Elsevier, Chattanooga, 2010.
- [2 M. T. T. M. N. O. K. K. Prasanjit Das, «Large eddy simulation of the flow-field
2] around a full-scale heavy-duty truck,» Elsevier, Chittagong, 2013.
- [2 A. F. Zulfaa Mohamed-Kassim, «Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic
3] drag reduction,» *Transportation Research Part D*, pp. 275-284, 2010.
- [2 J. Villalobos, «Impacto de la Aerodinámica para el Ahorro de Combustible,» 2013.
[En línea]. Available: <http://cli.unab.cl/wp-content/uploads/2013/05/Ficha-de>

- 4] transporte-para-feria-del-transporte.pdf. [Último acceso: 21 agosto 2014].
- [2 Advanced Vehicles Program Engineer, Transport Canada ecoTECHNOLOGY for
5] Vehicles Program, Centre for Surface Transportation Technology, National Research
Council Canada, «Review of Aerodynamic Drag Reduction,» 2012. [En línea].
Available: <<http://www.tc.gc.ca/eng/programs/environment-etv-menu-eng-2939.html>>. [Último acceso: 04 05 2014].
- [2 Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «AChEE,» [En línea]. Available:
6] <http://www.acee.cl/concursos/ejecuci-n-de-iniciativas-de-investigaci-n-dise-o-y-desarrollo-de-dispositivos-aerodin>. [Último acceso: agosto 17 2014].
- [2 Ministerio de Medio Ambiente, *Opciones de mitigación para enfrentar el cambio*
7] *climático MAPS Chile*, 2014.

Anexos

Anexo A

Revisión de proyectos AChEE del área de transporte, periodo 2011 – 2013

A continuación se presenta la revisión bibliográfica realizada en este trabajo de título de 11 proyectos realizados por la AChEE en el periodo 2011-2013. Los nombres de los proyectos se encuentran en la Tabla 9.

A.1. Proyecto 1: [2011] Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero

En el presente estudio se dio apoyo técnico para la elaboración e implementación de planes de Eficiencia Energética (EE) en 25 empresas del transporte de carga nacional, las cuales en su conjunto constituyen una flota de 2.496 vehículos. En el estudio se realizaron procesos de caracterización de las empresas, entrega de material de ayuda para la difusión de las temáticas de EE, capacitaciones, se desarrolló una página web (www.cargatee.cl) para apoyar la adopción de estrategias del uso eficiente del combustible, además de una metodología y herramientas para realizar seguimiento de medidas a implementar. Es importante destacar que este estudio no se realizó un plan de M&V, debido a que no se implementó ninguna MMEE.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: El estudio se realiza sobre las flotas de 14 empresas de transporte caminero, que en total constan de 2.496 vehículos. Sin embargo en este estudio no se aplicó ninguna MMEE, por lo que no hay un sistema definido.
- Sistema extendido: Se puede considerar como sistema extendido el total de vehículos de las empresas, los cuales son 2.496 vehículos.
- MMEE aplicada: En este estudio no se aplica ninguna MMEE.
- Medidor utilizado: En el presente proyecto no se realiza ninguna actividad de M&V, sin embargo se ocupan los datos anuales de consumo de combustible de cada empresa para realizar proyecciones con metas definidas para cada una de estas, por lo cual se puede considerar como medidor el indicador del surtidor de combustible.
- Precisión: No se calcula la precisión, ya que no se realiza un plan de M&V.
- Costo M&V: No se realiza un plan de M&V.
- Línea Base:
 - Datos utilizados: Si bien no hay una línea base definida para el proyecto, se ocupan los datos anuales de consumo de combustible para cada empresa para calcular el potencial de ahorro.

- Factores estáticos: Composición de la flota, tipo de operación.
- Periodo demostrativo de ahorros: No hay un periodo demostrativo de ahorro, lo que se realiza es un cálculo del potencial de ahorro por empresa, producto de la aplicación de programas que se desarrollarían como resultado del proyecto.
- Ajustes de Base: No se realiza.
- Impacto: No hay debido a que no se implementa ninguna MMEE.
- Potencial de ahorro: Se calcula con respecto a metas de ahorro definidas por cada empresa de acuerdo a sus realidades, corregidas por el consultor, sobre los datos anuales de consumo de combustible.
- Periodos típicos de medición: No aplica, ya que no se implementó ninguna MMEE.

A.2. Proyecto 2: [2011] Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago

El presente estudio tuvo como fin la mejora de los estándares de gestión energética en empresas del transporte de pasajeros. En esta ocasión se realizó un trabajo con la empresa Alsacia Express, que presta servicios a Transantiago, en donde se implementaron una serie de MMEE de forma experimental, las cuales fueron evaluadas paralelamente en distintos vehículos.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: 20 buses de la empresa Alsacia-Express, de distintos depósitos. Se definen sub-flotas para las pruebas de cada MMEE, en donde se utilizan en promedio 3 buses.
- Sistema extendido: 704 buses de la empresa Alsacia-Express.
- MMEE aplicadas: Control electromecánico de la aceleración, Monitoreo Explícito, Conducción Eficiente, Corte del ralenti sobre 3 min, Optimización electrónica de cada de cambios, Control mecánico de aceleración, Restricción RPM.
- Medidor utilizado: Equipo de medición on-board FM300 GPS-datalogger.
- Precisión: Se asegura una diferencia significativa entre intervalos de confianza para los datos de LB y DA, con 95% de nivel de confianza. No se muestra un dato explícito para la precisión.
- Costo M&V: MM\$10.
- Línea Base:
 - Datos utilizados: Datos diarios obtenidos durante una o dos semanas, dependiendo de la MMEE evaluada.
 - Factores estáticos: Conductor, ruta, horario de operación, vehículo.
- Periodo demostrativo de ahorros: Datos diarios obtenidos durante una o dos semanas, dependiendo de la MMEE evaluada.

- Ajuste de base: Se usó un bus patrón para poder comparar LB con periodo demostrativo de ahorro bajo las mismas condiciones externas de tráfico (velocidad media, nivel de congestión, etc.), en un mismo día y jornada laboral.
- Impacto: El impacto en el rendimiento producto de la aplicación de las MMEE fue un aumento entre 0,6 y 47,1%, con promedio 7,8% sin considerar el valor más alto (47,1%) debido a que es un valor aislado cuando se compara con el resto.
- Potencial de ahorro: Se extrapola al resto de la flota utilizando datos históricos más resultados del periodo demostrativo de ahorro, aplicando 3 factores de corrección: probabilidad asociada al intervalo de confianza, casos en los que se consigue disminución significativa del consumo de combustible sobre casos medidos, y porcentaje de flota en donde es aplicable cada MMEE.
- Periodos típicos de medición: Se mide el consumo de combustible en cada viaje, entendiendo viaje como dos detenciones consecutivas con el motor sin contacto por más de 5 min. Luego, para el análisis estadístico de los datos se presentan los rendimientos diarios de cada bus, entre 7 y 14 días, dependiendo de la MMEE.

A.3. Proyecto 3: [2012] Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero

El presente proyecto es continuación del estudio 1, en donde se dio apoyo técnico en temas de EE a empresas del rubro del transporte de carga. En esta ocasión se trabajó en la implementación de diversas MMEE en 15 empresas, las cuales en su conjunto abarcan la operación de 2.611 vehículos. Del total de las empresas se logró medir en 5 de ellas el impacto de las MMEE implementadas.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: Se definen 15 sistemas, teniéndose uno por empresa. Cada sistema corresponde a una parte reducida de sus flotas completas, variando entre 1 y 36 vehículos, con un promedio de 8.
- Sistema extendido: Flotas de 15 empresas nacionales de transporte de carga, con un total de 2.611 vehículos.
- MMEE aplicada: Aerodinámica, Gestión de neumáticos, Gestión de ralentí, Control de velocidad, Conducción Eficiente.
- Medidor utilizado: Surtidor de combustible más odómetro o GPS.
- Precisión: El 80% de las precisiones de los datos de los distintos vehículos está entre el 1% y el 7%, para un 95% de confianza.
- Costo M&V: MM\$5.

- Línea Base: Se realizó con datos de consumo de combustible y kilometraje de cada empresa.
 - Datos utilizados: Según metodología basada en IPVMP. Se utilizan mínimo 10 datos.
 - Factores estáticos: Composición de la flota, tipo de operación.
- Periodo demostrativo de ahorros: Se realiza con distinto número de viajes para cada empresa, con un mínimo de 3 y un máximo de 28.
- Ajuste de Base: Sin información.
- Impacto: El impacto medido en el consumo de combustible estuvo entre 1 y 9%, por empresa (las 5 que se lograron medir), con un promedio de 3,8%.
- Potencial de ahorro: Se realizó con los datos demostrativos de ahorro de las 5 empresas que realizaron el periodo demostrativo de ahorros, más ahorro estimado para las 10 que no lo realizaron, en una situación favorable de éxito de las iniciativas.
- Periodos típicos de medición: En algunos casos es por viaje, y en otros son datos mensuales. Se tiene entre 2 y 36 repeticiones.

A.4. Proyecto 4: [2012] Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago

El presente estudio es la continuación del Estudio 2, en donde se sigue buscando mejorar los estándares de gestión energética en el sector del transporte de pasajeros. En particular, en este proyecto se continuó el trabajo con la empresa Alsacia Express, operador de servicios del Sistema de Transporte Público de Santiago. En el proyecto se implementaron MMEE en dos depósitos completos, para los cuales se realizó un plan de M&V utilizando como base los consumos de combustible y kilómetros recorridos registrados por la empresa.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: En este estudio se aplican MMEE en los depósitos Pudahuel y Maipú de la empresa Alsacia-Express.
- Sistema extendido: En este estudio no se realizan proyecciones a ningún sistema extendido.
- MMEE aplicada: Gestión de ralenti.
- Medidor utilizado: Surtidor de combustible más odómetro.
- Precisión: Entre 2,8% y 4,6% para LB y entre 1,9% y 2,2% para DA, con un 95% de confianza.
- Costo M&V: MM\$5.
- Línea Base:

- Datos utilizados: Datos semanales de consumo de combustible y kilometraje, recolectados durante 8 semanas.
- Factores estáticos: Operación urbana, tipo de carga (pasajeros), composición de la flota, rutas.
- Periodo demostrativo de ahorros: Datos semanales de consumo de combustible y kilometraje, recolectados durante 12 semanas.
- Ajuste de Base: Se ajusta la cantidad de kilómetros, debido a diferencias entre LB y DA. Utilizando los rendimientos del periodo de LB se calculan los litros que se habrían gastado si en ese periodo se hubiesen recorrido la misma cantidad de kilómetros que en el periodo DA, para de esta manera cuantificar la disminución en el ahorro de combustible.
- Impacto: En este estudio el impacto en el rendimiento fue un aumento de 6,4%.
- Potencial de ahorro: En el presente estudio no se estima un ahorro potencial.
- Periodos típicos de medición: se mide el rendimiento del consumo de combustible cada semana (8 semanas para LB y 12 para DA).

A.5. Proyecto 5: [2012] Programa de incentivo la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente

El presente estudio consistió en el desarrollo de una página web (www.conduccioneficiente.cl) que incentiva la adopción voluntaria de técnicas de conducción eficiente mediante su difusión. Esta página está enfocada en los conductores particulares, los del transporte de carga y los del transporte de pasajeros, dando consejos acordes a cada uno de ellos. En la página existe la posibilidad de crear cuentas de usuario, donde cada uno puede registrar datos de consumo de combustible y kilometraje, para realizar un seguimiento del aprendizaje de las técnicas. Es con estos datos registrados con los que se mide el impacto en la reducción del consumo de combustible de los vehículos de los usuarios de la página.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: Este sistema está constituido por 6 vehículos particulares, que corresponden a los de usuarios que ingresaron una mayor cantidad de datos en comparación con los otros conductores.
- Sistema extendido: Se establecen 3 posibles casos, según los usuarios que utilicen la página web. Los casos son tener 100, 500 o 1000 usuarios.
- MMEE aplicada: Conducción Eficiente a través de difusión en página web.
- Medidor utilizado: Surtidor de combustible más odómetro.

- Precisión: Entre 4,1% y 6,7%, con un 95% de nivel de confianza. Estas precisiones corresponden a las de los 2 usuarios que contaban con más de 10 datos de consumo de combustible y kilometraje.
- Costo M&V: \$MM1.
- Línea Base: En el presente estudio no se tiene una línea base claramente definida, pues los usuarios ingresan datos de consumo habiendo leído los consejos entregados por la web, es decir solo se tienen mediciones mientras la MMEE está siendo aplicada.
 - Datos utilizados: Datos de consumo y kilometraje ingresados por usuarios. Se tienen entre 2 y 24 datos por usuario, con promedio de 10.
 - Factores estáticos: Conductor, vehículo.
- Periodo demostrativo de ahorros: Periodo no claramente definido debido a lo señalado en LB. Se puede considerar el periodo demostrativo de ahorros como el periodo en donde se están ingresando los datos de consumo y kilómetros recorridos.
- Ajuste de Base: Sin información.
- Impacto: Se define una meta utilizando los 4 mejores rendimientos registrados por el usuario, y se calcula un “desahorro”, que corresponde a la diferencia entre el último rendimiento y la meta. Se señala en el informe que hay un ahorro promedio de 7%, sin embargo no está claro a qué tipo de ahorro corresponde.
- Potencial de ahorro: Se calcula el potencial para cierta cantidad de usuarios de la página web (100, 500 y 1000 usuarios), utilizando el ahorro calculado en conductores particulares, y con ahorros teóricos para conductores del transporte de carga y el de personas, ya que solo se calcula el impacto en conductores particulares.
- Periodos típicos de medición: Las mediciones se realizan de forma periódica, y dependen de cada usuario. Se tienen entre 2 y 24 datos por usuario, con promedio de 10.

A.6. Proyecto 6: [2013] Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero

El presente estudio sigue en la misma línea del Estudio 1 y 3, en donde se buscó dar apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas del transporte de carga. En este proyecto se trabajó con 16 empresas, las que involucran en su conjunto 2.384 camiones. Del total de estas, en 6 se alcanzó a medir el efecto de las MMEE aplicadas en la reducción del consumo de combustible de sus flotas.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: Se definen 11 sistemas distintos, que corresponden a las empresas que entregaron datos de consumo de combustible y kilómetros recorridos de su flota. Se utiliza entre 1 y 13 vehículos por sistema, con un promedio de 3.
- Sistema extendido: Flotas completas de las 11 empresas de los sistemas definidos.
- MMEE aplicada: En cada empresa se aplica una de las siguientes MMEE: Conducción Eficiente, Gestión de velocidad, Gestión de ralenti, Aerodinámica y Gestión de información.
- Medidor utilizado: Surtidor de combustible más odómetro y/o GPS.
- Precisión: El 80% de las precisiones de los datos de los distintos vehículos considerados en el estudio está entre el 1% y el 8%, para un 95% de confianza.
- Costo M&V: MM\$5.
- Línea Base:
 - Datos utilizados: En base a datos históricos de cada empresa se calcula el número de datos necesarios para realizar las mediciones tanto de la línea base como del periodo demostrativo de ahorro. Se realizan 7 viajes en promedio por empresa para la toma de datos (un dato por cada viaje).
 - Factores estáticos: Composición de la flota, tipo de operación, conductores, rutas, tipo de carga, condición de mantenimiento.
- Periodo demostrativo de ahorros: Se realiza la misma cantidad de mediciones que en la línea base.
- Ajuste de Base: No se mencionan ajustes de base, se supone que los factores estáticos no cambian.
- Impacto: En promedio se aumenta el rendimiento en un 6,5%.
- Potencial de ahorro: Se proyectan los datos de los camiones medidos a un año de operación normal.
- Periodos típicos de medición: Se mide el consumo de combustible de cada viaje de los camiones medidos de las distintas flotas, 7 viajes promedio.

A.7. Proyecto 7: [2013] Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago

Siguiendo la línea de los estudios 2 y 4, en este estudio se busca mejorar los estándares de gestión energética en empresas del rubro transporte de pasajeros. En esta tercera etapa se trabaja con las empresas Tur Bus, Trolebuses de Valparaíso y Expreso Norte, sin embargo solo se mide el impacto de la aplicación de MMEE en las dos primeras, debido a la falta de información en Expreso Norte que permita gestión energética.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: En el presente estudio se definen dos sistemas diferentes: 20 buses de la empresa Tur Bus y 4 trolebuses de la empresa Trolebuses de Valparaíso. Hay una tercera empresa involucrada en el estudio, sin embargo no se aplica un plan de M&V debido a no contar con información necesaria para realizar gestión energética.
- Sistema extendido: Flotas de ambas empresas (2.400 buses Tur Bus, 21 trolebuses operativos de Trolebuses de Valparaíso).
- MMEE aplicada: Control de presión de neumáticos (Tur Bus), reemplazo de vehículos antiguos (Trolebuses).
- Medidor utilizado: Surtidor de combustible (Tur Bus y Expreso Norte), odómetro (Tur Bus), cuentas de consumo eléctrico más equipo i1010 AC/DC CurrentClamp y datalogger (Trolebuses).
- Precisión: Se calcula con los rendimientos mensuales de cada vehículo del sistema, en donde el 80% de las precisiones está entre 1% y 8%, para un nivel de confianza del 95% (Tur Bus). Para las mediciones realizadas en los trolebuses se tienen precisiones entre 5,5 y 8,3%, con un 95% de nivel de confianza, cabe destacar que no se consideró la precisión del trolebús Pullman 800, por arrojar datos muy dispersos, debido probablemente a su antigüedad (1947), además es precisamente este modelo el que se pretende reemplazar en el estudio.
- Costo M&V: MM\$1 (Tur Bus). Costo de realizar mediciones utilizando equipos i1010 AC/DC CurrentClamp más datalogger, cuyo valor aproximado fue de \$100.000 por trolebús (Trolebuses).
- Línea Base:
 - Datos utilizados: Datos mensuales tomados en 5 meses (Tur Bus), datos de consumo mensual de electricidad de 15 meses (Trolebuses), registro de consumo de combustible en un mes (Expreso Norte).
 - Factores estáticos: Zonas de rutas (Tur Bus), rutas (Trolebús).
- Periodo demostrativo de ahorros: datos mensuales de 3 meses (Tur Bus), datos entre 4 y 8 vueltas a un recorrido determinado, para 3 vehículos (Trolebuses). Este periodo, no se realiza en la empresa Expreso Norte, por lo cual no se incluye en la matriz de resultados, para privilegiar las otras dos experiencias.
- Ajuste de Base: No se realizan ajustes para las mediciones de Tur Bus. Para Trolebuses se calcula una correlación entre pasajeros y consumo eléctrico (Trolebuses).
- Impacto: Se mide un 8,8% de impacto en el rendimiento en 3 buses con diferencias significativa en sus datos (Tur Bus). Se estima en un 8,3% (Trolebuses).
- Potencial de ahorro: Se extrapolan ahorros a ambas flotas usando resultados del sistema definido.

- Periodos típicos de medición: Datos mensuales por bus, 5 meses para LB y 3 meses para DA (Tur Bus). Datos tomados por vuelta, entre 4 y 8 vueltas (Trolebuses).

A.8. Proyecto 8: [2013] Programa de incentivo la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente

Este estudio es la continuación del estudio 5, en donde se continúa con la difusión de las técnicas de conducción eficiente mediante una página web (www.conduccioneficiente.cl), con la diferencia que en esta ocasión se mide el impacto de la página en la reducción del consumo de combustible que ocupan sus usuarios mediante una prueba realizada en una pista aislada con un número determinado de conductores, en donde simulamos condiciones de tránsito urbano, se controlaron los kilómetros recorridos, número de ciclos, etc.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: 12 vehículos particulares de usuarios de la página web del estudio.
- Sistema extendido: Vehículos de usuarios (vehículos particulares, de transporte de pasajeros y de transporte de carga) de la página web www.conduccioneficiente.cl.
- MMEE aplicada: Conducción Eficiente a través de difusión en página web.
- Medidor utilizado: Indicador de rendimiento del computador del vehículo.
- Precisión: El 80% de las precisiones para los datos por vuelta de cada participante está entre 2% y 5%, para un nivel de confianza del 95%.
- Costo M&V: MM\$3, considerando este costo arriendo de pista, arriendo vehículos, HH, etc.
- Línea Base:
 - Datos utilizados: Rendimiento tras recorrer 8 vueltas de un circuito determinado de 1,6 km, por conductor.
 - Factores estáticos: Ruta, conductores, vehículos, sin tráfico vehicular.
- Periodo demostrativo de ahorros: realizado de igual manera que LB.
- Ajuste de Base: No hay ajuste debido que los factores estáticos no variaron.
- Impacto: 31% de incremento en el rendimiento.
- Potencial de ahorro: Se proyecta a partir de resultados del grupo de control al total de visitantes únicos de la página web durante el 2013.
- Periodos típicos de medición: 8 vueltas a un circuito de 1,6 km.

A.9. Proyecto 9: [2011] Evaluación del Programa Cambia tu Camión

Este estudio consistió en la evaluación del Programa Cambia tu Camión, en donde se reemplazaron 144 camiones con una antigüedad superior a 20 años a través de un incentivo económico para sus propietarios, enfocado a los microempresarios del sector transporte que estuvieron dispuestos a renovar su vehículo y en ese momento no contaban con financiamiento para adquirir camiones nuevos y más eficientes. La evaluación consistió en la comparación del consumo de combustible de los camiones antiguos, los camiones nuevos, y los camiones nuevos con sus choferes capacitados en conducción eficiente.

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: 31 conductores de camiones y sus vehículos de trabajo.
- Sistema extendido: 144 conductores de camiones y sus vehículos de trabajo.
- MMEE aplicada: Recambio de camiones, y Recambio + Conducción Eficiente (CE).
- Medidor utilizado: Flujómetro más odómetro.
- Precisión: La precisión se calculó para los rendimientos finales de cada camión, arrojando una precisión del 13% para LB (camiones antiguos) y para DA 11,5% para camiones nuevos, y 11,2% para camiones nuevos + conducción eficiente.
- Costo M&V: MM\$25.
- Línea Base:
 - Datos utilizados: Se midieron los datos de consumo de combustible y kilometraje de los vehículos a renovar. Se tomaron medidas de un camión por mañana. No hay información respecto a cantidad ni frecuencia de datos.
 - Factores estáticos: Condiciones de carga, condiciones técnicas, conductor, ruta (10 km).
- Periodo demostrativo de ahorros: Se miden datos de consumo de combustible y kilometraje de vehículos nuevos, y luego de estos vehículos con conductor capacitado en CE. El impacto de ambas MMEE se mide en el mismo día que la LB. Un dato por medición por camión.
- Ajuste de Base: Normalización de los rendimientos por el Peso Bruto Vehicular (PBV), para aislar efectos de las cargas.
- Impacto: Se tiene un impacto en el rendimiento de 19,3% (camión nuevo) y 32% (camión nuevo + CE) (sin normalizar), 5,5% (camión nuevo) y 22% (camión nuevo + CE) (normalizado por PBV).
- Potencial de ahorro: Con datos de la muestra se estima el ahorro anual de todos los beneficiarios del programa (144 conductores).

- Periodos típicos de medición: Se tiene un dato de consumo y kilometraje tanto para LB como para el DA de cada MMEE, por cada camión.

A.10. Proyecto 10: [2013] Cofinanciamiento de dispositivos aerodinámicos para vehículos de transporte de carga caminero

Este estudio consistió en el incentivo a la compra e instalación de dispositivos aerodinámicos para vehículos del transporte de carga caminero, mediante el cofinanciamiento por parte de la AChEE de un porcentaje del valor de los dispositivos, sujeto al cumplimiento de las bases del programa. En concreto, en esta revisión se analiza el trabajo realizado con dos empresas transportistas (Transportes Transgesa y Transportes Travasa).

A continuación se muestra el detalle de la revisión del estudio, en base a los elementos descritos en la sección 2.3.2.2:

- Sistema definido: 5 camiones (Transgesa), 2 camiones (Travasa).
- Sistema extendido: 49 camiones (Transgesa), 15 camiones (Travasa).
- MMEE aplicada: Faldones laterales (ambas empresas).
- Medidor utilizado: Surtidor de combustible más odómetro o GPS (ambas empresas).
- Precisión: 3,1% para LB y 3,3% para DA (Transgesa),
- Costo M&V: MM\$10.
- Línea Base:
 - Datos utilizados: Datos históricos de las empresas, tomados por viaje. Se utilizaron rendimientos de 5 vehículos (un dato de rendimiento por vehículo, empresa Transgesa) y datos de rendimientos de dos vehículos (9 y 22 rendimientos de viajes, empresa Travasa).
 - Factores estáticos: Conductores, tipo de operación, rutas, tipo de carga, tipo de plataformas, clientes,
- Periodo demostrativo de ahorros: 3 mediciones de rendimientos de viajes por vehículo, que da un total de 15 mediciones (Transgesa), rendimientos de 2 vehículos, 9 y 19 viajes respectivamente
- Ajuste de Base: Sin ajuste debido a que los factores estáticos no variaron.
- Impacto: Entre 0,2% y 13,3%, con promedio de 6,7% (Transgesa), no hay diferencias estadísticamente significativas para los datos de LB y DA (Travasa).
- Potencial de ahorro: Se aplica el ahorro obtenido al consumo anual de la flota de cada empresa.
- Periodos típicos de medición: Mediciones por viaje, entre 5 y 22 viajes registrados.

A.11. Proyecto 11: [2012] Desarrollo de mecanismos económicos y regulatorios que incentiven mejoras tecnológicas en vehículos existentes

En el presente estudio no se cuantifica la disminución de consumo de energía producto de la aplicación de alguna MMEE, sin embargo aporta elementos a considerar en el diseño de la nueva metodología de M&V para el transporte.

En este proyecto se diseña un sistema de certificación con cobertura nacional, que permite evaluar las distintas tecnologías disponibles en el mercado que aportan en la disminución del consumo de combustible en vehículos de transporte de carga por carretera. Con el fin de comprobar el impacto de estos productos, se propone realizar dos tipos de ensayos, de acuerdo al tipo de tecnología, cuya clasificación se muestra a continuación:

- a) Dispositivos que actúan sobre el modo de conducción: dispositivos que informan al conductor, o que actúan directamente sobre algún parámetro que determina una forma de conducción poco eficiente desde el punto de vista del consumo de combustible.
- b) Dispositivos que actúan sobre la aerodinámica del vehículo.
- c) Neumáticos, llantas y accesorios o repuestos para estas.
- d) Dispositivos de inyección de aire: Corresponden a los dispositivos que permiten que ingrese aire adicional al manifold de entrada del aire de mezcla, modificando la relación aire-combustible.
- e) Dispositivos de inyección de vapor: Dispositivos que permiten el ingreso de vapor al manifold de entrada del aire de mezcla o al sistema de inyección de combustible, generalmente pasando el aire inyectado a través de una cámara con una mezcla de agua y anticongelante.
- f) Dispositivos de inyección de elementos líquidos: Dispositivos que permiten el ingreso de elementos líquidos al manifold de entrada del aire de mezcla o al sistema de inyección de combustible, y no directamente a la cámara de combustión.
- g) Dispositivos que actúan sobre el sistema de ignición: Dispositivos que van adjuntos al sistema de ignición, utilizados para reemplazar equipamientos originales o repuestos. Ejemplos de esta categoría son dispositivos que regulan el voltaje de la chispa de encendido, generan campos magnéticos que mejoran el proceso en la cámara de combustión, etc.
- h) Dispositivos que actúan sobre la manguera de distribución de combustible sin estar en contacto directo con ella.
- i) Dispositivos que modifican la relación de mezcla de aire/combustible.
- j) Dispositivos que actúan sobre los accesorios del vehículo controlando o reduciendo la potencia administrada a estos.

- k) Modificadores de la configuración original del motor.
- l) Combustibles y aditivos de combustibles: Combustibles, de cualquier octanaje y todos los productos que sean aplicados directamente o indirectamente sobre el combustible para modificar sus propiedades.
- m) Lubricantes y aditivos de lubricantes: Lubricantes de origen natural y/o sintético, además de otros productos aplicados directa o indirectamente sobre el lubricante para modificar sus propiedades.
- n) Dispositivos que no califiquen dentro de las anteriores categorías.

De acuerdo a esto, los tipos de ensayos propuestos son:

- i. Ensayos en ruta: Se propone que los dispositivos de las categorías a, 2 y 3 sean evaluados en un ensayo en ruta de acuerdo a la norma NCh3331, la que entrega un método para determinar el consumo de combustible para vehículos del transporte terrestre.
- ii. Ensayos en dinamómetro de chasis: Se propone que los dispositivos de las categorías 4 a la 13 sean evaluados con ensayos en dinamómetro de chasis, de acuerdo a lo planteado por el Code of Federal Regulations (CFR), usando un ciclo de conducción “Heavy Duty Urban Dynamometer Driving Schedule” procedimiento señalado en “40 CFR part 86, subpart B”. Ya que de esta forma se puede medir el impacto adicional que tienen las tecnologías en las emisiones de contaminantes.
- iii. Además se señala que si un producto estuviera en más de una categoría, primarán las categorías 1, 2 y 3 para determinar el tipo de ensayo al que debe someterse el vehículo.

A.12. Matriz resumen

En esta sección se presenta una matriz resumen de la revisión de proyectos AChEE. En la Tabla 29 se muestra la identificación de los proyectos revisados, mientras que en la se muestra una matriz resumen.

Tabla 29. Identificación de proyectos.

N° de proyecto	ID	Nombre proyecto	Año
1	TCO	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2011
2	TP1	Mejora de Estándares de gestión energética de Buses en Santiago	2011
3	CTC	Evaluación del Programa Cambia tu Camión	2011
4	TC1	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2012
5	TP2	Servicio para Incentivar la Mejora de Estándares de Gestión Energética de Buses en Santiago	2012
6	ICE1	Programa de incentivo la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente	2012
7	TC2	Apoyo técnico en la elaboración e implementación de planes de eficiencia energética en empresas de transporte caminero	2013
8	TP3	Apoyo Técnico en la Elaboración e Implementación de Planes de Eficiencia Energética en Empresas de Transporte de Pasajeros	2013
9	ICE2	Servicio de Mantenimiento del Sitio Web de Adopción Voluntaria de las Técnicas de Conducción Eficiente www.conduccioneficiente.cl	2013
10	AP	Cofinanciamiento de Dispositivos Aerodinámicos para Vehículos de Transporte de Carga Caminero	2013

Adicionalmente se muestra la simbología utilizada:

- S/I: Sin información
- N/A: no aplica
- LB: Línea Base
- DA: Demostrativo de Ahorro
- PBV: Peso Bruto Vehicular
- IC: Intervalo de confianza
- CC: Consumo de combustible

Tabla 30. Matriz resumen de estudios de la AChEE en el periodo 2011-2013.

ID	Sistema definido	Sistema extendido	MMEE aplicada	Medidor	Precisión ¿cuánto?		Nivel de confianza	Costo M&V
					LB	DA		
TC0	N/A	2.496 vehículos (14 empresas)	N/A	Surtidor de combustible	N/A		N/A	Costo de gestionar datos históricos
TP1	20 buses de la empresa Alsacia, en promedio 3 buses por cada MMEE	704 buses	Control electromecánico de la aceleración, Monitoreo Explícito, Conducción Eficiente, Corte Ralentí sobre 3 min, Optimización electrónica de cada de cambios, Control mecánico de aceleración, Restricción RPM	Equipo de medición on-board	S/I		S/I	Entre 1,8 y 3,7 UF mensual, por bus, más costo por gestionar datos históricos
TC1	14 sistemas distintos (uno por empresa). Entre 1 y 36 camiones por sistema	2.500 camiones (14 empresas)	Aerodinámica, Gestión de neumáticos, Gestión de ralentí, Control de velocidad, Conducción Eficiente	Surtidor de combustible, odómetro, gps	El 80% de las precisiones está entre 1% y 7%		95%	Costo de gestionar datos de consumo de combustible y kilometrajes
TP2	2 depósitos de empresa Alsacia-Express	N/A	Gestión de ralentí, Conducción Eficiente	Surtidor de combustible, odómetro	Entre 2,82% y 4,60%	Entre 1,91% y 2,15%	95%	Costo de gestionar los datos de consumo de combustible y kilometrajes
ICE1	6 vehículos particulares de usuarios de página web	100, 500 y 1000 vehículos	Conducción Eficiente	Surtidor de combustible, odómetro	Entre 4,1% y 6,7%		95%	Costo de mantener la herramienta de seguimiento de la página web
TC2	11 sistemas distintos (empresas que entregaron datos de CC y kilometraje), entre 1 y 13 camiones, con 3 promedio	Flotas de las 11 empresas	Conducción Eficiente, Gestión de velocidad, Gestión de ralentí, Aerodinámica y Gestión de información	Surtidor de combustible, odómetro	El 80% de las precisiones está entre el 1% y el 8%		95%	Costo de gestionar datos de consumo de combustible y kilometrajes
TP3	20 buses	2.400 buses	Control de presión de neumáticos	Surtidor de combustible, odómetro	El 80% de las precisiones está entre 1% y 8%		95%	Costo de gestionar datos de consumo de combustible y kilometrajes
TP3	4 trolebuses	Flota de 21 trolebuses operativos	Reemplazo de vehículos antiguos	Cuentas de consumo eléctrico, equipo i1010 AC/DC CurrentClamp y datalogger	Entre 5,5% y 8,3%	N/A	95%	Costo de medir con equipo i1010 AC/DC CurrentClamp más datalogger (\$100.000 por trolebús)
ICE2	12 vehículos particulares	Vehículos de usuarios de página web	Conducción Eficiente	Monitor del vehículo	El 80% de las precisiones está entre 2% y 5%		95%	\$250.000 por vehículo
CTC	31 conductores de camiones y sus vehículos de trabajo	Conjunto de 144 conductores de camiones y sus veh.	Recambio de camiones y Recambio + Conducción Eficiente	Flujómetro, odómetro	13%	Entre 11,2% y 11,5%	95%	\$200.000 por test

ID	Línea base		Periodo demostrativo de ahorro	Ajuste de base	Impacto en rendimiento	Potencial de ahorro	Periodos típicos de medición
	Datos utilizados	Factores estáticos					
TC0	Datos del consumo anual de cada empresa	N/A	N/A	N/A	N/A	Metas de ahorro definidas por cada empresa, corregidas por el consultor, aplicadas al consumo anual de cada empresa	N/A
TP1	Datos diarios tomados entre una y dos semanas dependiendo de la MMEE evaluada	Conductor, ruta, horario de operación, vehículo	Datos diarios tomados entre una y dos semanas dependiendo de la MMEE evaluada	Se ajusta con un bus patrón para cada MMEE	Entre 0,6% y 15,9%, promedio 7,8%	Se extrapola al resto de la flota, aplicando 3 factores de corrección: probabilidad asociada al IC, casos de disminución significativa sobre casos medidos y % de flota donde es aplicable la MMEE	Por día, durante una o dos semanas, dependiendo de la MMEE
TC1	Datos de CC y kilometraje entregados por empresa	Composición de la flota, tipo de operación	Nº de viajes distinto para cada empresa. Valores entre 3 y 28 viajes	S/I	Entre 1 y 9 %, promedio 3,8%	Utilizó datos de ahorro de las 5 empresas que realizaron DA, y ahorro estimado de 10 que no realizaron DA.	Datos por viaje o mensuales. Entre 2 y 36 repeticiones
TP2	Datos de CC y kilometraje semanales, medidos en 8 semanas	Operación urbana, tipo de carga (pasajeros), composición de la flota, rutas	Datos de CC y kilometraje semanales, medidos en 12 semanas	Se ajusta la cantidad de kilómetros, debido a diferencias entre LB y Ex-Post	6,4%	N/A	Por semana, 8 para LB y 12 para DA
ICE1	Datos de consumo y kilometraje ingresados por usuarios.	Conductor, vehículo.	Periodo no claramente definido, en donde se calcula diferencia entre meta y último consumo. Un dato por conductor particular	S/I	7% (no claramente definido)	Se extrapola con datos medidos, más datos teóricos para los otros tipos de conductores (transporte de carga y de personas)	Por cada llenado de estanque
TC2	Datos de viajes (promedio 7 por empresa)	Composición de la flota, tipo de operación, conductores, rutas, tipo de carga, condición de mantenimiento	Datos de viajes (promedio 7 por empresa)	S/I	6,5% en promedio	Se proyectan los datos de los camiones medidos a un año de operación normal	Por viaje, promedio 7 por empresa
TP3	Datos históricos de 5 meses. Datos de rendimiento por bus.	Zona de las rutas	Rendimientos mensuales por bus, medidos en 3 meses	S/I	4,4% (en 3 buses en que la diferencia fue significativa)	Se extrapola a flota completa usando resultados del sistema definido	Datos mensuales por bus de 5 meses para LB y 3 meses para DA
TP3	Datos mensuales de 15 meses.	Rutas	6 vueltas promedio a un recorrido determinado	Correlación entre pasajeros y consumo eléctrico	8,3%		Datos por vuelta, entre 4 y 8 vueltas
ICE2	Rendimiento tras recorrer 8 vueltas a un circuito de 1,6 km, por conductor	Ruta, conductores, vehículos, sin tráfico vehicular	Cada conductor realizó 8 vueltas a un circuito de 1,6 km	Sin ajuste debido a que los factores estáticos no variaron	31%	Se proyecta a partir de resultados del grupo de control al total de visitantes únicos de la página web durante el 2013	8 vueltas al circuito, tanto en LB como Ex-Post
CTC	Rendimiento de camiones a renovar, tomados en una mañana por camión	Condiciones de carga, condiciones técnicas, conductor, ruta	2 Mediciones, una para camiones nuevos, y otra para camiones nuevos con conductores capacitados	Se normaliza por PBV	19,3% y 32% (sin normalizar), 5,5% y 22% (normalizado por PBV)	Se estima ahorro anual de todo el sistema extendido utilizando los resultados de las mediciones	Un dato para LB y un dato para cada MMEE, por camión

Anexo B

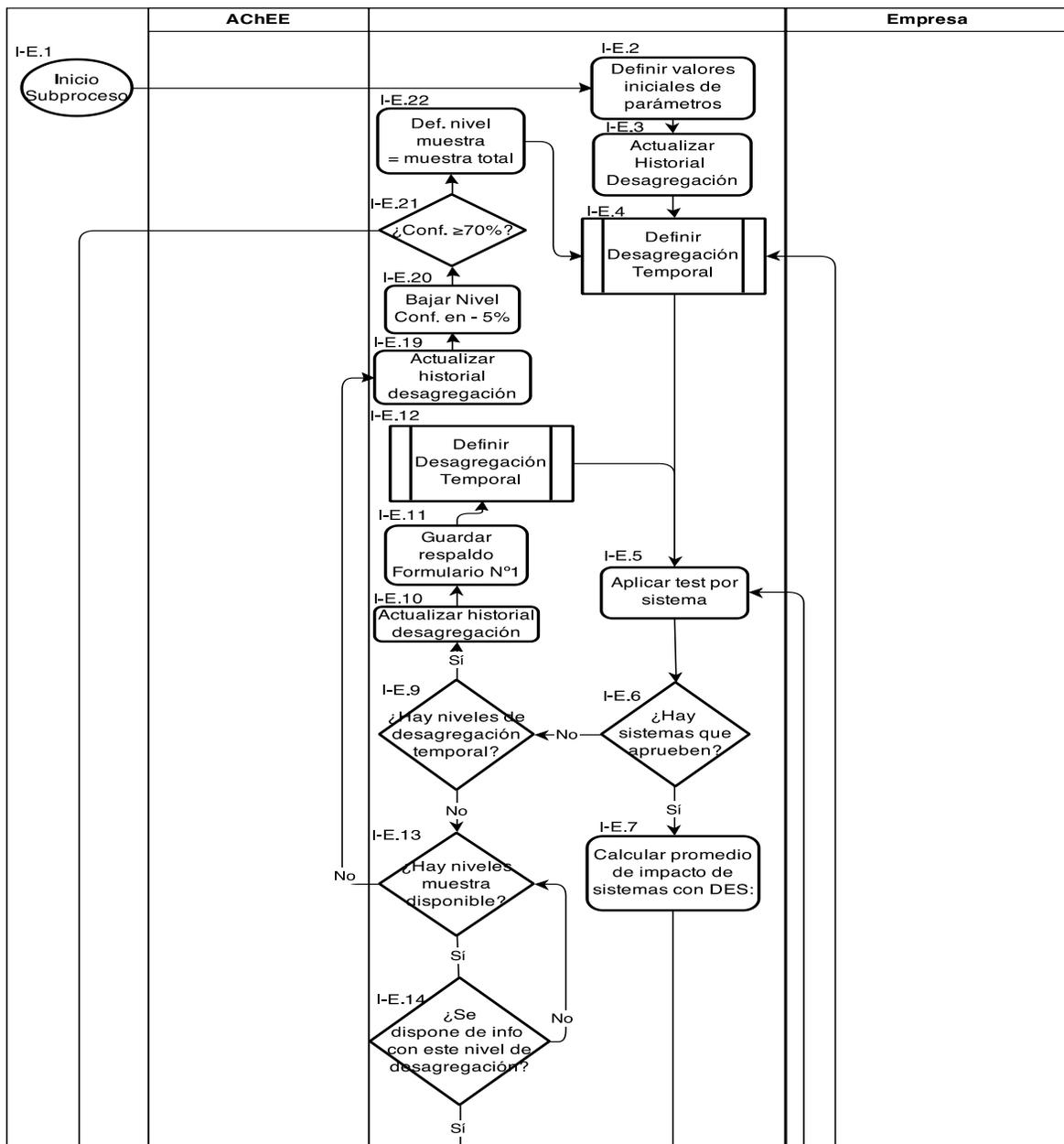
Protocolo de cuantificación de reducción de consumo energético para el transporte

B.1. Subproceso de análisis estadístico

A continuación se muestra el subproceso de análisis estadístico del Protocolo de cuantificación de reducción de consumo energético para el transporte, el cual fue aplicado a los proyectos de la AChEE del periodo 2011 – 2013.

Subproceso:

Análisis Estadístico



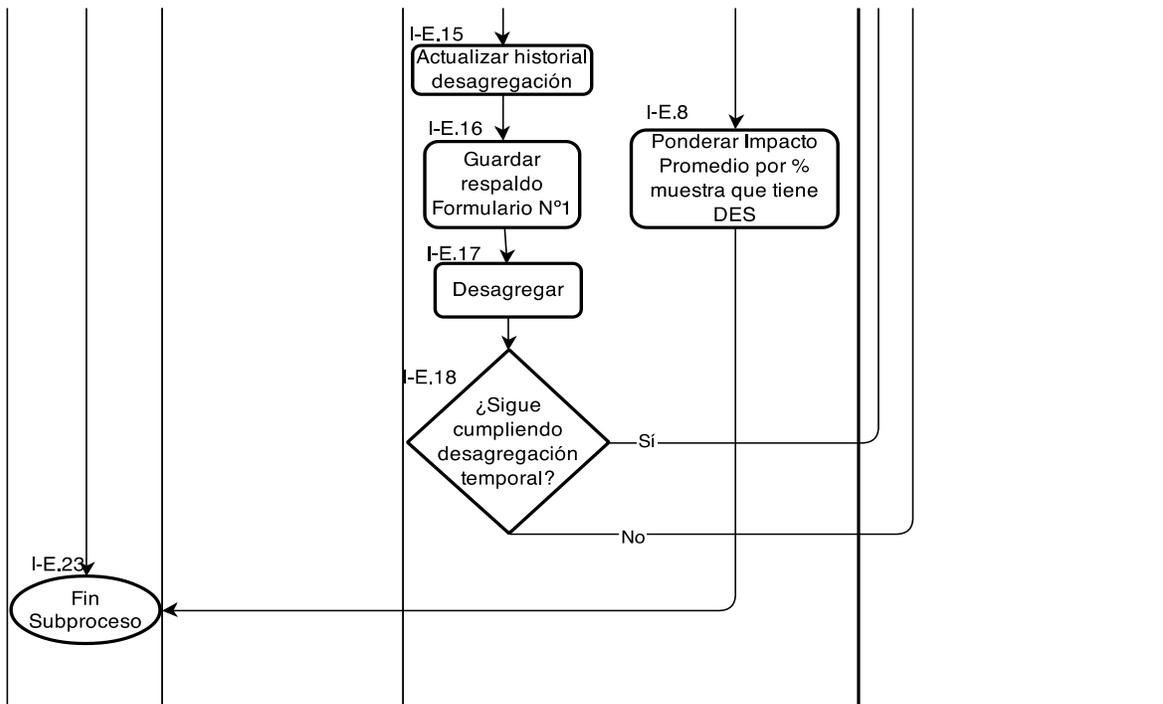


Figura 66. Flujo del subproceso Análisis Estadístico.

A continuación se describe cada paso de este proceso.

I-E.1. Inicio subproceso: Comienza este subproceso.

I-E.2. Definir valores iniciales de parámetros: Se determinan los parámetros iniciales de tiempo, sistema y nivel de confiabilidad. El parámetro tiempo es mes, el de sistema es muestra total y el nivel de confiabilidad 90%. Estos parámetros irán cambiando mientras se realiza el análisis estadístico.

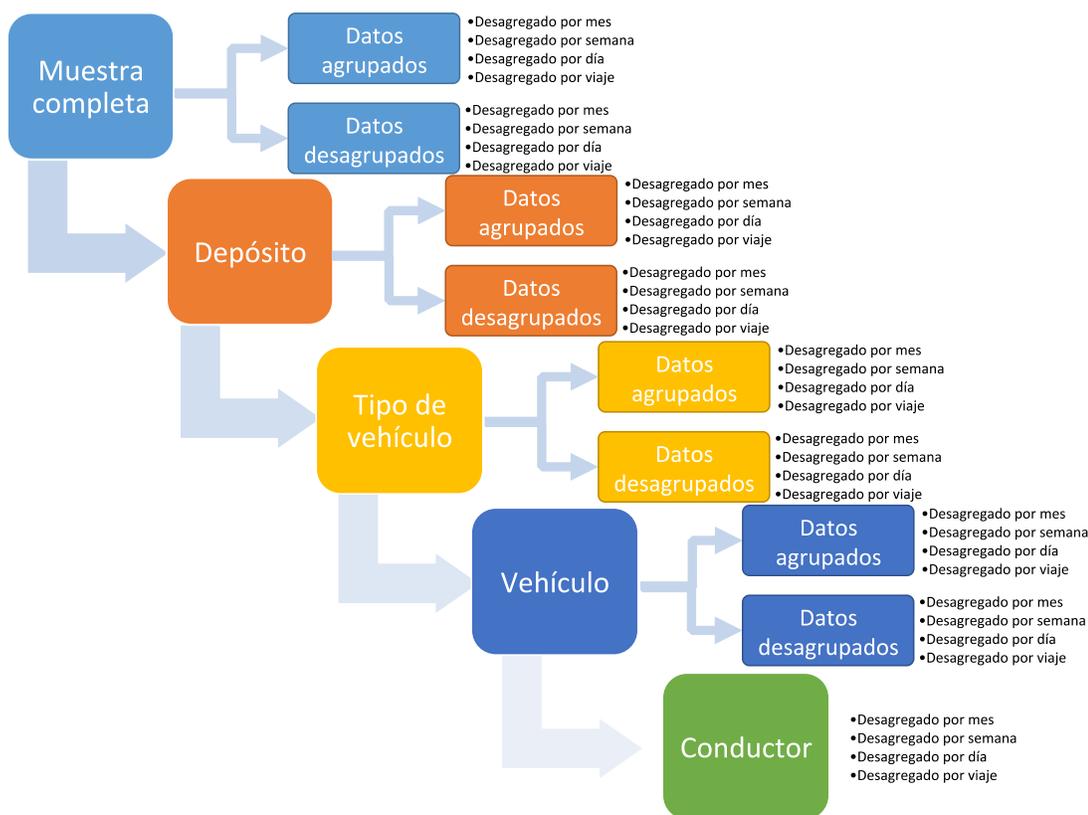
I-E.3. Actualizar historial de desagregación: se actualiza la tabla Historial de desagregación del formulario N°1. Por desagregación se tienen tres ámbitos: desagregación de muestra, desagregación grupal y desagregación temporal. Para la desagregación de muestra tenemos la siguiente jerarquización:

- Muestra completa: Se comparan los datos de LB con los de DA de toda la muestra,
- Depósito: Corresponde a analizar los datos según depósito de las empresas. Por depósito se entiende a un lugar físico donde se almacenan y gestiona la operación y mantención de los vehículos.
- Tipo de vehículo: Corresponde a analizar los datos de cada tipo vehicular por separado. Los tipos vehiculares son los que aparecen en el formulario N°2 *Caracterización*.
- Vehículo: Corresponde a analizar los periodos de LB y DA de cada vehículo por separado.
- Conductor: En caso de que un vehículo haya sido manejado por más de un conductor se pueden analizar los datos según conductor.

Es importante señalar que si se tienen datos de combustible de cada vehículo se tienen que trabajar por separado como sistemas diferentes.

Por otro lado la desagregación grupal consiste en analizar los datos agrupados o desagrupados para los distintos niveles de tiempo de la desagregación temporal (mes, semana, día o viaje). Por agrupación se entiende a obtener la tasa de consumo total del periodo temporal dividiendo la suma de litros de combustible por la suma de kilómetros del respectivo periodo temporal¹⁶. Se tomará cada tipo de agrupación cuando se tengan una cantidad mayor o igual a 3 de cada periodo temporal, priorizando el orden mostrado anteriormente. Si es que los datos no se pueden agrupar se puede tomar cada valor por separado. Por ejemplo si se tienen datos consumo y kilómetros recorridos por semana de varios vehículos por separado, y estamos analizando las tasas de consumo al nivel muestral de *Muestra completa*, si al agrupar por semana (para la tasa de consumo de la semana 1 se divide la suma de los litros consumidos por la suma de los kilómetros recorridos de todos los vehículos) se tiene menos de 3 semanas, entonces se deben tomar las semanas de los vehículos por separado, pudiendo tener varios datos de tasas de consumo de una misma semana.

Los tipos de desagregación y su jerarquización se pueden observar en la Figura 67.



¹⁶ En la práctica no se pueden agrupar los datos de viajes puesto que se realizan en momentos diferentes.

Figura 67. Niveles de desagregación que se aplican.

I-E.4. Definir Desagregación Temporal: En este subproceso se define la desagregación temporal de las repeticiones, esta puede ser por mes, por semana, por día o por viaje. Referirse al subproceso homónimo descrito más adelante.

I-E.5. Aplicar test por sistema: Se debe calcular el promedio, la desviación estándar y contar el número de datos de las tasas de consumo¹⁷, tanto para LB como DA, para el sistema elegido. Los tipos de sistema son, de más agregados a menos agregados (más desagregados), los siguientes:

- a. Muestra total
- b. Tipo vehículo
- c. Vehículo
- d. Conductor (solo si se tienen los datos de consumo por conductor)

Una vez sean calculados los parámetros descritos en un principio (promedio, desviación estándar y contar datos), se aplica automáticamente el test T para el sistema correspondiente utilizando la tabla Análisis estadístico de los datos, del Formulario 1, y se pasará desde el sistema más global al más particular hasta que se logren Diferencias Estadísticamente Significativas (DES).

I-E.6. ¿Hay sistemas que aprueben?: Se verifica si es que hay al menos un sistema que haya pasado el test T.

I-E.7. Calcular promedio de impacto de sistemas con DES: Se calcula el impacto promedio de los sistemas que tengan diferencias estadísticamente significativas y luego se verifica que dicha condición (DES) se siga cumpliendo.

I-E.8. Ponderar impacto promedio por porcentaje de muestra que tiene DES: se pondera el impacto promedio por el porcentaje de la muestra que tiene diferencias estadísticamente significativas. Por ejemplo: Si tengo una muestra de 100 camiones o sistemas y de ellos 10 tienen DES con un ahorro promedio del 10%, entonces el impacto resultante equivale a $10\% * 10\% = 1\%$.

I-E.9. ¿Hay niveles de desagregación temporal? Verificar si es que hay más niveles de desagregación temporal disponibles.

I-E.10. Actualizar historial desagregación: Se debe completar la tabla Historial de Desagregación completando los campos con la información correspondiente a la última iteración realizada. Si no hay niveles de desagregación disponibles, de todas formas se debe actualizar el historial para que quede un registro de que se analizaron los datos con cierta combinación de nivel de confiabilidad y nivel de desagregación.

I-E.11. Guardar respaldo formulario N°1: Se debe respaldar el formulario antes de ser modificado.

I-E.12. Definir Desagregación Temporal: Se pasa a analizar los datos en el siguiente nivel de desagregación temporal disponible.

¹⁷ La tasa de consumo se calcula dividiendo los litros consumidos por los kilómetros recorridos de la desagregación temporal que corresponda por 100.

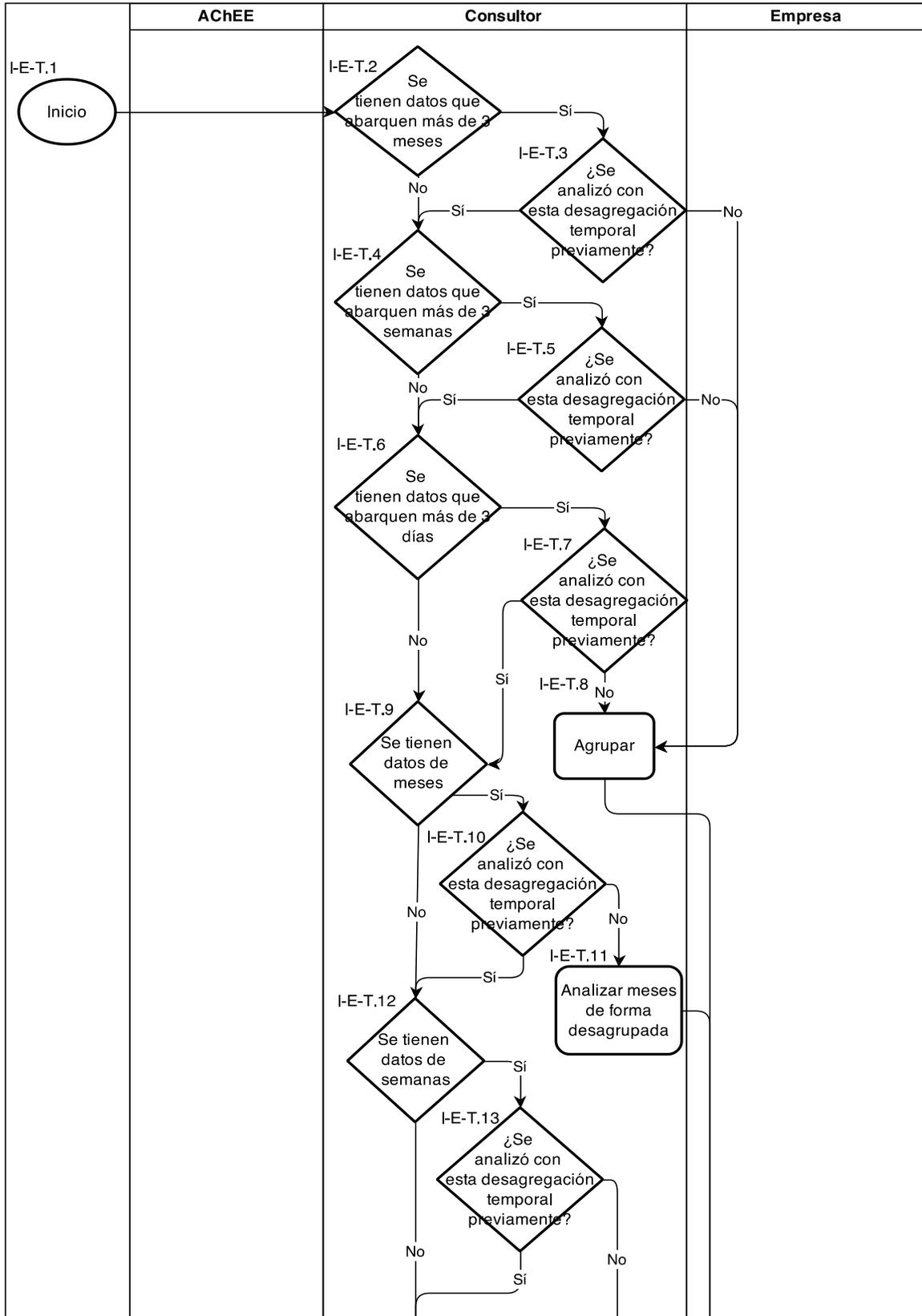
- I-E.13. ¿Hay niveles muestra disponible?:** Verificar si no se han agotado todos los niveles de desagregación definidos. Los niveles son, consecutivamente: Flota, Tipo vehículo, Vehículo, Conductor.
- I-E.14. ¿Se dispone de información con este nivel de desagregación?:** Comprobar si es que hay información disponible a este nivel de desagregación.
- I-E.15. Actualizar historial desagregación:** Se debe completar la tabla Historial de Desagregación completando los campos con la información correspondiente a la última iteración realizada.
- I-E.16. Guardar respaldo formulario N°1:** Se debe respaldar el formulario antes de ser modificado.
- I-E.17. Desagregar:** Aplicar el nivel de desagregación elegido previamente.
- I-E.18. ¿Siguiendo cumpliendo desagregación temporal?** Verificar si con el nivel de desagregación de sistema elegido hay más de 3 datos temporales para la escala temporal que se esté aplicando (3 semanas, 3 días o 3 viajes, según sea el caso). Esta es la cantidad mínima de datos recomendada¹⁸. Si no existe, la muestra es insuficiente y no se puede utilizar este nivel de desagregación.
- I-E.19. Actualizar historial desagregación:** Se debe completar la tabla Historial de Desagregación completando los campos con la información correspondiente a la última iteración realizada.
- I-E.20. Bajar nivel de confiabilidad en -5%:** Bajar el nivel de confiabilidad en un 5%.
- I-E.21. ¿Conf. $\geq 70\%$?:** Si la confiabilidad no es mayor 70%, que es el mínimo recomendado por IPMVP, se detiene el análisis y se concluye que no existes diferencias estadísticamente significativas.
- I-E.22. Definir nivel muestra = muestra total:** Se establece que el nivel de desagregación por sistema es flota.
- I-E.23. Fin subproceso:** Se da por finalizado el subproceso.

B.2. Subproceso de definición de desagregación temporal

A continuación se muestra el proceso de definición de desagregación temporal, el cual es parte del proceso de análisis estadístico. Este subproceso permite determinar con qué si se agruparán los datos de forma mensual, semanal, diaria o por viaje. El flujo se muestra en la Figura 68.

¹⁸ Aunque con dos datos es posible aplicar el test, la dispersión resulta demasiado alta. Se ha tomado el ejemplo de la Norma NCh 3331 que exige al menos 3 repeticiones para considerar un resultado de diferencia significativa válido.

Subproceso:
Definir Desagregación Temporal



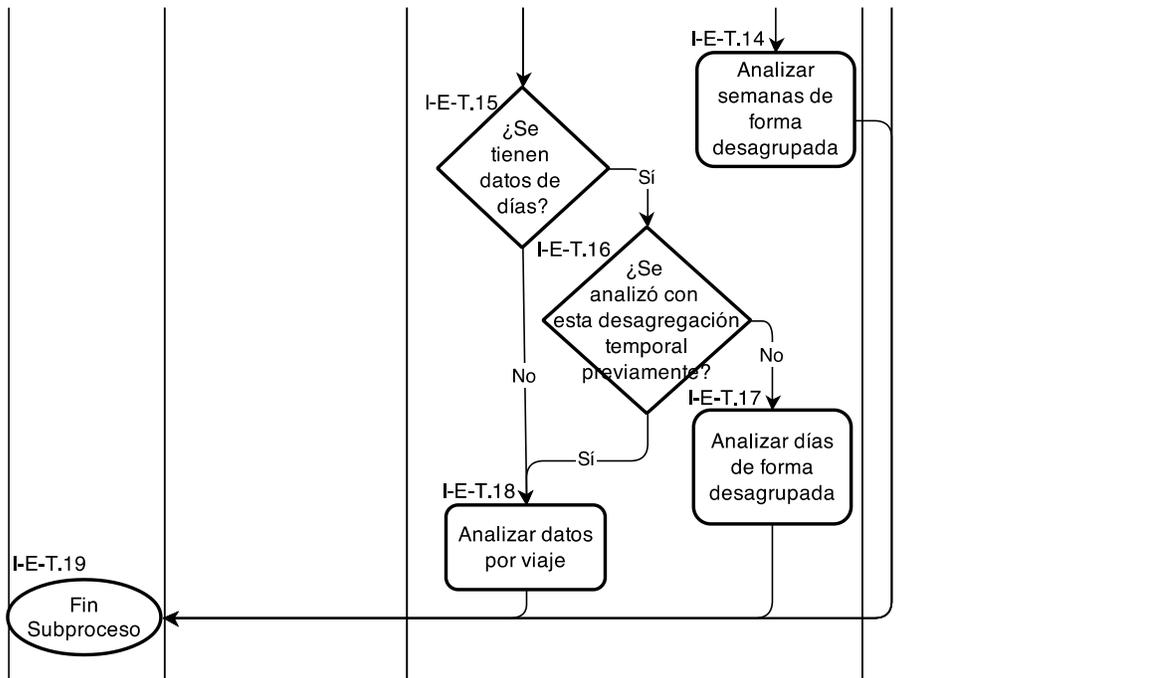


Figura 68. Flujo del subproceso de desagregación temporal.

A continuación se describe cada paso de este proceso.

I-E-T.1. Inicio: Se inicia este subproceso.

I-E-T.2. ¿Se tienen datos de más de 3 meses?: Verificar si se tienen datos de 3 o más meses para realizar análisis estadístico.

I-E-T.3. ¿Se analizó con esta desagregación temporal previamente? Verificar si esta desagregación temporal ya fue analizada previamente en el proceso de Análisis Estadístico.

I-E-T.4. ¿Se tienen datos que abarquen más de 3 semanas?: Verificar si se tienen datos de 3 o más semanas para realizar análisis estadístico.

I-E-T.5. ¿Se analizó con esta desagregación temporal previamente? Verificar si esta desagregación temporal ya fue analizada previamente en el proceso de Análisis Estadístico.

I-E-T.6. ¿Se tienen datos que abarquen más de 3 días?: Verificar si se tienen datos de 3 o más días para realizar análisis estadístico.

I-E-T.7. ¿Se analizó con esta desagregación temporal previamente? Verificar si esta desagregación temporal ya fue analizada previamente en el proceso de Análisis Estadístico.

I-E-T.8. Agrupar: Agrupar los datos de acuerdo al nivel de desagregación temporal elegido. Se debe crear una tabla con los campos del formulario 1 y se deben sumar los kilómetros y litros del nivel de desagregación temporal correspondiente para calcular las tasas de consumo agrupadas.

I-E-T.9. Se tienen datos de meses: Verificar si se tienen datos de consumo y kilometraje correspondientes a meses (esto pasa cuando la empresa entrega los datos de esta manera previamente).

- I-E-T.10. ¿Se analizó con esta desagregación temporal previamente?**
Verificar si esta desagregación temporal ya fue analizada previamente en el proceso de Análisis Estadístico.
- I-E-T.11. Analizar meses de forma desagrupada:** Los datos de meses deben ser analizados de forma desagrupada.
- I-E-T.12. Se tienen datos de semanas:** Verificar si se tienen datos de consumo y kilometraje correspondientes a semanas (esto pasa cuando la empresa entrega los datos de esta manera previamente).
- I-E-T.13. ¿Se analizó con esta desagregación temporal previamente?**
Verificar si esta desagregación temporal ya fue analizada previamente en el proceso de Análisis Estadístico.
- I-E-T.14. Analizar semanas de forma desagrupada:** Los datos de semanas deben ser analizados de forma desagrupada.
- I-E-T.15. Se tienen datos de días:** Verificar si se tienen datos de consumo y kilometraje correspondientes a días (esto pasa cuando la empresa entrega los datos de esta manera previamente).
- I-E-T.16. ¿Se analizó con esta desagregación temporal previamente?**
Verificar si esta desagregación temporal ya fue analizada previamente en el proceso de Análisis Estadístico.
- I-E-T.17. Analizar días de forma desagrupada:** Los datos de días deben ser analizados de forma desagrupada.
- I-E-T.18. Analizar datos por viaje:** Se procede a analizar los datos por viaje.
- I-E-T.19. Fin Subproceso:** Finaliza este subproceso. Se debe regresar al subproceso *Análisis Estadístico*.

B.3. Formulario N°8 Registro de datos

Este formulario contiene el registro de los datos tomados en los periodos de Línea Base y Demostrativo de Ahorros. Se registra la fecha, litros consumidos de combustible y kilómetros recorridos de cada repetición, y a su vez se calculan los rendimientos y tasas de consumo asociados a estos.

Formulario 8: Registro Medición

Proyecto:

Empresa:

Año Ejecución:

Datos que fueron estimados y modelo utilizado:

Describir Ajustes de Base realizados:

Depósito	Tipo vehículo	Vehículo	Conductor	Línea Base					Demostrativo de ahorro				
				Fecha	Litros	Kilómetros	Rendimiento [km/lit]	Tasa de consumo [lit/100*km]	Fecha	Litros	Kilómetros	Rendimiento [km/lit]	Tasa de consumo [lit/100*km]

Parte 1

Datos Generales de la Medición

Repeticiones efectivamente realizadas Línea Base	
Repeticiones efectivamente realizadas Demostrativo Ahorros	
Medidor de consumo	
Medidor de KM	
Medidor de TON	

Análisis Línea Base

Promedio [lt/100*km]	
Desviación estándar [lt/100*km]	
Repeticiones	
Nivel de confiabilidad [%]	90%
Intervalo de confianza [lt/100*km]	
Intervalo de confianza [%]	

Análisis Demostrativo de Ahorro

Promedio [lt/100*km]	
Desviación estándar [lt/100*km]	
Repeticiones	
Nivel de confiabilidad [%]	90%
Intervalo de confianza [lt/100*km]	
Intervalo de confianza [%]	

B.4. Formulario N° 1 Análisis estadístico

Este formulario contiene el análisis estadístico que permite determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los periodos de Línea Base y Demostrativo de Ahorro dado un cierto nivel de confiabilidad. Las celdas que deben llenarse son las que se encuentran en blanco, las cuales se llenan con la información obtenida en el Formulario 8 Registro de Medición.

Formulario 1: Análisis Estadístico

Proyecto:

Empresa:

Año Ejecución:

Datos

Flota	Tipo de vehículo	Vehículo	Conductor	Línea Base					Demostrativo de ahorro				
				Fecha	Litros	Kilómetros	Rendimiento [km/lt]	Tasa de consumo [lt/100*km]	Fecha	Litros	Kilómetros	Rendimiento [km/lt]	Tasa de consumo [lt/100*k m]

Análisis estadístico de los datos

Análisis estadístico	Unidad	LB	DA	Impacto en TdC [l/100*km]			Impacto en Rendimiento [km/lt]
TdC ¹⁹ promedio	[lt/100*km]			Imp ²⁰ absoluto		±	
Desviación estándar	[lt/100*km]			mín			
Repeticiones	-			max			
Confiabilidad	-			Impacto %		±	
Intervalo de Confianza abs	[lt/100*km]			mín%			
Intervalo de Confianza rel	-			max%			
Promedio rendimiento	[km/lt]			Aprueba test-T			
GL	-						

Historial de desagregación

Desagregación vehicular	Desagregación temporal	¿Se lograron diferencias significativas?	Confiabilidad aplicada	Conclusión
Muestra completa				
Depósito				
Tipo vehículo				
Vehículo				

Parte

2

¹⁹ TdC: Tasa de consumo

²⁰ Imp: Impacto

B.5. Formulario N° 9 Reporte de ahorro anual

Este formulario contiene el reporte de los litros de combustible ahorrados por la muestra medida mes a mes, a una escala anual. Por un lado se calcula el ahorro correspondiente a los periodos medidos, y por otro se estiman los meses faltantes para completar un año.

Formulario 9: Reporte de Ahorro Anual

Proyecto:

Empresa:

Año Ejecución:

MMEE:

Reporte

	Periodo	Variable independiente: km		Consumo LB [lt]		Consumo DA [lt]		Ahorro [lt]*		Observaciones
	meses	Medido	Estimado	Medido	Estimado	Medido	Estimado	Medido	Proyectado	
LB								±	±	
Implementación										
DA medida								±	±	
DA proyectada								±	±	
								±	±	
								±	±	
								±	±	
								±	±	
								±	±	
								±	±	
								Ahorro medido	±	
								Ahorro estimado	±	

Ahorro total anual ±

Parte 1

Parámetros Generales

Nivel de confianza	
Criterio proyección NA	
Promedio de nivel de actividad mensual por vehículo [km/(mes x vehículo)]	
Nº de vehículos muestra	
Promedio TdC LB [lt/100km]	
Promedio TdC DA [lt/100km]	
Error absoluto [lt/100km]	

Observaciones

Flota para Muestra

Tipo vehículo			
Nivel de actividad [km/mes]			
Promedio TdC LB [lt/100*km]			
Promedio TdC DA [lt/100*km]			

Parte 2

Anexo C

Memorias de cálculo de la aplicación del Protocolo de cuantificación de reducción de consumo energético para el transporte a los proyectos de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética del periodo 2011 - 2013

C.1. Resultados obtenidos tras la aplicación del protocolo AChEE

A continuación en la Tabla 31 se muestran los impactos obtenidos de los distintos sistemas definidos en la sección 1.

Tabla 31. Impactos obtenidos tras la aplicación del protocolo AChEE a los proyectos del periodo 2011-2013.

Proyecto	Sistema	MMEE	Cantidad de vehículos muestra	Impacto % en TdC ²¹	Precisión %	Aprueba test-T	Nivel de actividad anual (km)	Ahorro anual (lt)
AP	AP.1	Dispositivos aerodinámicos	5	6,03%	3,74%	Sí	87.327	12.742
AP	AP.2	Dispositivos aerodinámicos	2	0,95%	3,68%	No	68.981	0
AP	AP.3	Dispositivos aerodinámicos	37	5,98%	4,03%	Sí	180.000	131.042
AP	AP.4	Dispositivos aerodinámicos	7	3,19%	1,80%	Sí	180.000	14.694
AP	AP.5	Dispositivos aerodinámicos	3	-8,96%	5,94%	Sí	120.000	-13.440
AP	AP.6	Dispositivos aerodinámicos	16	4,16%	2,51%	Sí	155.556	37.294
AP	AP.7	Dispositivos aerodinámicos	3	6,85%	9,54%	No	180.000	0
AP	AP.8	Dispositivos aerodinámicos	8	14,14%	10,46%	Sí	180.000	82.725
AP	AP.9	Dispositivos aerodinámicos	32	3,74%	14,28%	No	180.000	0
AP	AP.10	Dispositivos aerodinámicos	6	8,22%	3,59%	Sí	180.000	30.587
CTC	CTC.1-a	Recambio de vehículo	31	17,05%	18,00%	No	0	0

²¹ TdC: Tasa de consumo [lt/100km].

CTC	CTC.1-b	Recambio de vehículo + Conducción Eficiente	31	25,67%	17,27%	Sí	30.804	58.612
TC1	TC1.1	Dispositivos aerodinámicos	1	15,86%	2,09%	Sí	136.170	8.194
TC1	TC1.2	Dispositivos aerodinámicos + Conducción Eficiente	1	0,95%	5,20%	No	155.556	0
TC1	TC1.3-a	Conducción Eficiente	10	2,05%	1,45%	Sí	144.000	13.161
TC1	TC1.3-b	Dispositivos aerodinámicos	1	0,85%	3,83%	No	0	0
TC1	TC1.3-c	Control de velocidad	3	1,98%	1,71%	Sí	144.000	3.944
TC1	TC1.4	Conducción Eficiente	9	1,54%	2,13%	No	114.000	0
TC2	TC2.1	Conducción Eficiente	1	8,60%	14,05%	No	82.287	0
TC2	TC2.2	Conducción Eficiente	1	14,26%	-	No	116.991	0
TC2	TC2.3	Control de velocidad	2	2,10%	1,86%	Sí	68.981	1.198
TC2	TC2.4	Dispositivos aerodinámicos	5	6,88%	3,23%	Sí	90.216	13.819
TC2	TC2.5	Conducción Eficiente	1	1,18%	23,62%	No	8.462	0
ICE2	ICE2	Conducción Eficiente	12	20,66%	3,80%	Sí	12.000	2.712
TP1	TP1.1-a	Control Electromecánico de la aceleración	3	4,82%	10,45%	No	102.000	0
TP1	TP1.1-b	Monitoreo Explícito	5	-3,55%	18,36%	No	102.000	0
TP1	TP1.1-c	Conducción Eficiente	5	5,39%	3,31%	Sí	102.000	20.408
TP1	TP1.1-d	Gestión de ralentí	4	-0,57%	16,02%	No	102.000	0

TP1	TP1.1-e	Optimización electrónica de caja de cambios	2	2,57%	8,31%	No	102.000	0
TP1	TP1.1-f	Control mecánico de la aceleración	3	-0,67%	32,79%	No	102.000	0
TP1	TP1.1-g	Restricción RPM en neutro	4	39,87%	N/A	No	102.000	0
TP2	TP2	Gestión de ralentí	600	6,48%	3,54%	Sí	53.596	1.333.959
TP3	TP3.1	Gestión de la presión del aire en neumáticos	19	0,707%	5,64%	No	110.000	0

Anexo D

Resultados experimentales del análisis de la *Metodología VSP para el consumo de combustible* y determinación del impacto de la medida Conducción Eficiente

D.1. Velocidades de vehículos en pruebas

A continuación en la Figura 69, Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73, Figura 74, Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78 y Figura 79 se muestran graficadas las velocidades de los distintos vehículos en los periodos de Línea Base y Demostrativo de Ahorro de cada vehículo.

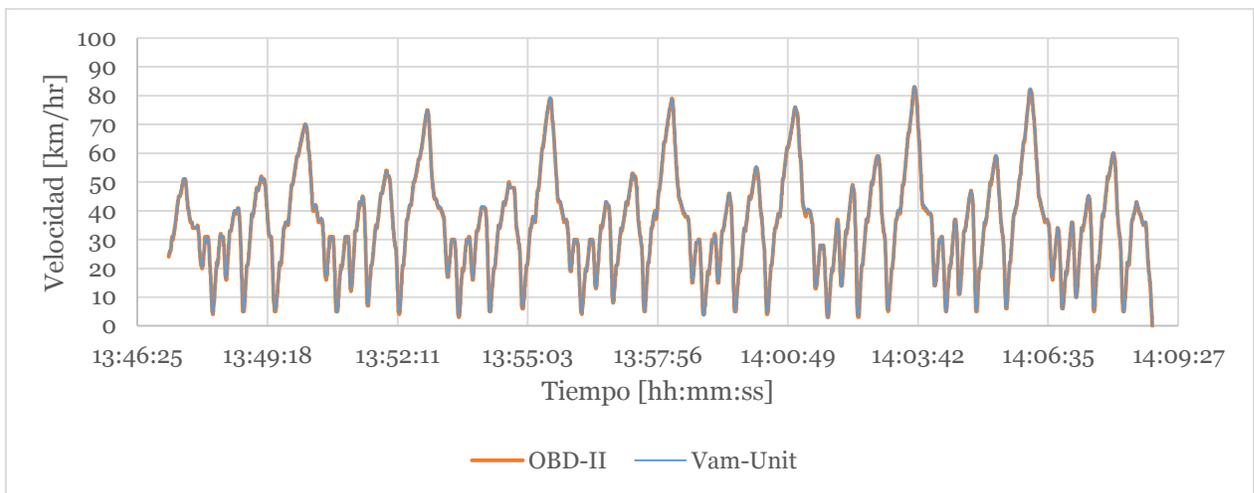


Figura 69. Velocidad vehículo 1, periodo de Línea Base

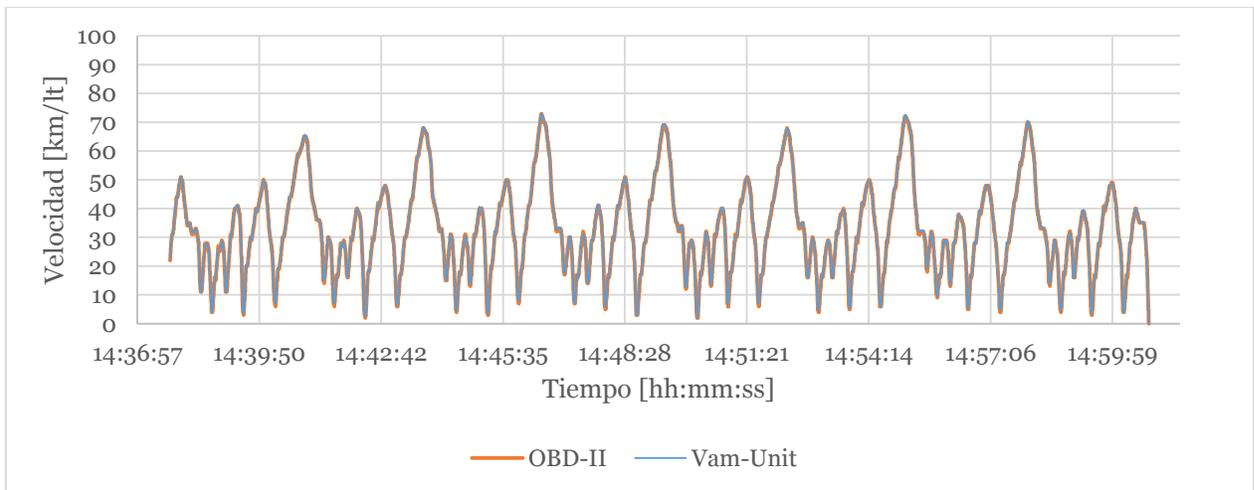


Figura 70. Velocidad vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro

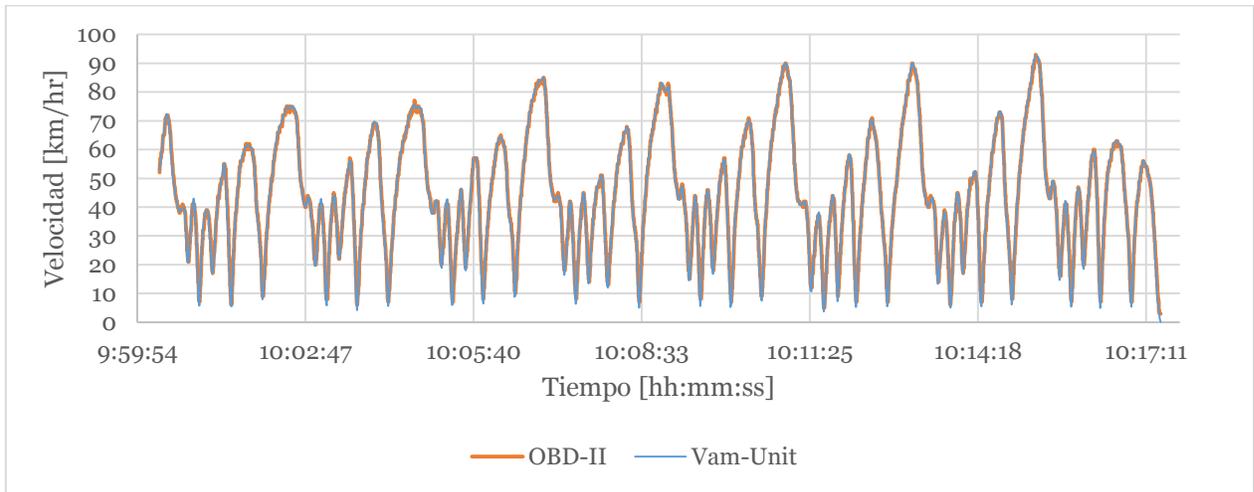


Figura 71. Velocidad vehículo 2, periodo de Línea Base

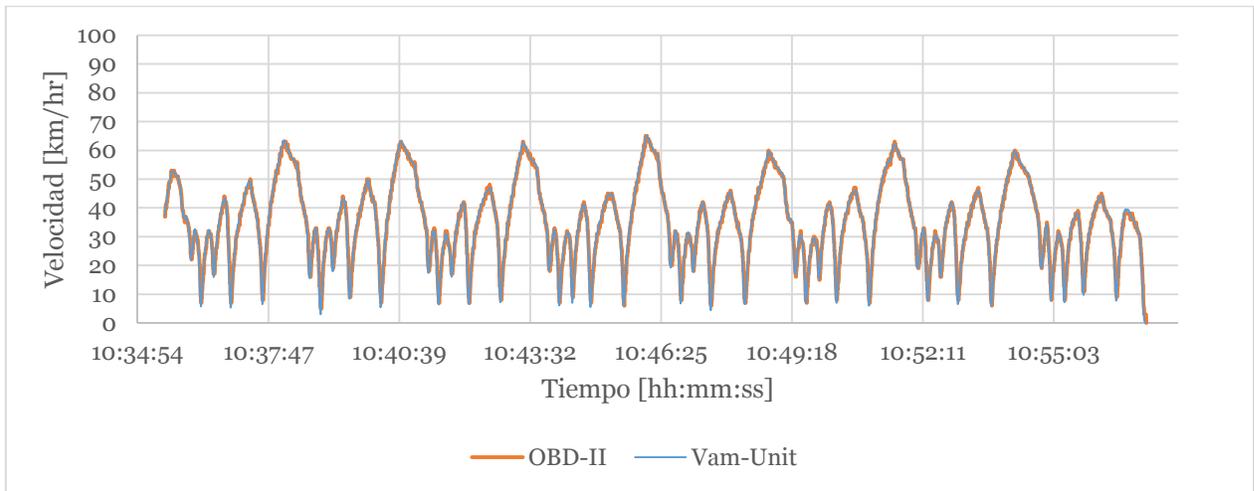


Figura 72. Velocidad vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro

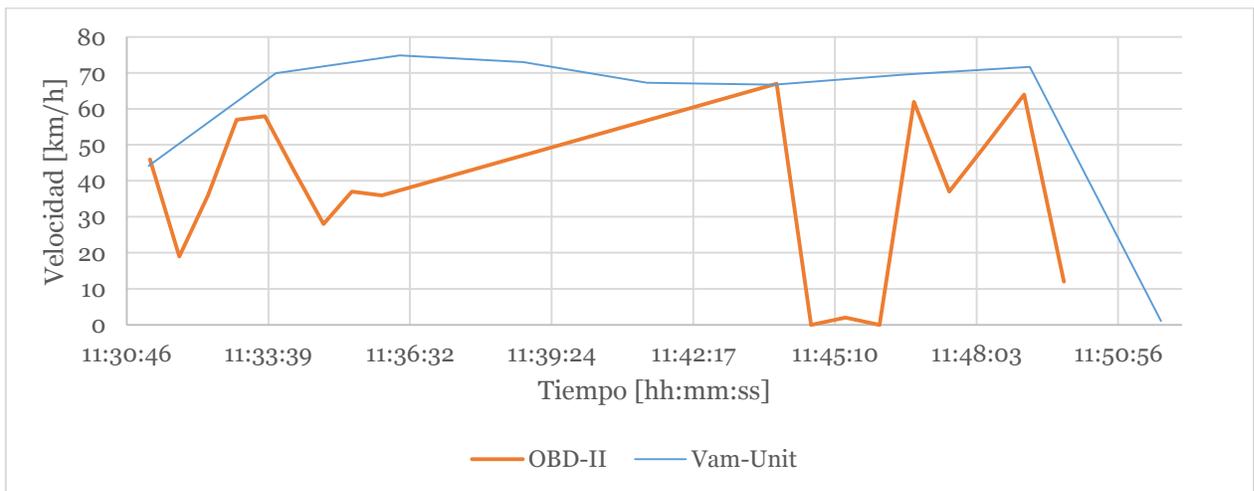


Figura 73. Velocidad vehículo 3, periodo de Línea Base

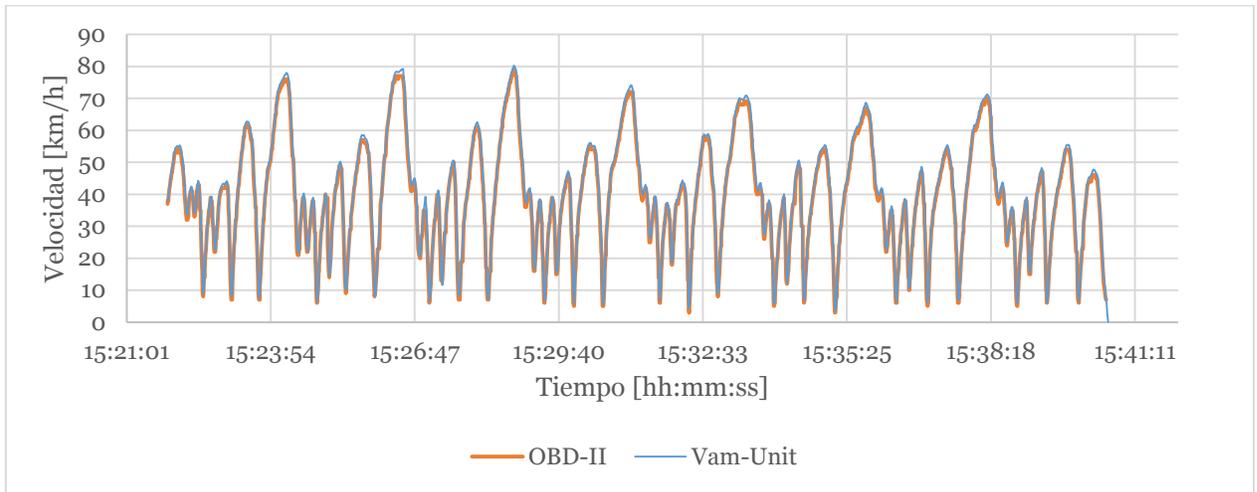


Figura 74. Velocidad vehículo 4, periodo de Línea Base

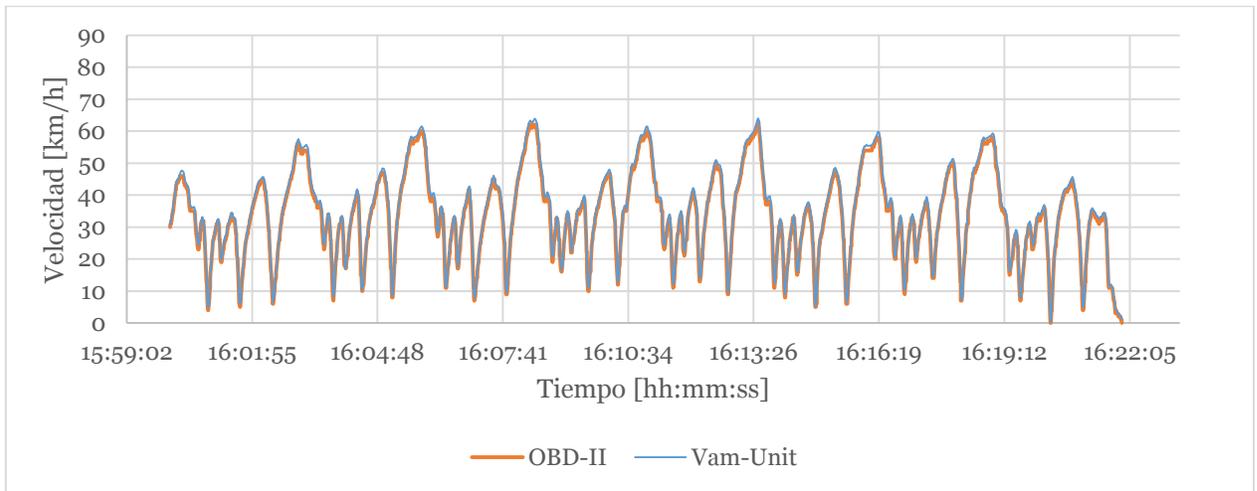


Figura 75. Velocidad vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro

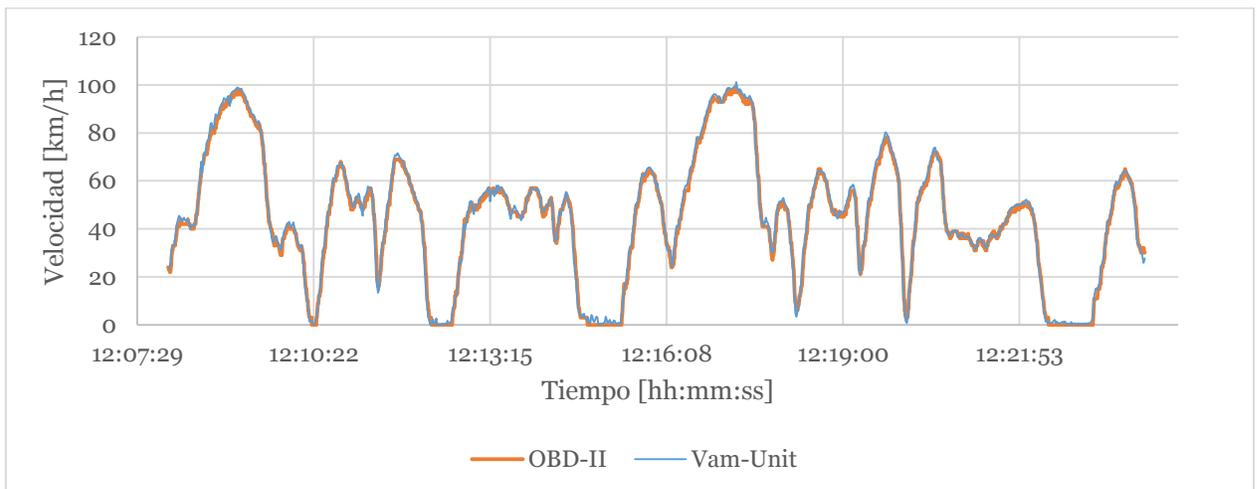


Figura 76. Velocidad vehículo 5, vueltas 1 y 2, periodo de Línea Base

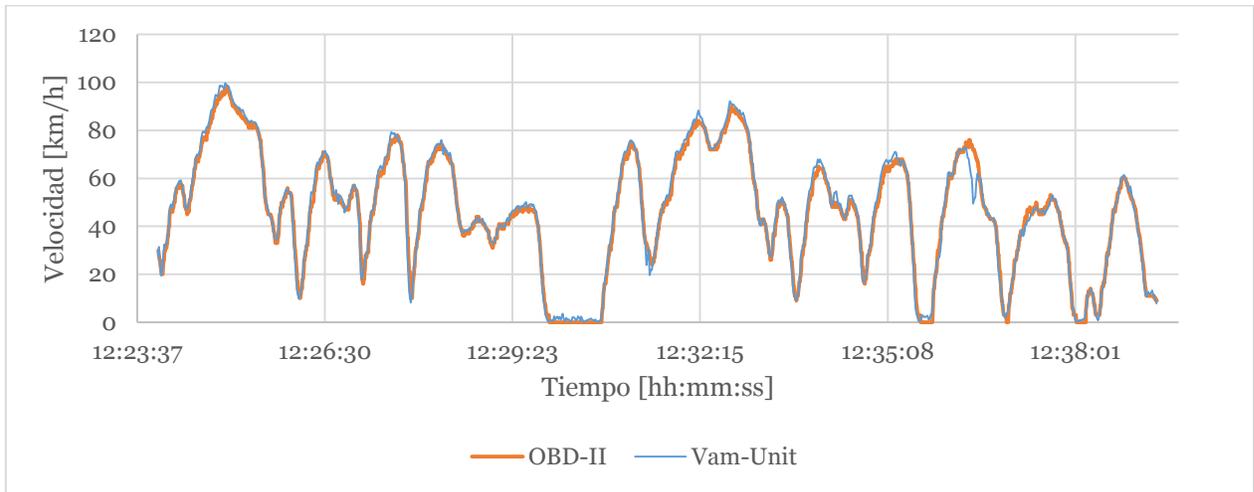


Figura 77. Velocidad vehículo 5, vueltas 3 y 4, periodo de Línea Base

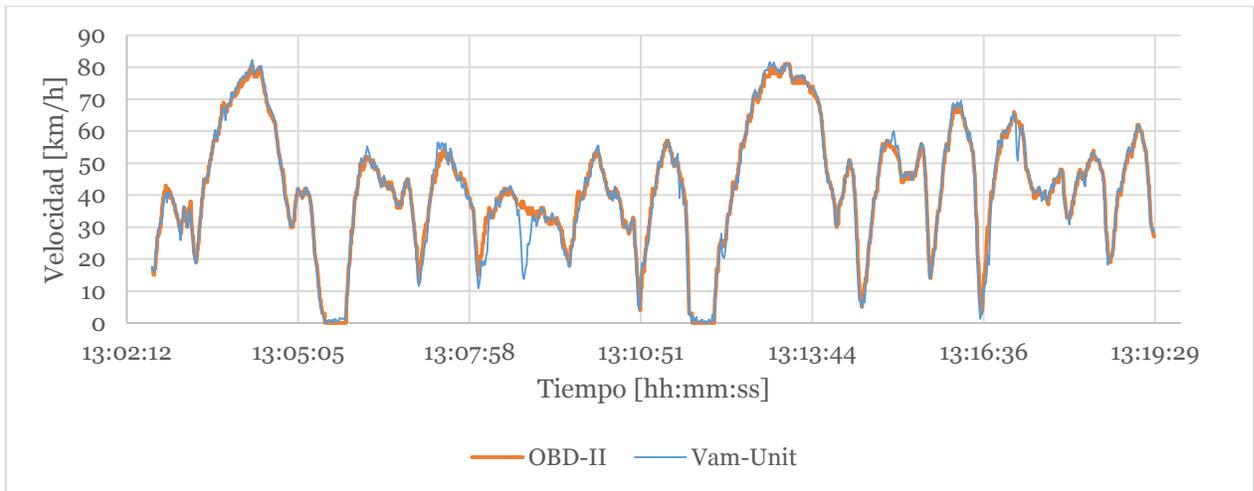


Figura 78. Velocidad vehículo 5, vueltas 1 y 2, periodo de Demostrativo de Ahorro

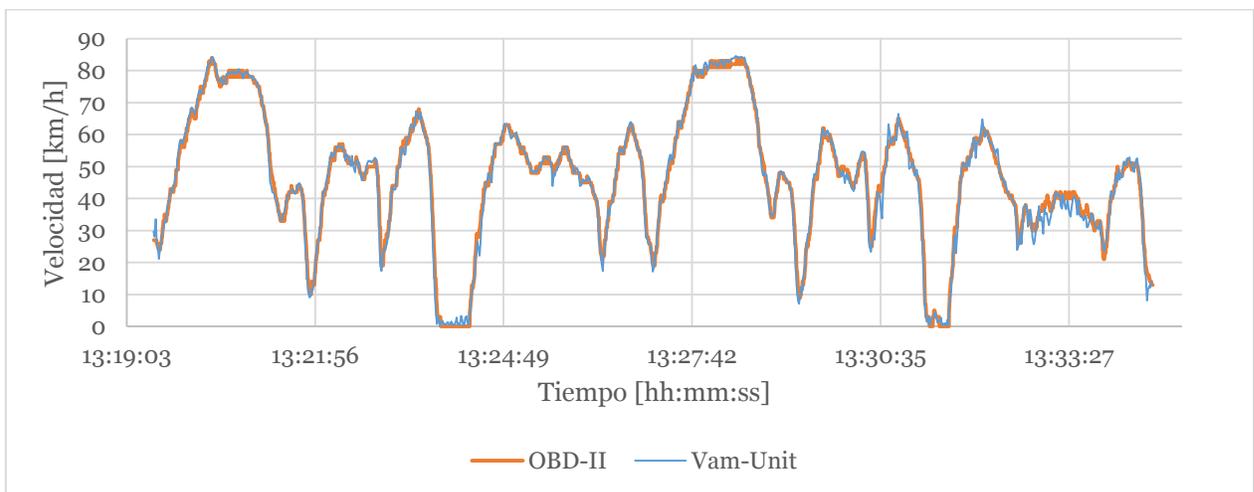


Figura 79. Velocidad vehículo 5, vueltas 3 y 4, periodo de Demostrativo de Ahorro

D.2. Consumos de combustible medidos con OBD-II y metodología VSP

En este anexo se presentan los resultados de las mediciones descritas en la sección 3.2.1. En particular se muestra el consumo de combustible segundo a segundo obtenido con OBD-II y metodología VSP (con factores de consumo obtenidos de la literatura y con la calibración de bins con lo obtenido del OBD-II).

D.2.1. Consumo vehículo 1

D.2.1.1. Consumo Línea Base

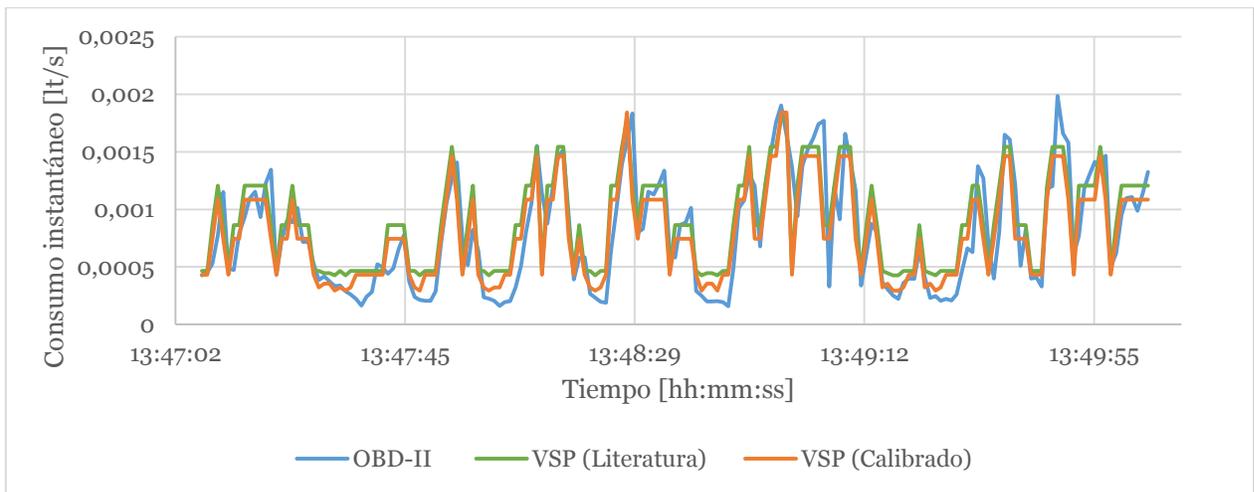


Figura 80. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 1

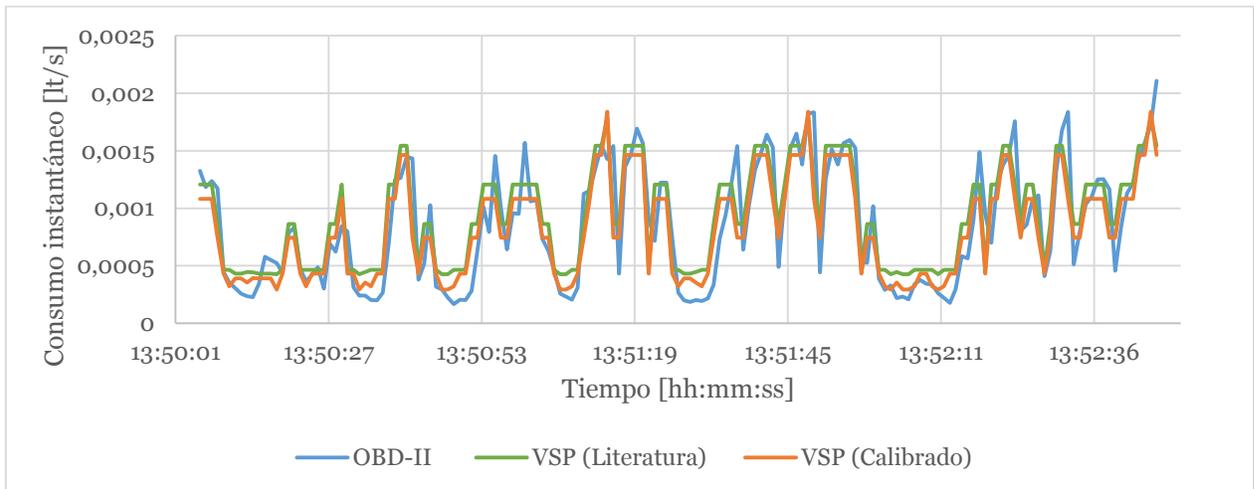


Figura 81. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 2

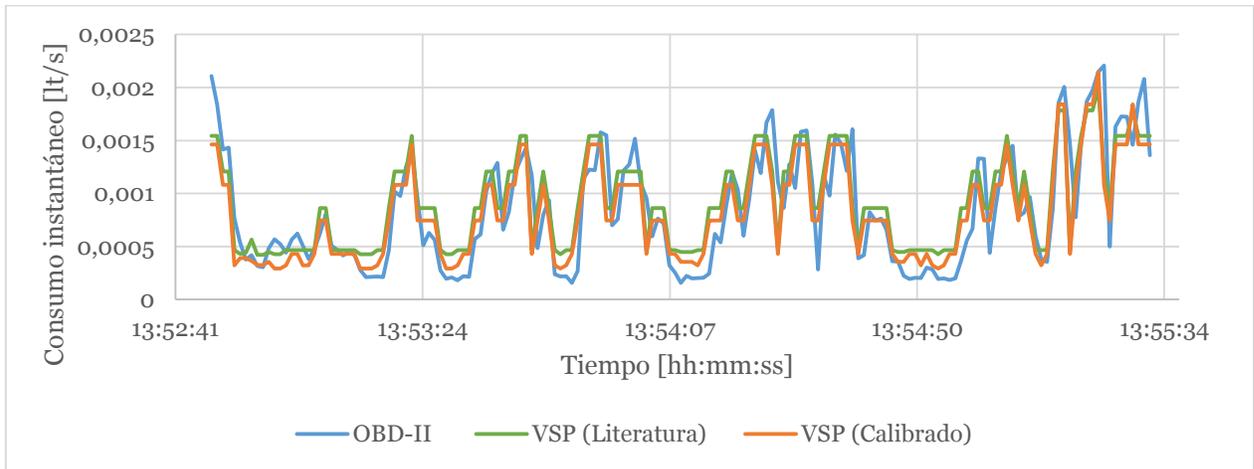


Figura 82. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 3

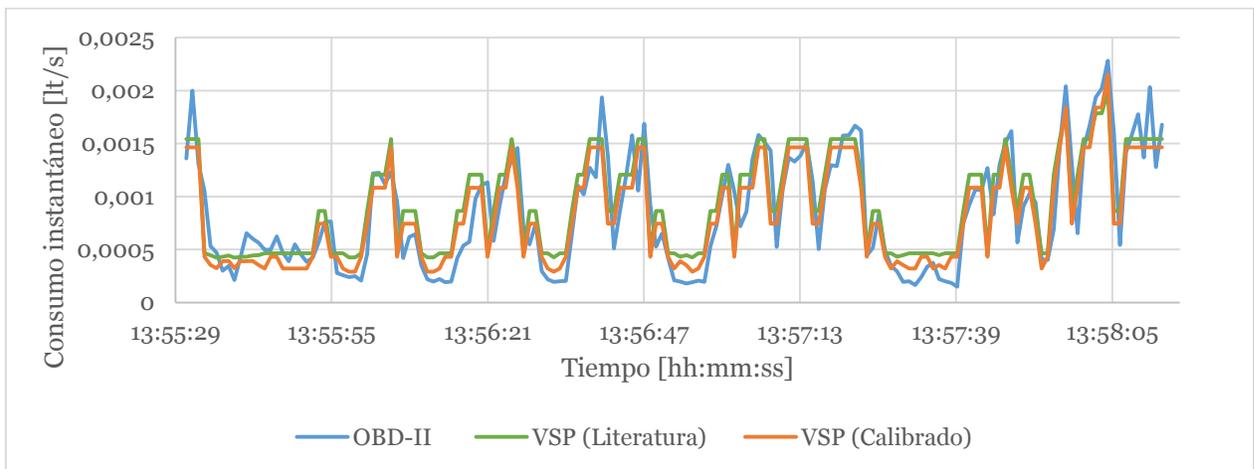


Figura 83. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 4

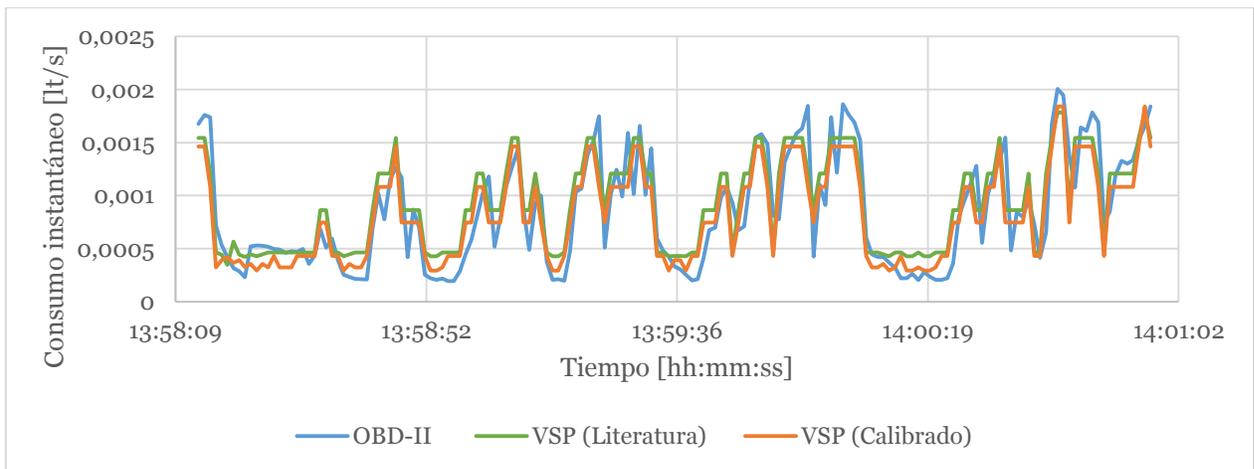


Figura 84. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 5

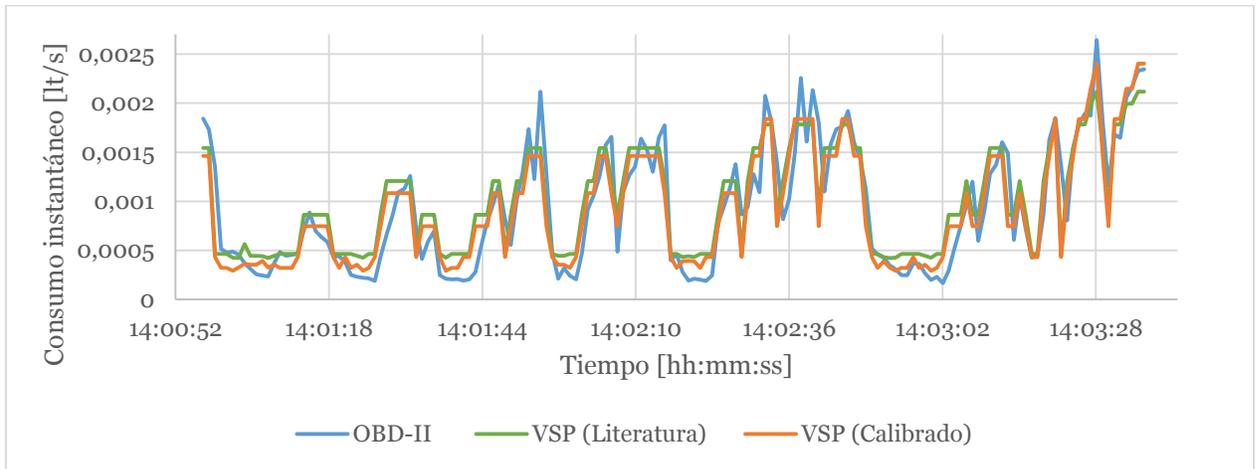


Figura 85. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 6

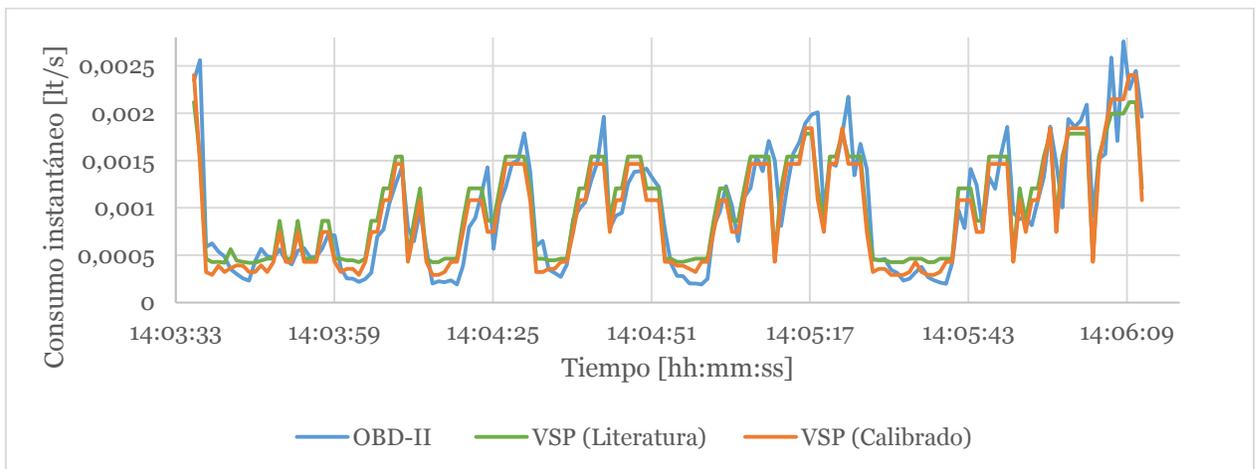


Figura 86. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 7

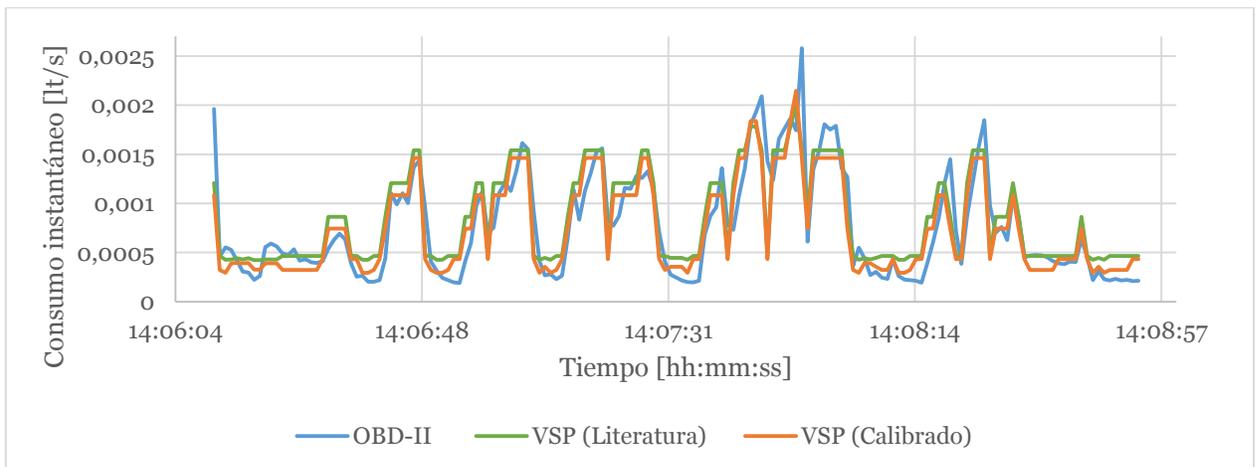


Figura 87. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo de Línea Base, vuelta 8

D.2.1.2. Consumo Demostrativo de Ahorro

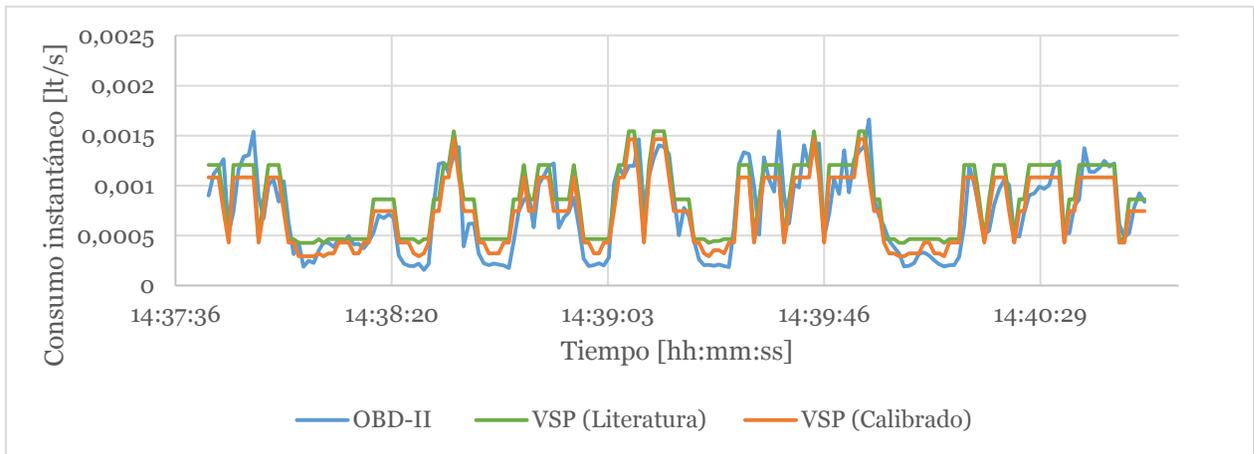


Figura 88. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1

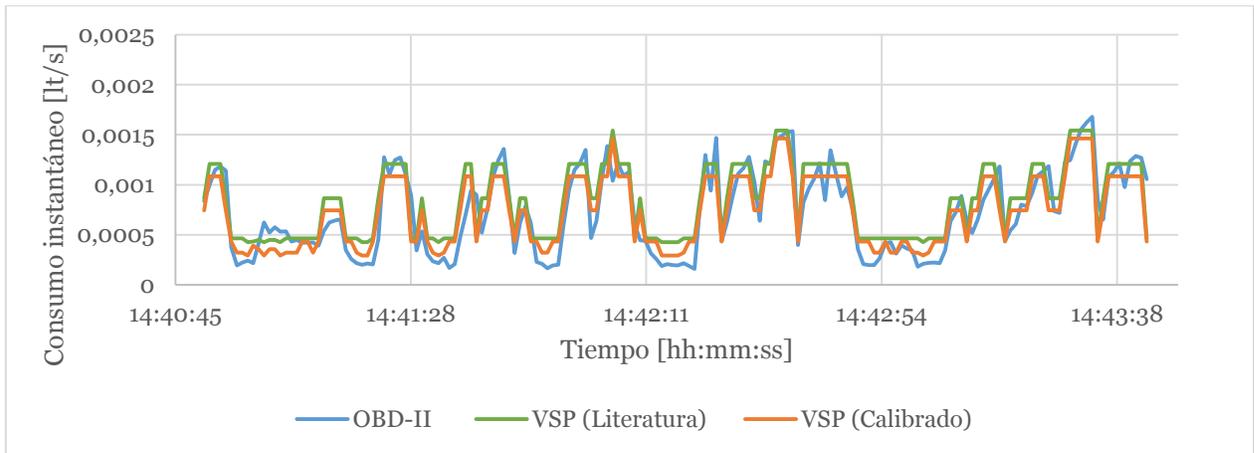


Figura 89. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2

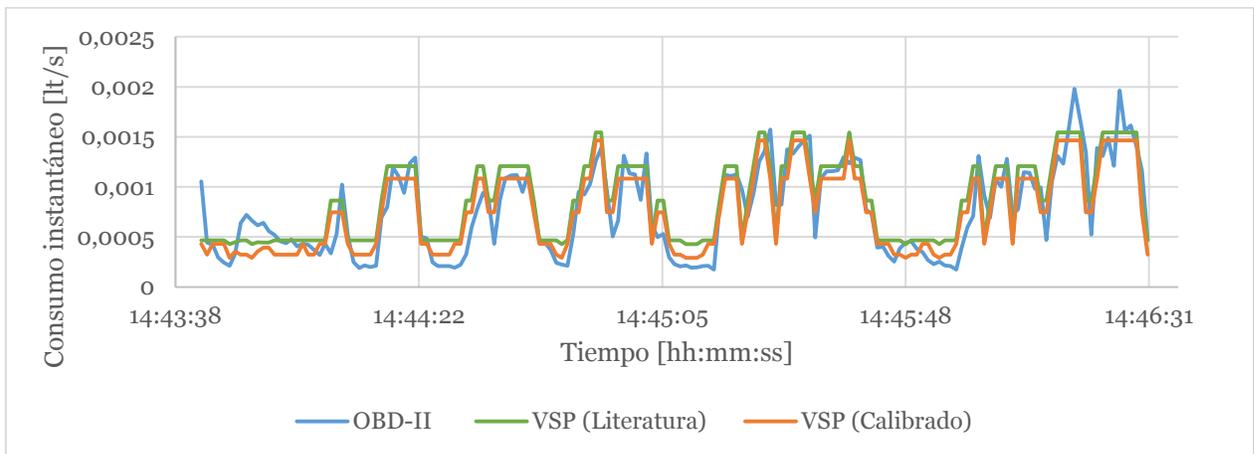


Figura 90. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3

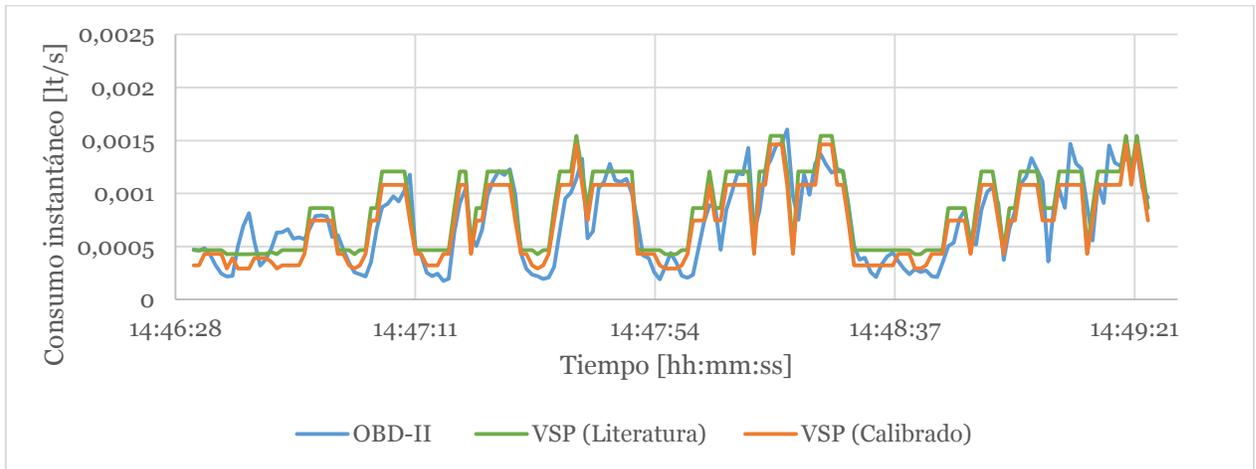


Figura 91. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4

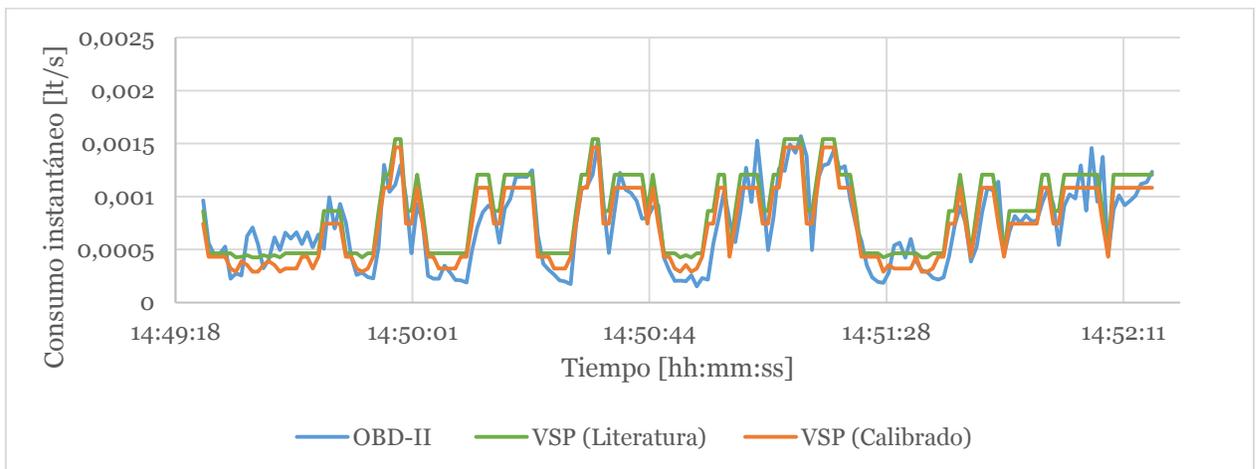


Figura 92. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 5

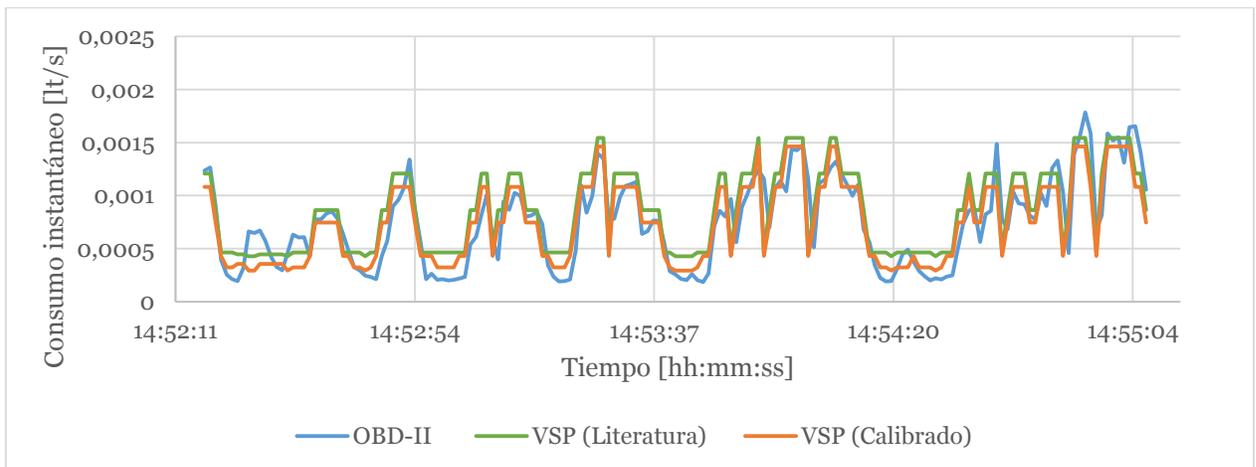


Figura 93. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 6

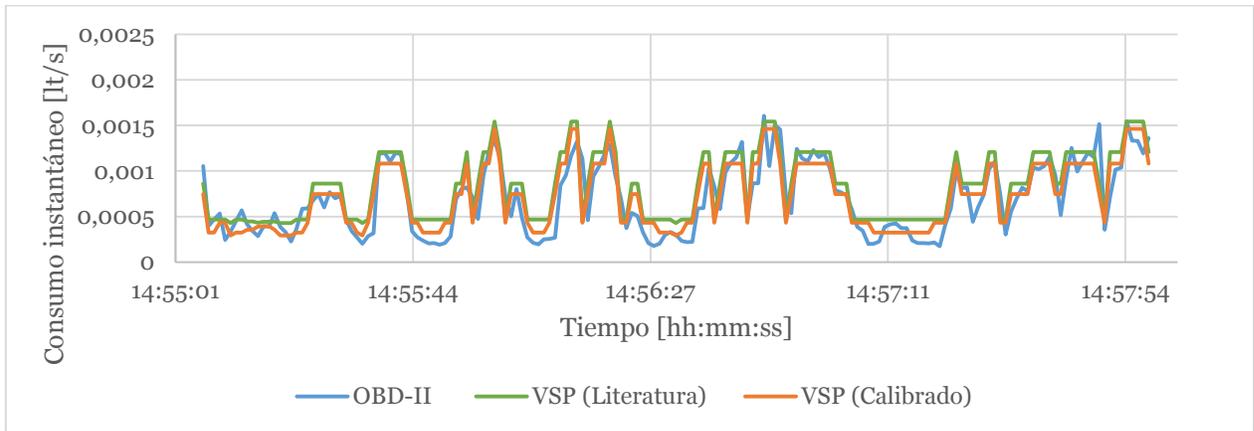


Figura 94. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 7

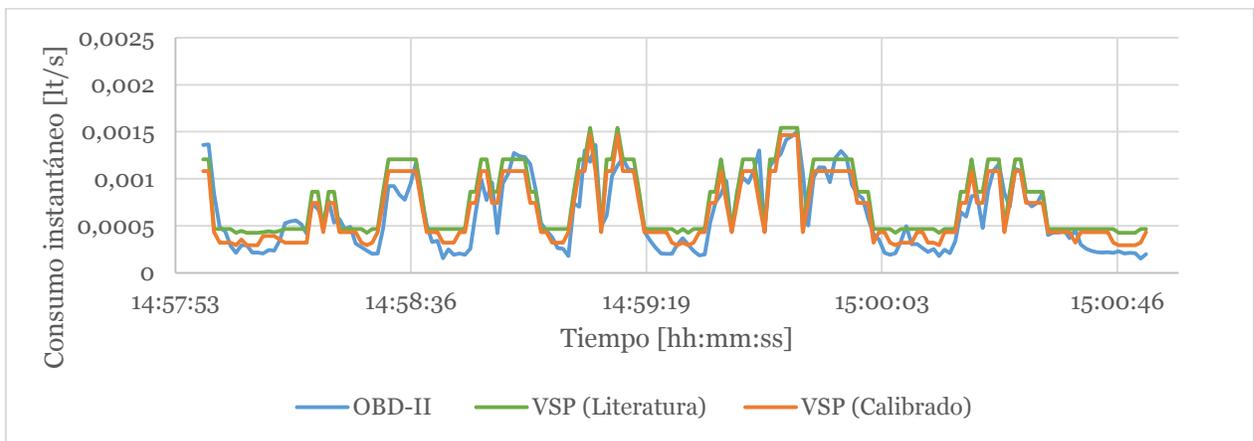


Figura 95. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 8

D.2.2. Consumo vehículo 2

D.2.2.1. Consumo Línea Base

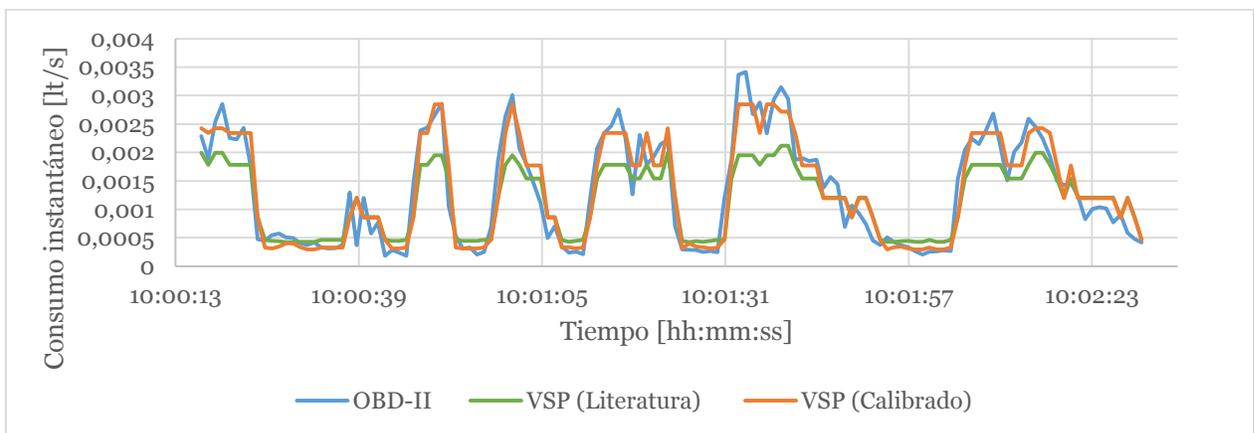


Figura 96. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 1

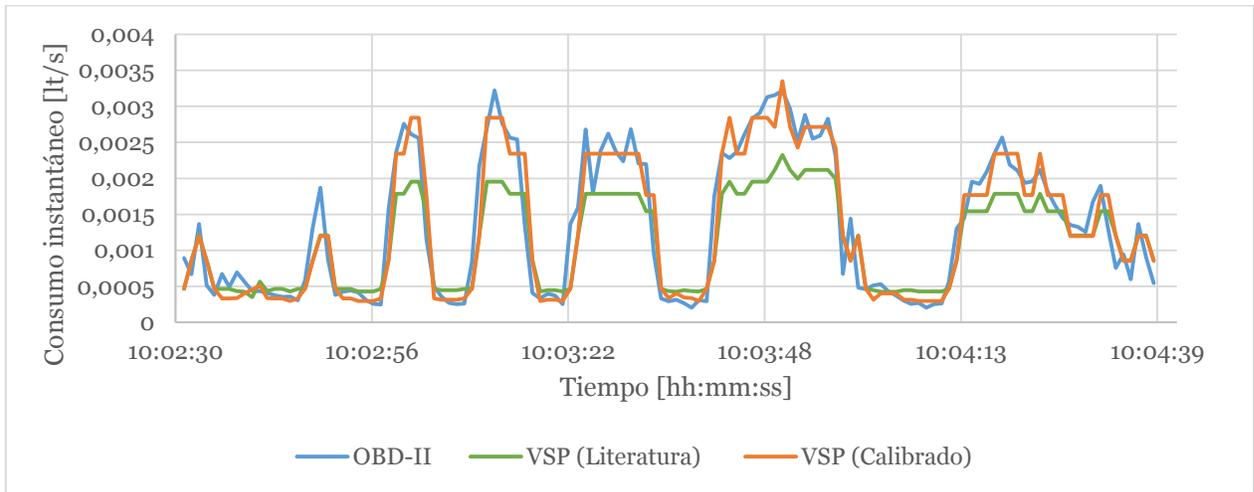


Figura 97. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 2

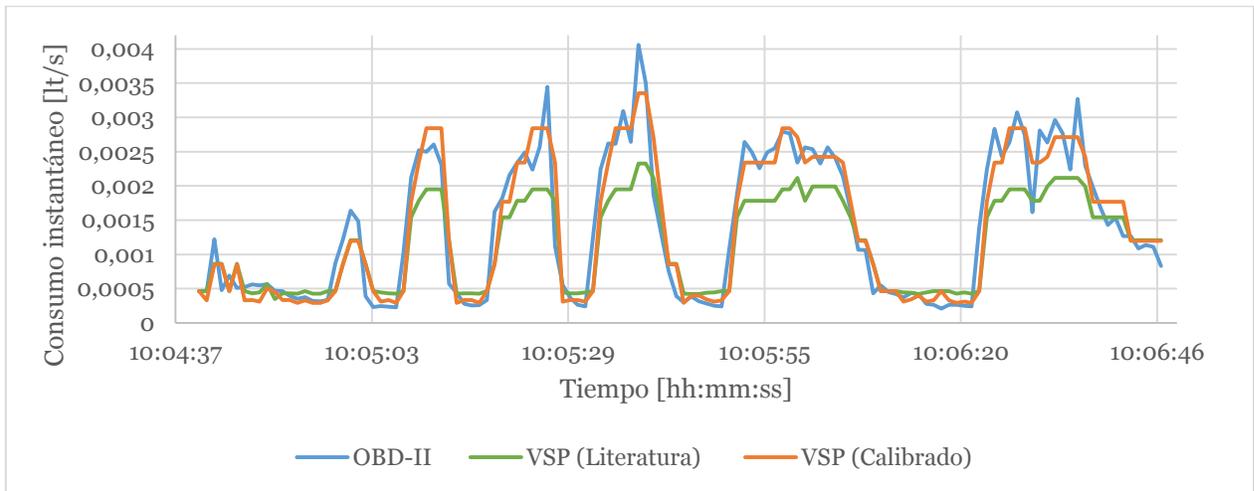


Figura 98. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 3

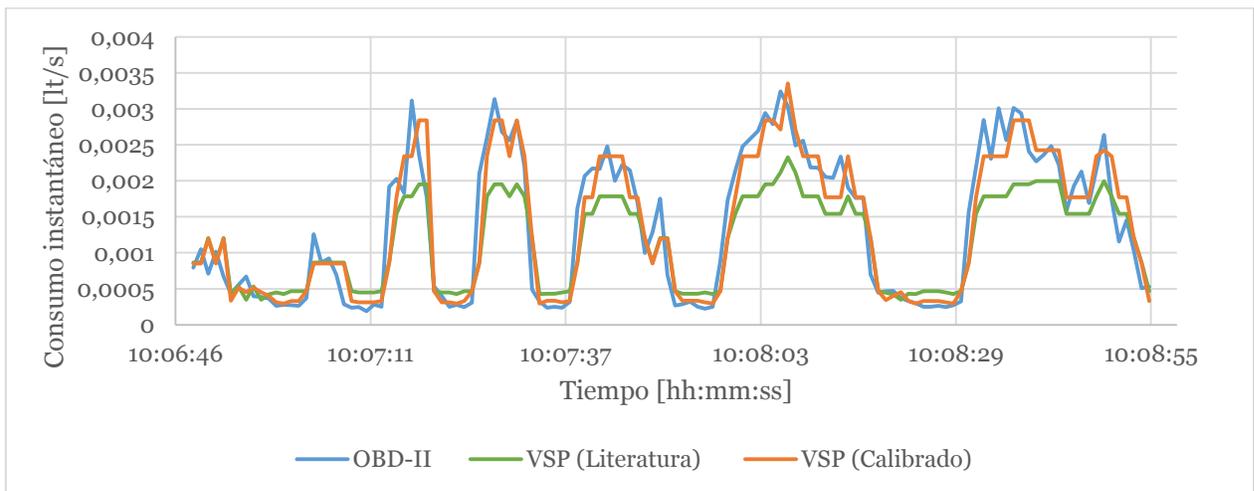


Figura 99. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 4

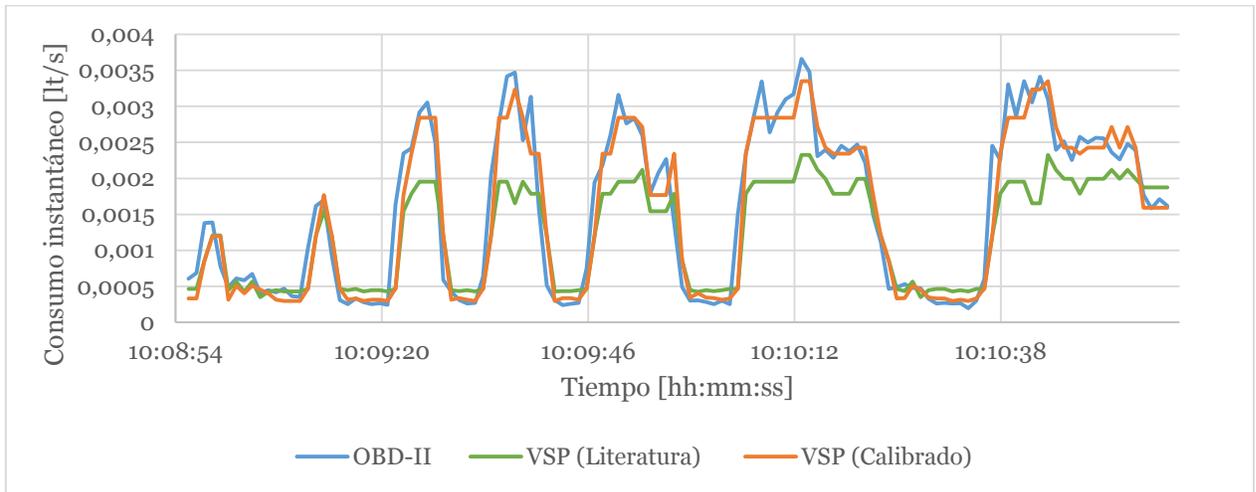


Figura 100. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 5

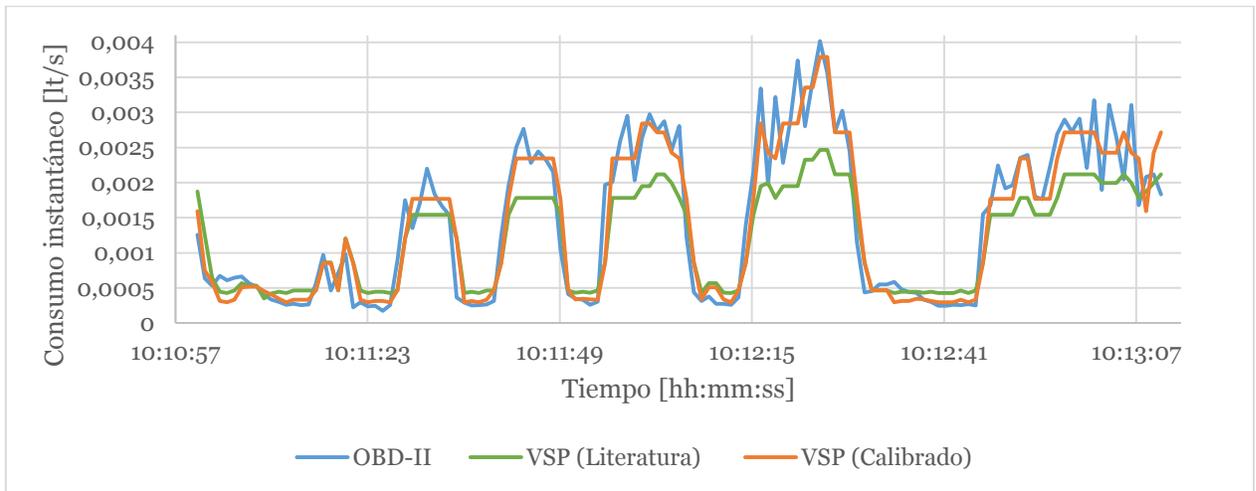


Figura 101. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 6

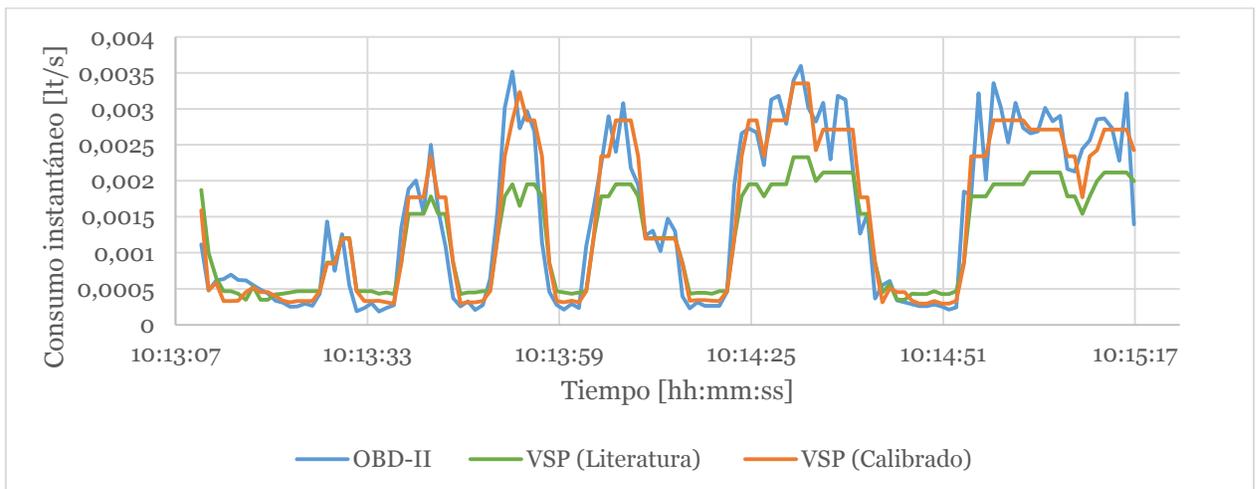


Figura 102. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 7

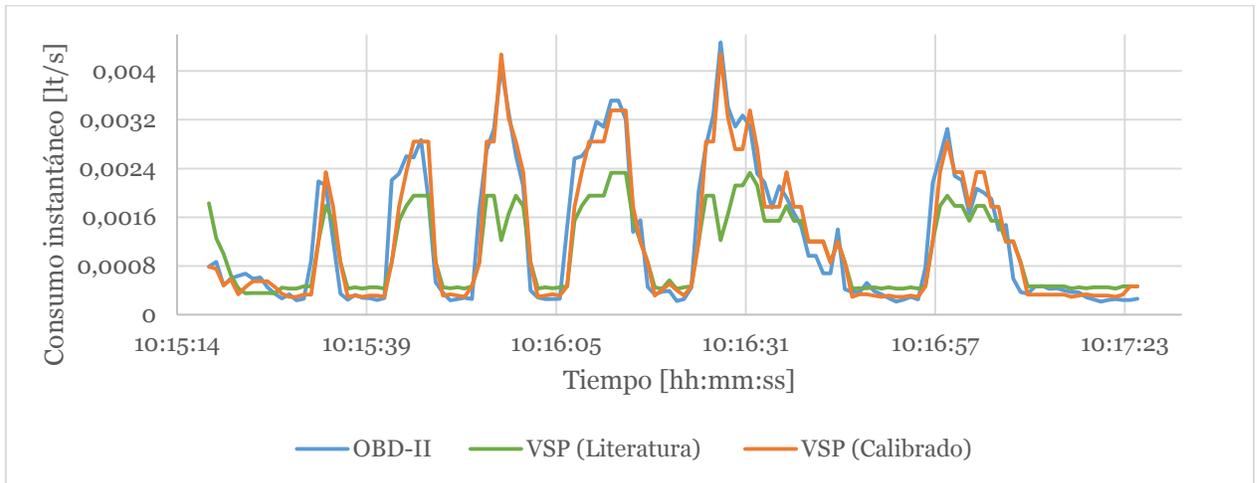


Figura 103. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo de Línea Base, vuelta 8

D.2.2.1. Consumo Demostrativo de Ahorro

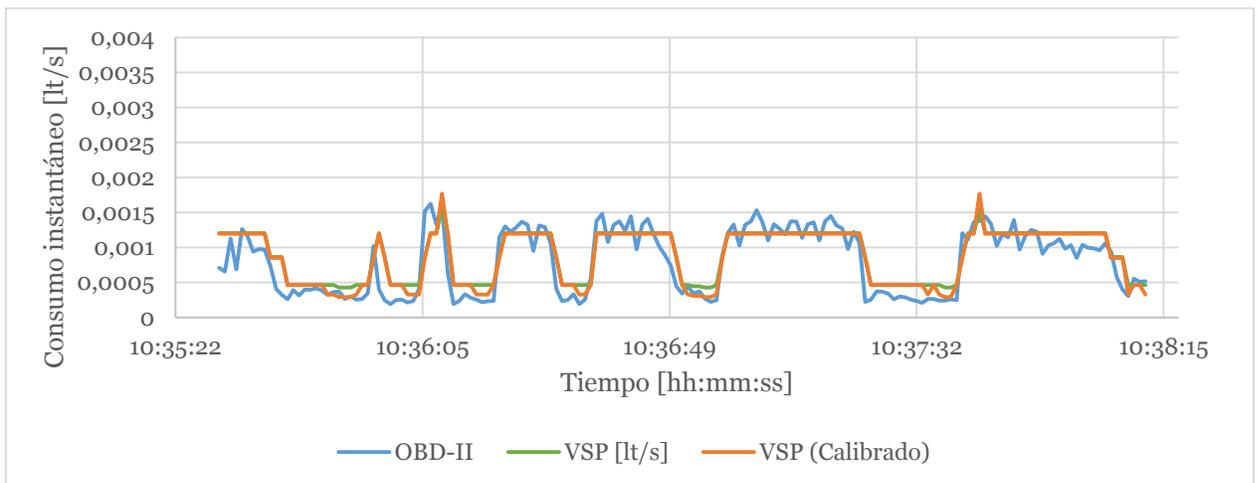


Figura 104. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1

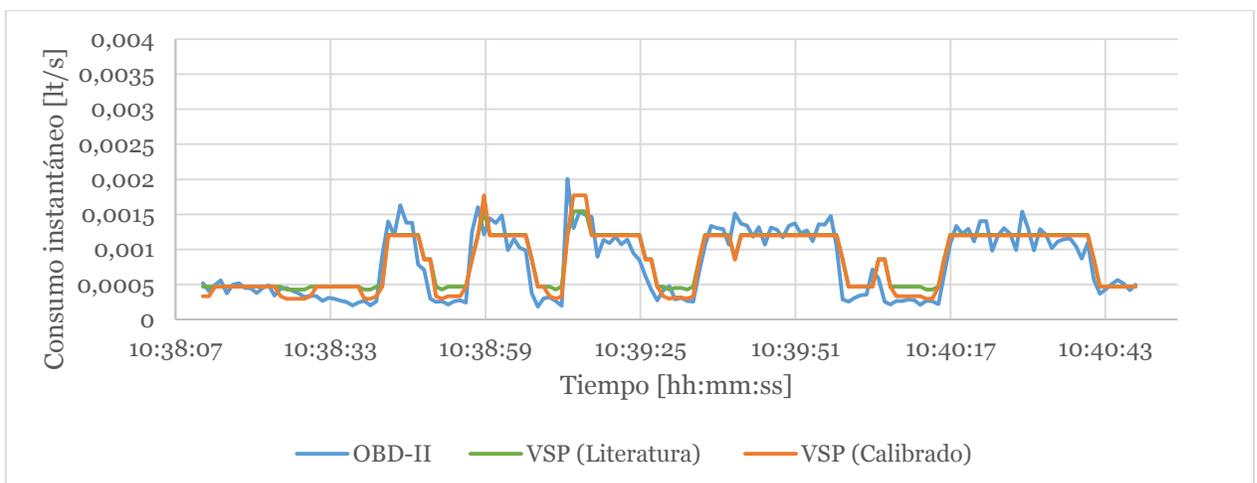


Figura 105. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2

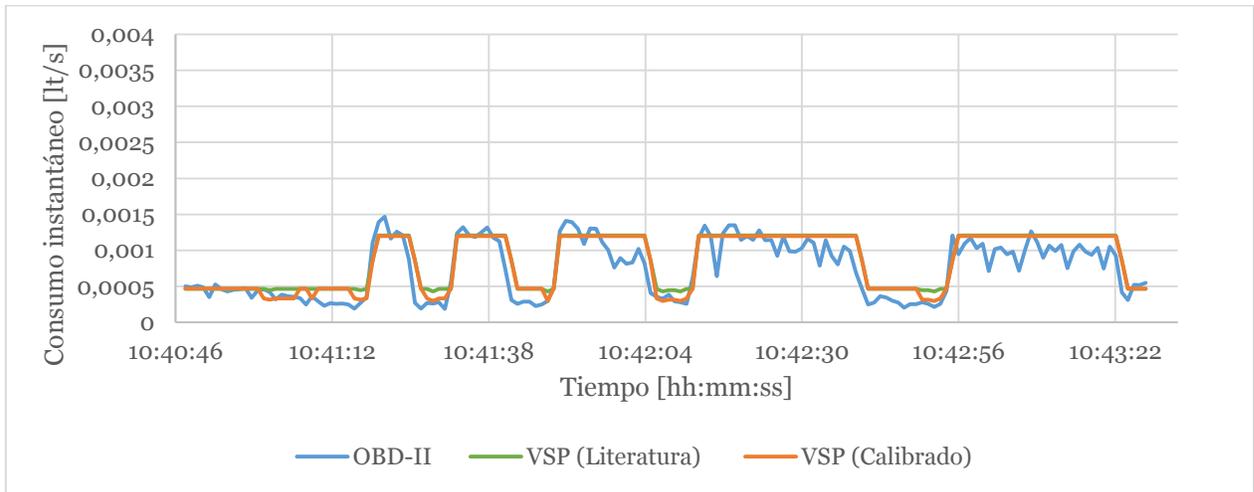


Figura 106. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3

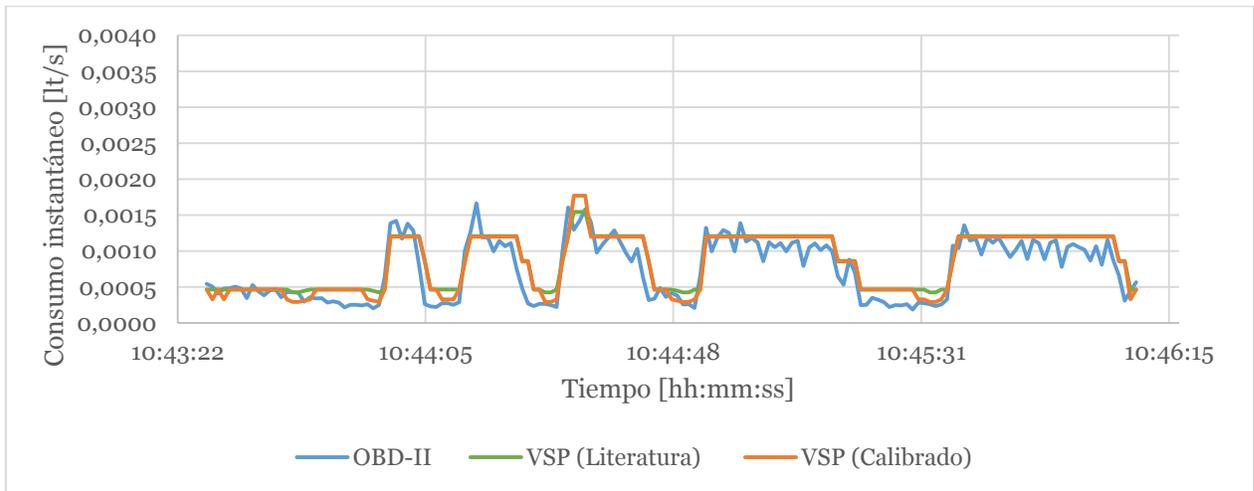


Figura 107. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4

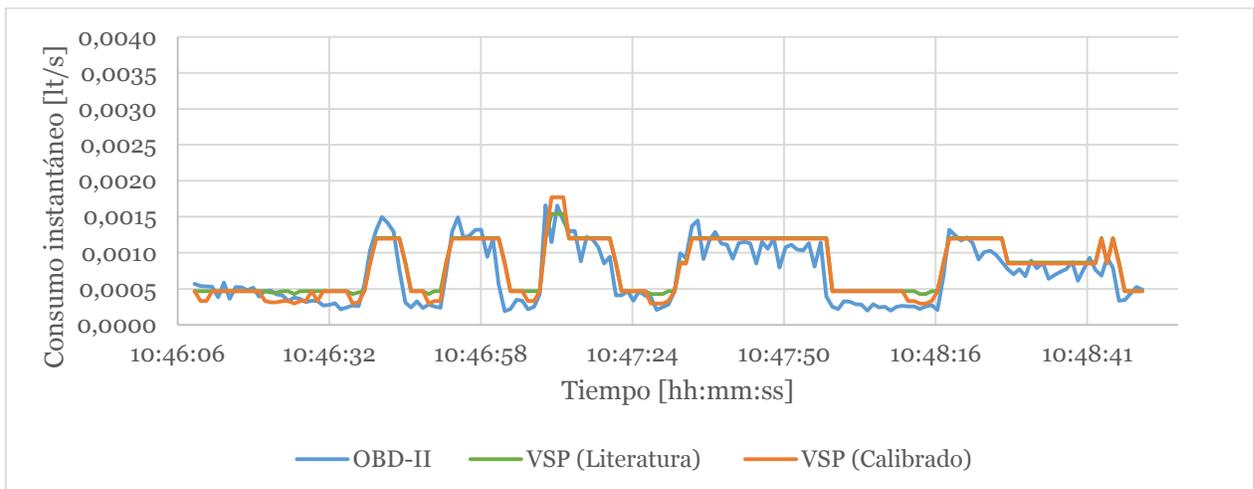


Figura 108. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 5

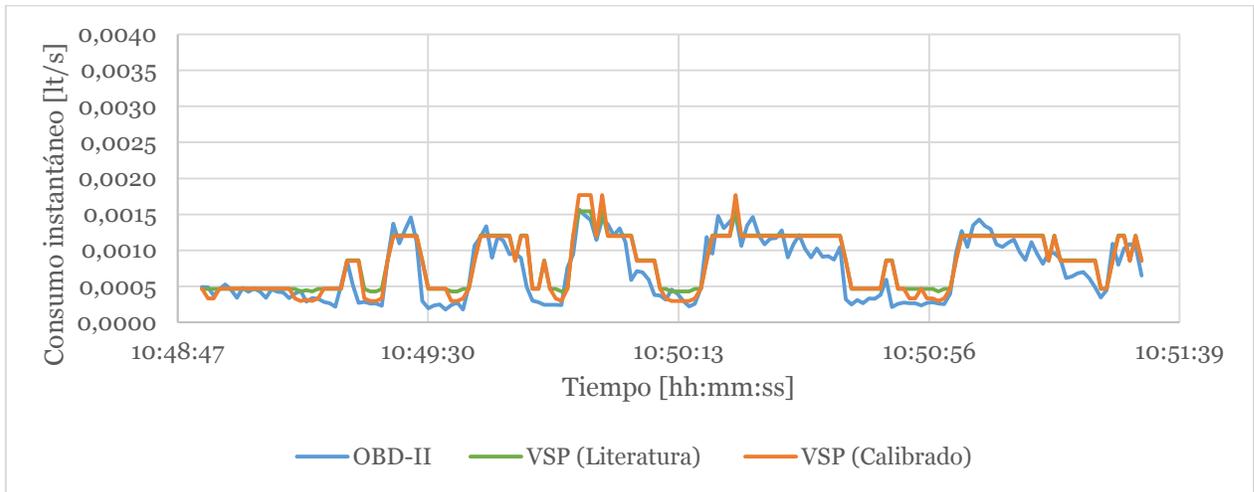


Figura 109. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 6

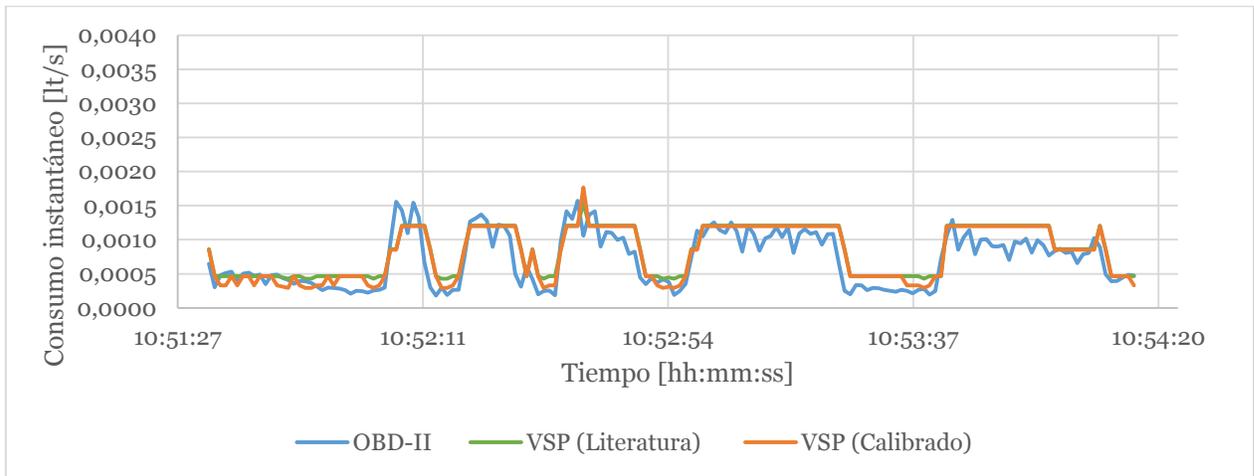


Figura 110. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 7

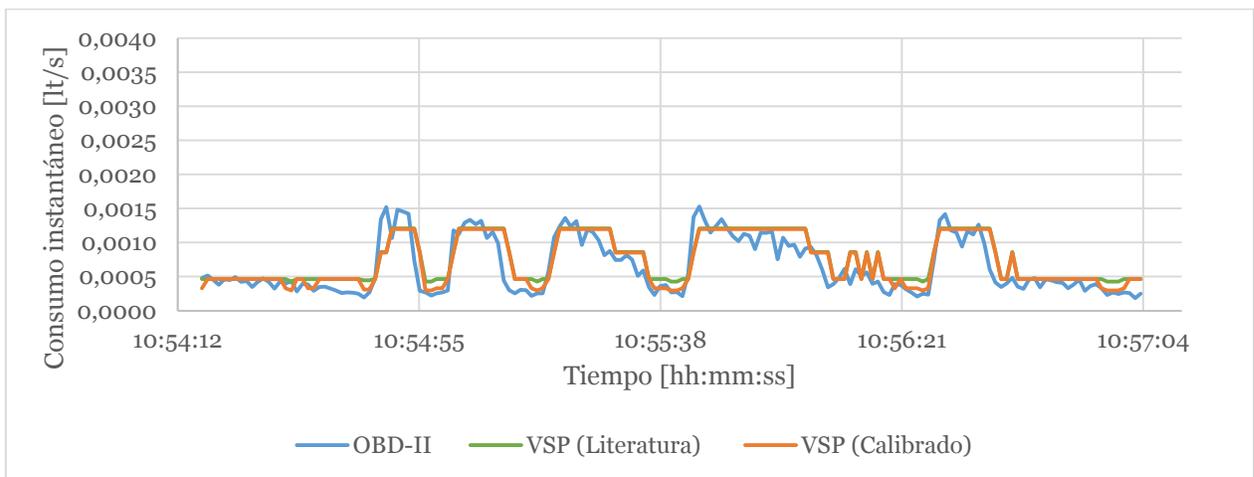


Figura 111. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 8

D.2.3. Consumo vehículo 3

D.2.3.1. Consumo Línea Base

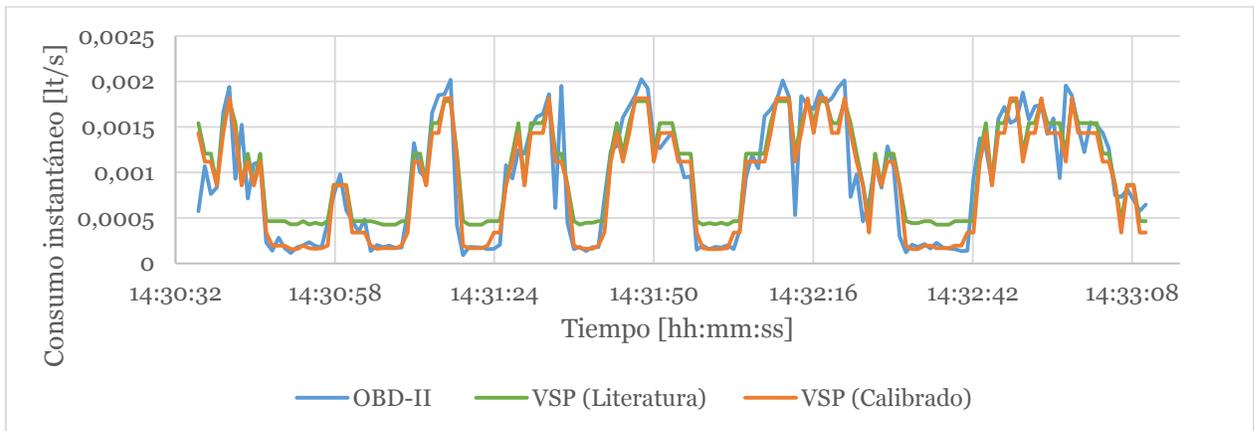


Figura 112. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 1

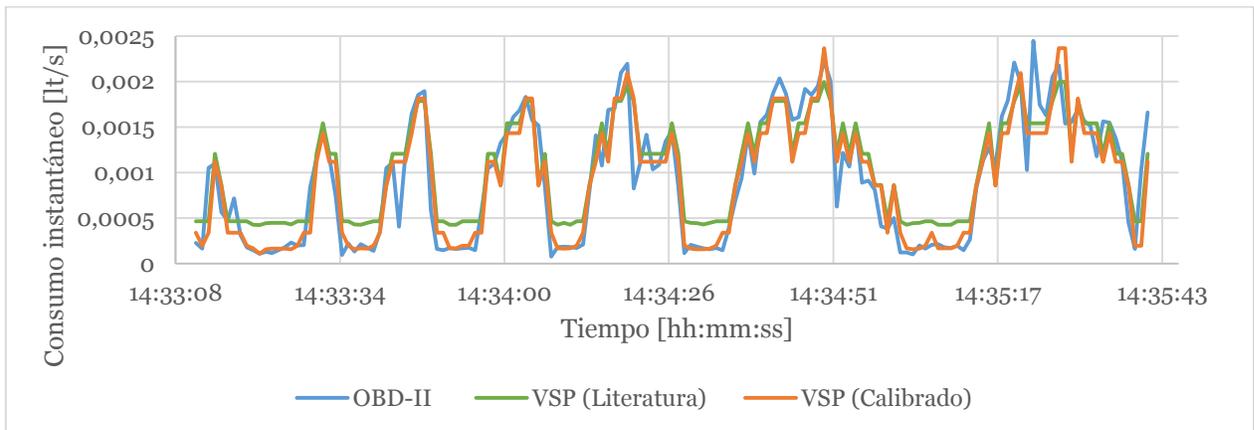


Figura 113. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 2

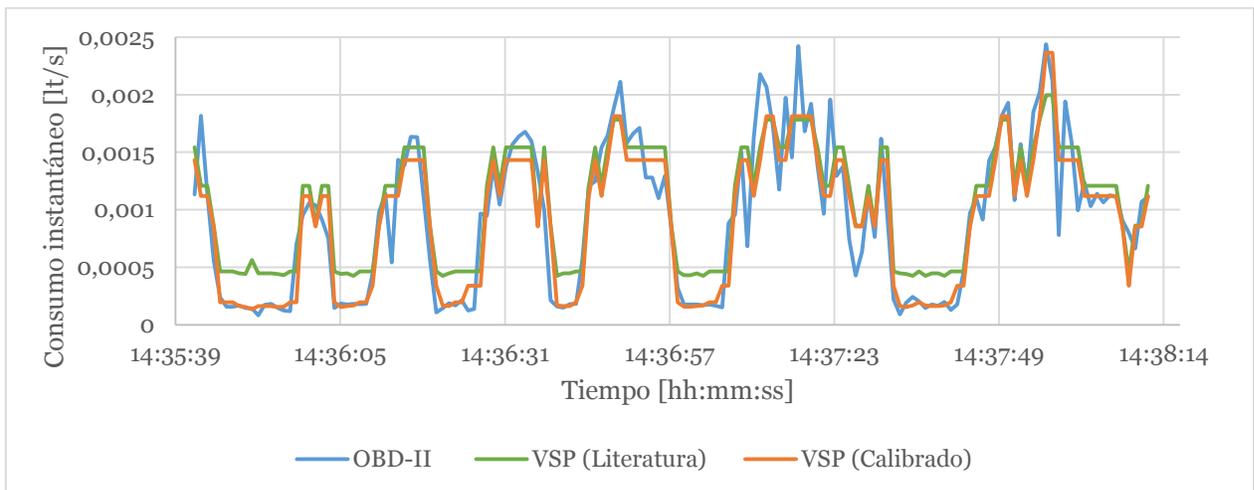


Figura 114. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 3

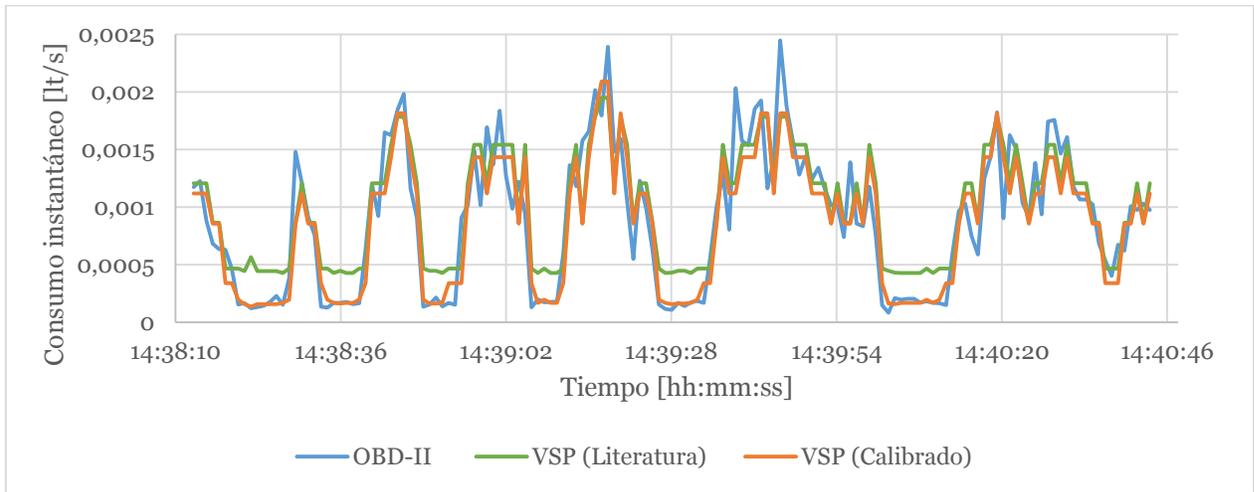


Figura 115. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 4

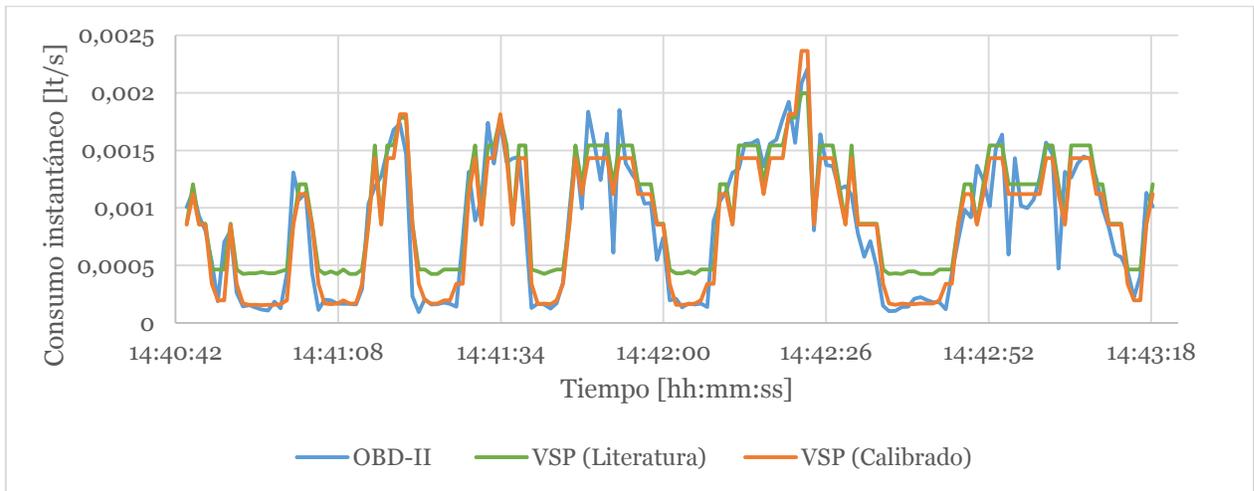


Figura 116. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 5

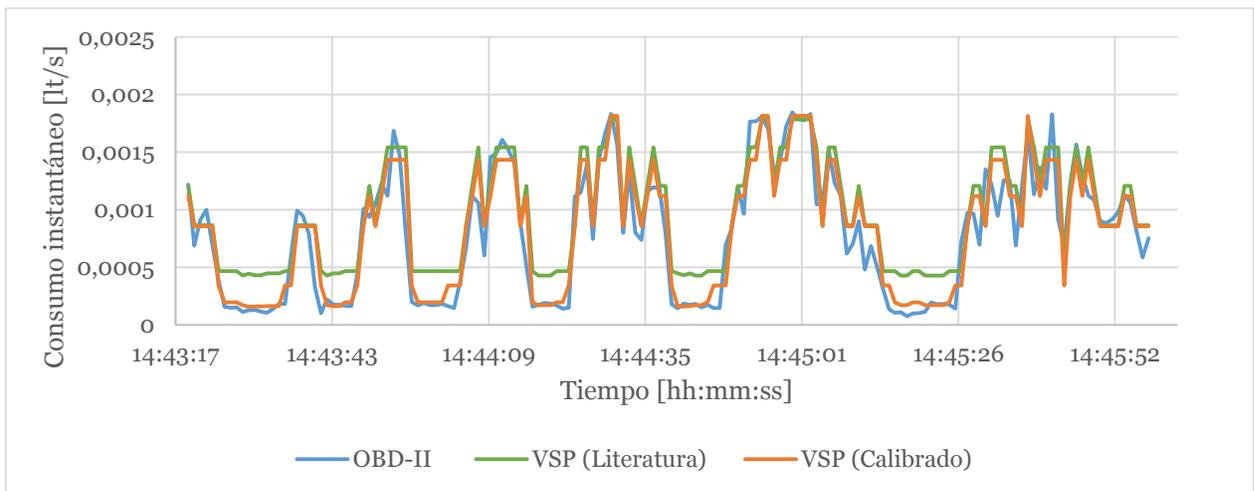


Figura 117. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 6

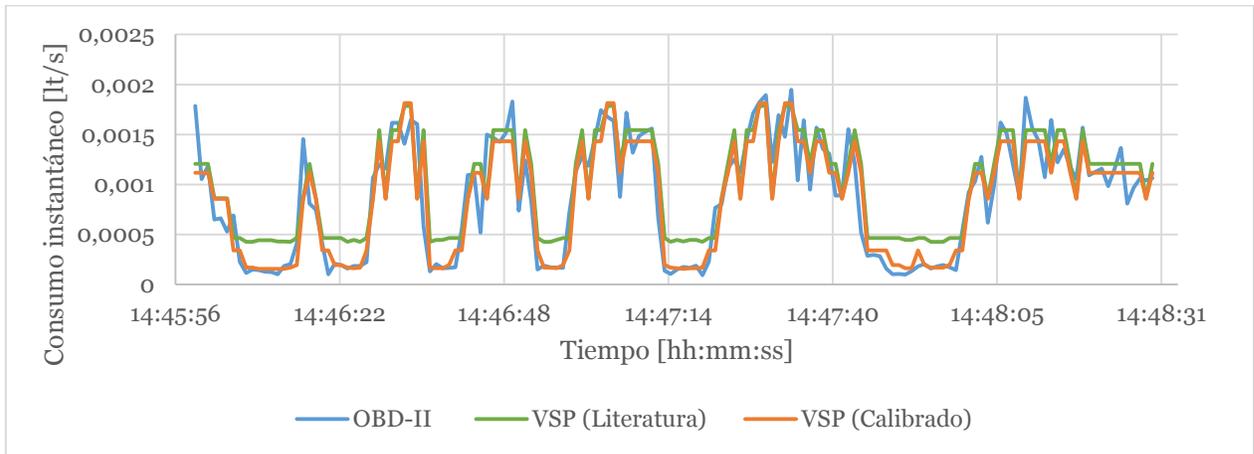


Figura 118. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 7

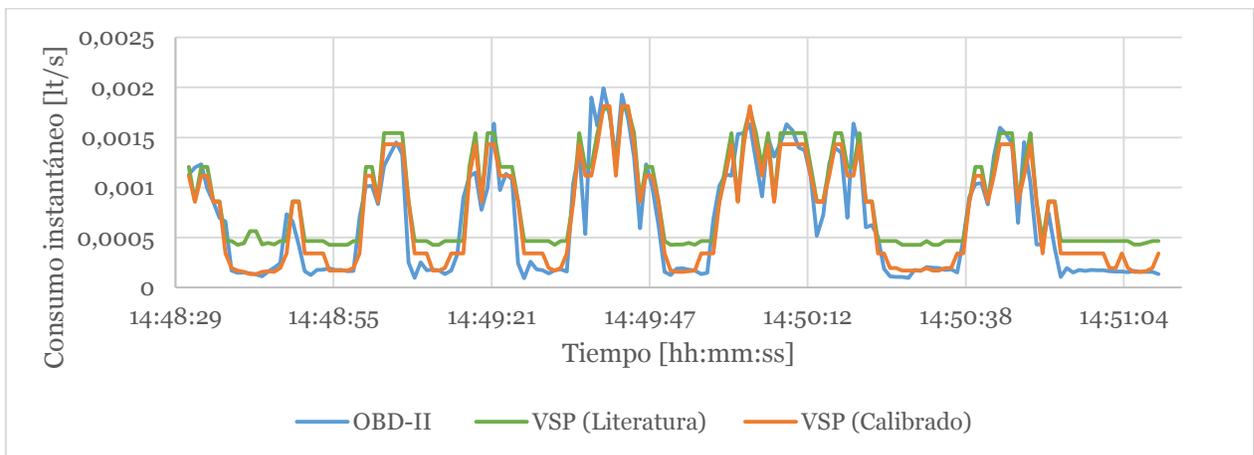


Figura 119. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 3, periodo de Línea Base, vuelta 8

D.2.4. Consumo vehículo 4

D.2.4.1. Consumo Línea Base

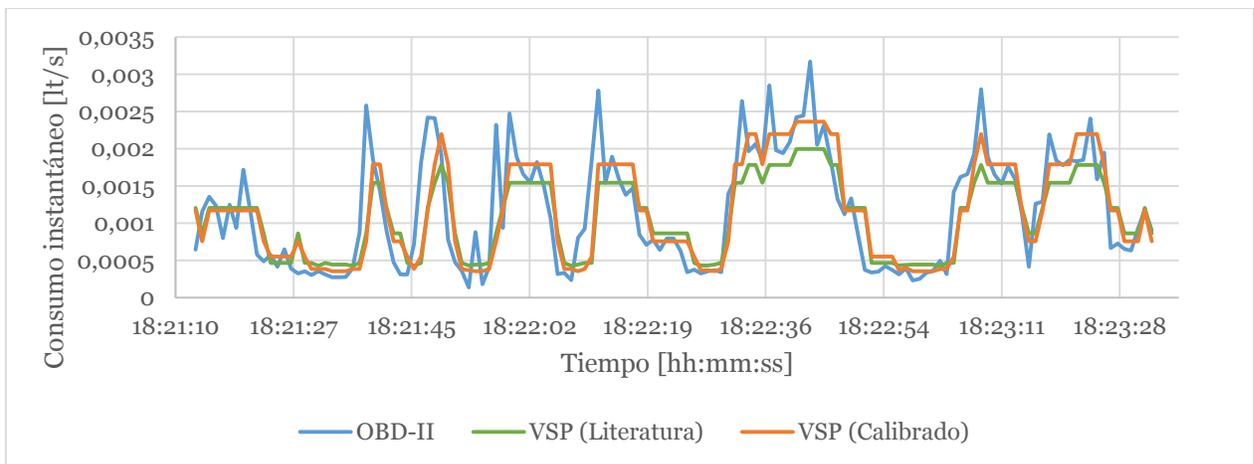


Figura 120. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 1

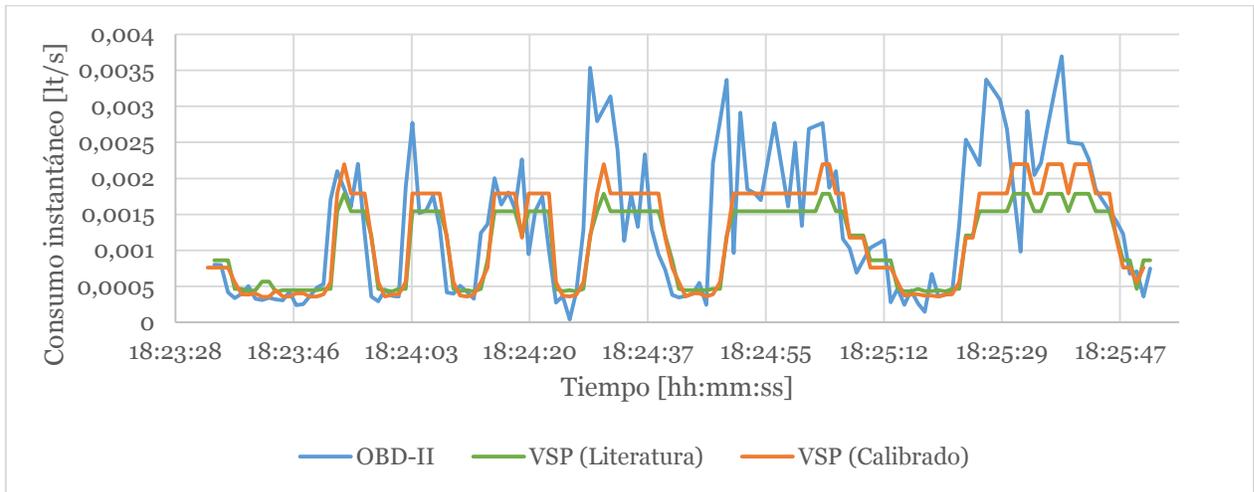


Figura 121. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 2

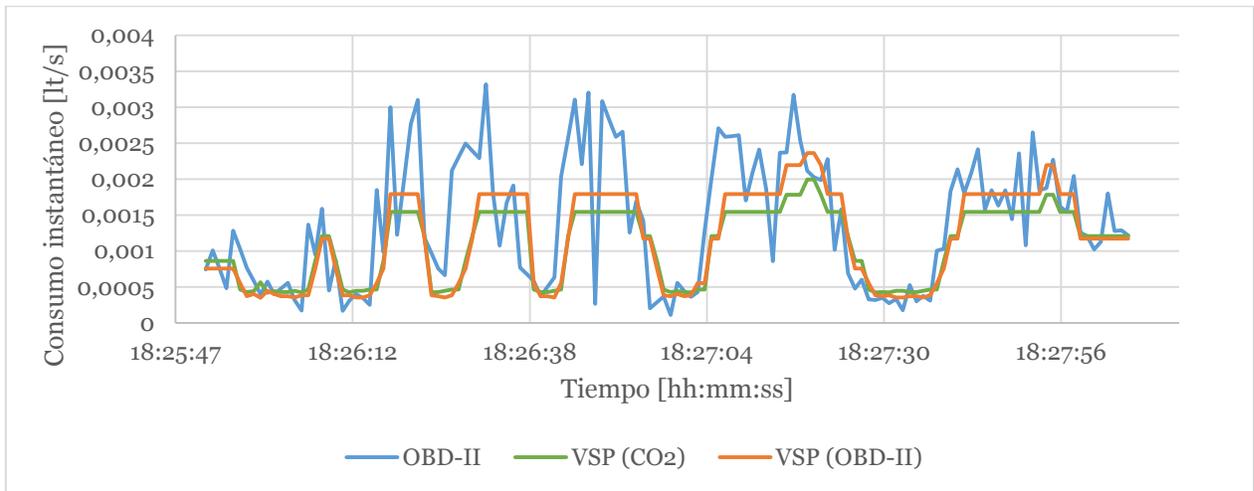


Figura 122. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 3

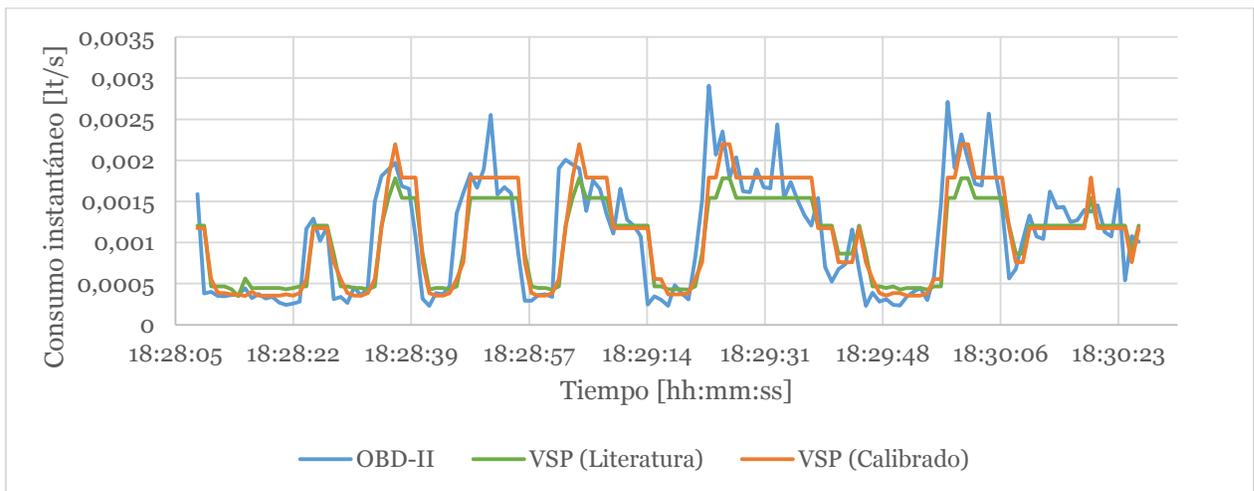


Figura 123. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 4

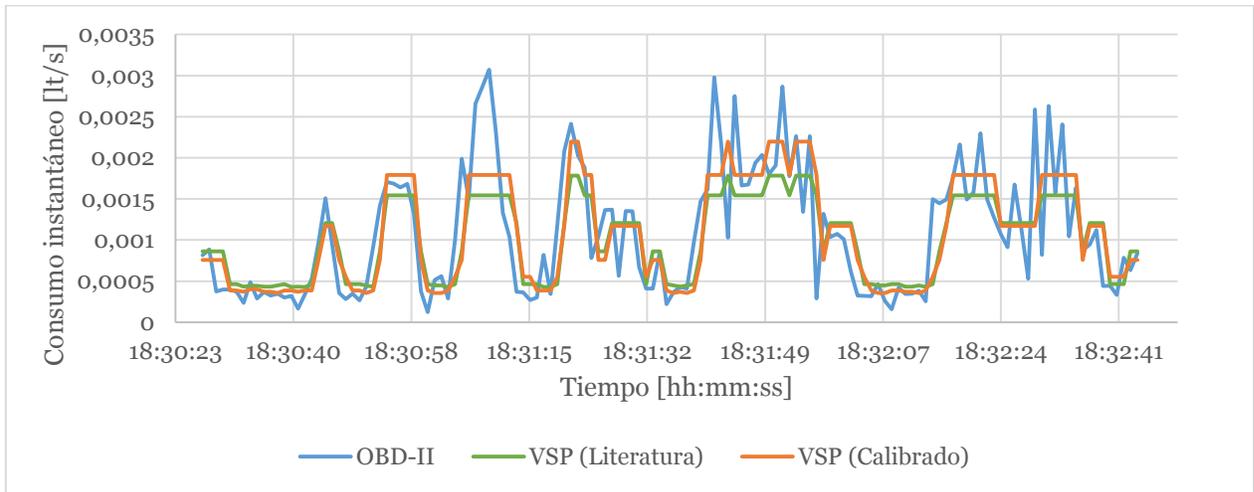


Figura 124. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 5

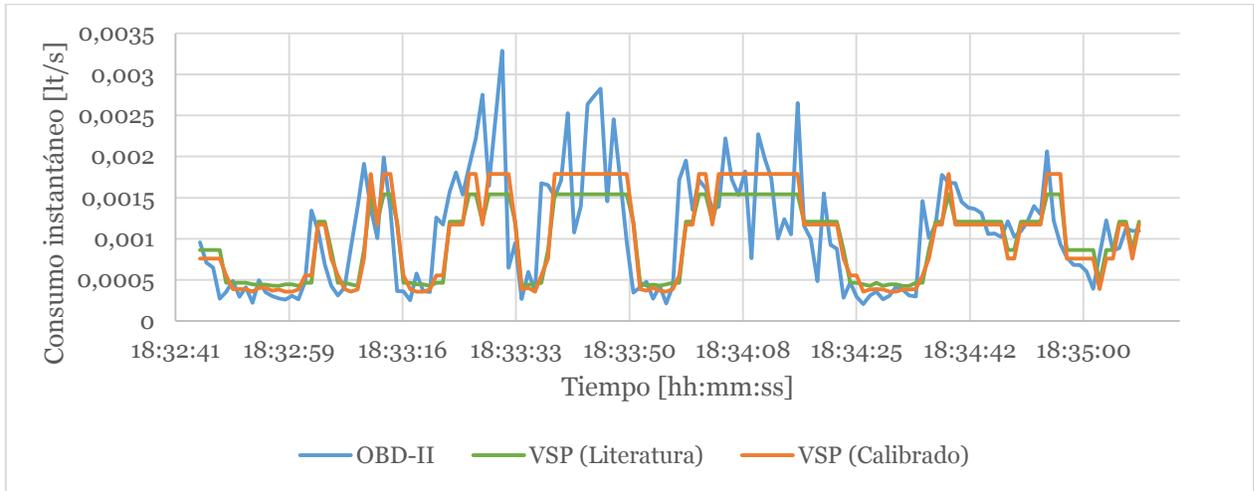


Figura 125. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 6

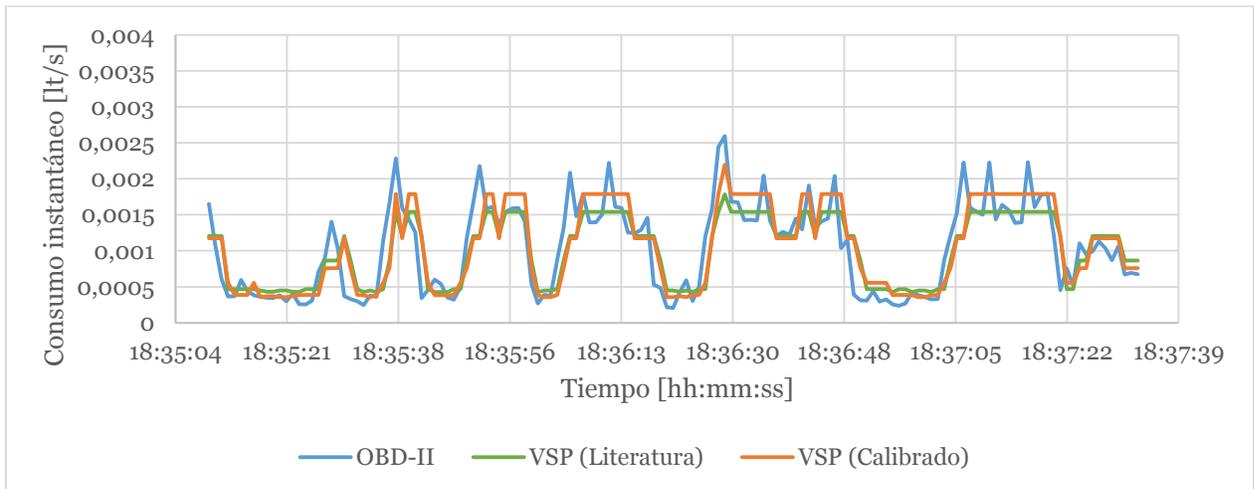


Figura 126. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 7

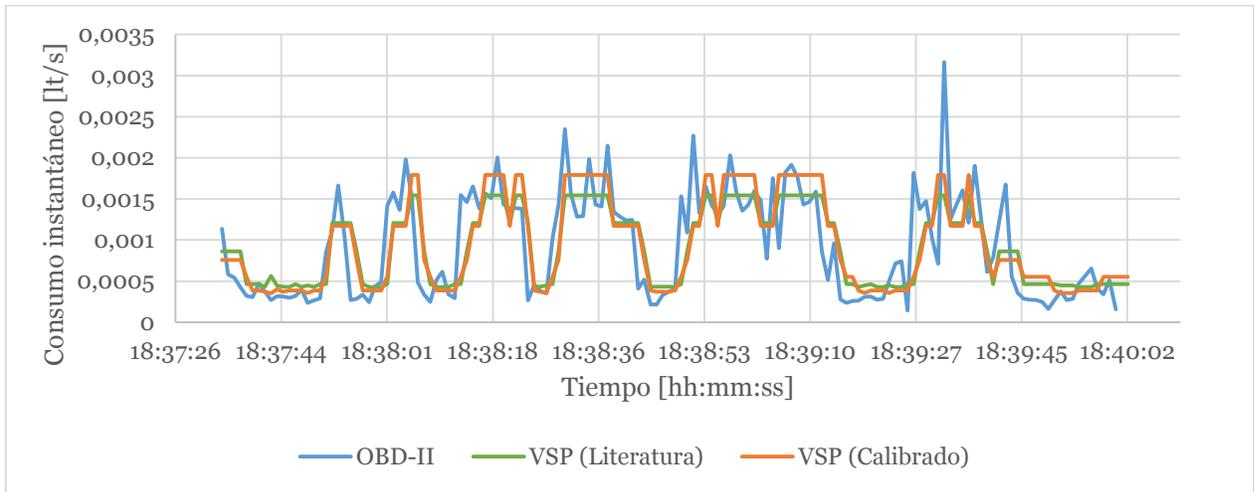


Figura 127. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo de Línea Base, vuelta 8

D.2.4.2. Consumo Demostrativo de Ahorro

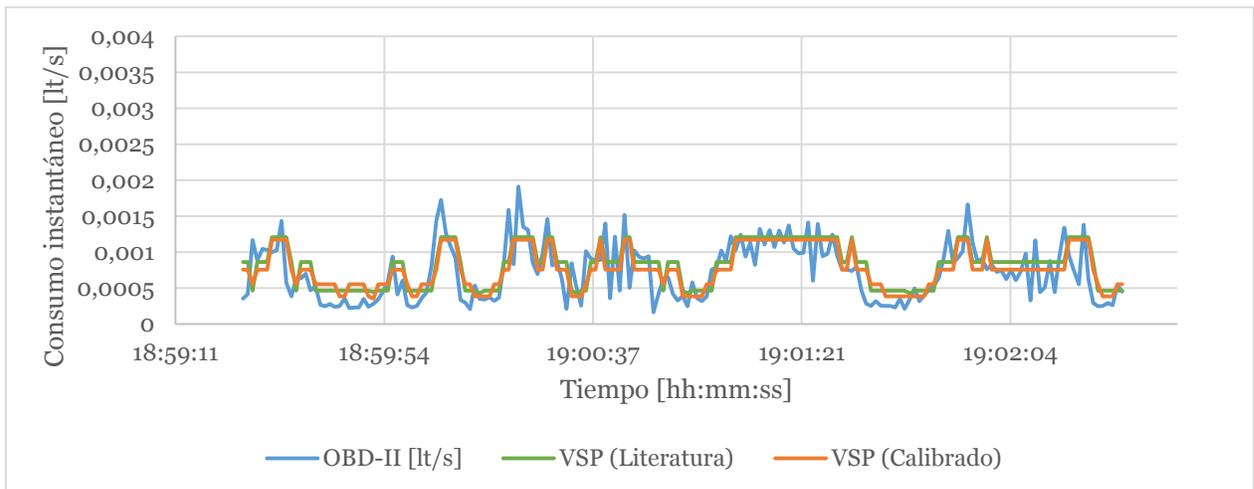


Figura 128. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1

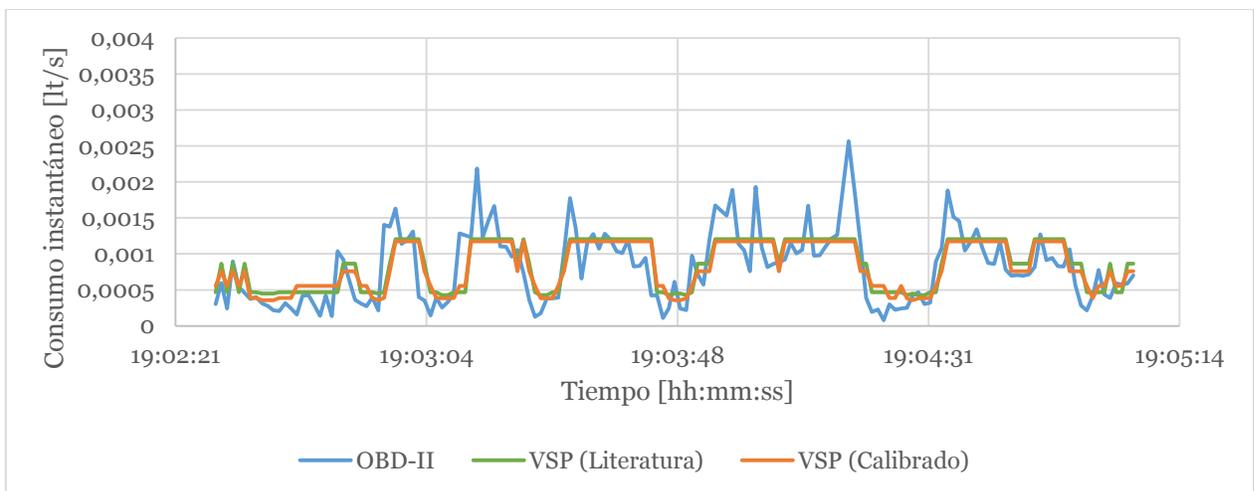


Figura 129. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2

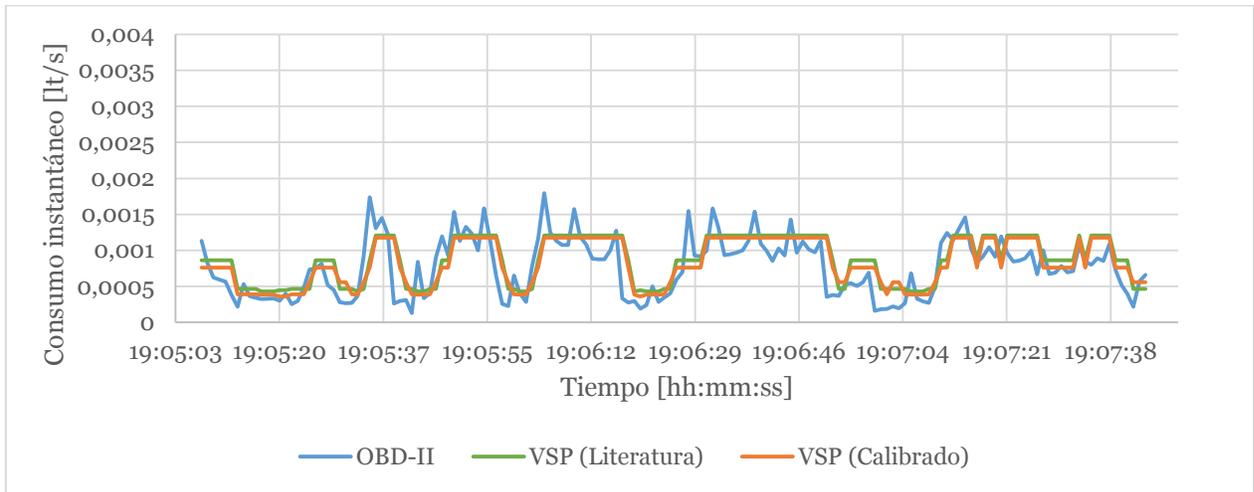


Figura 130. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3

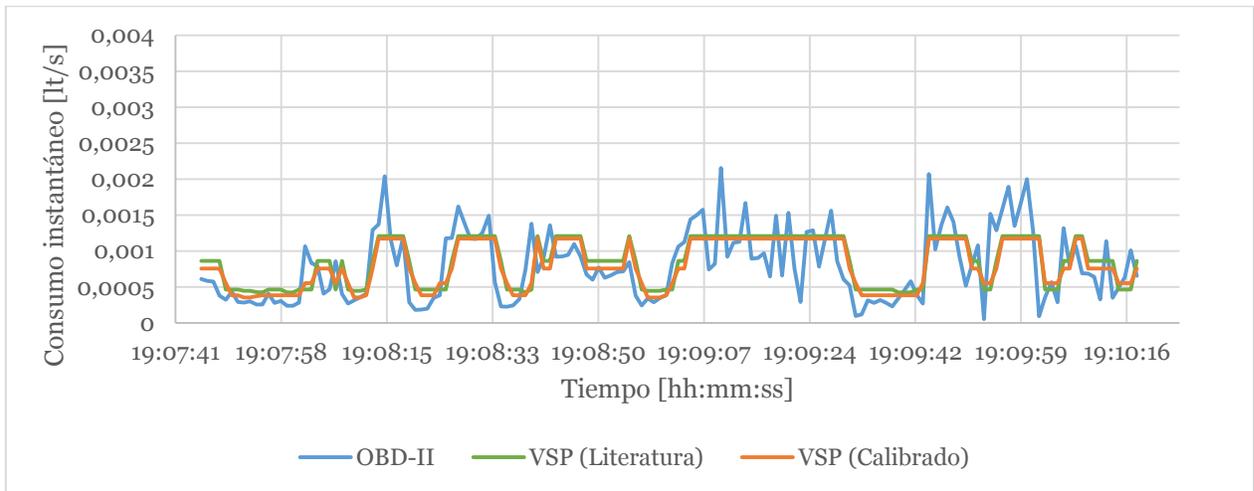


Figura 131. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4

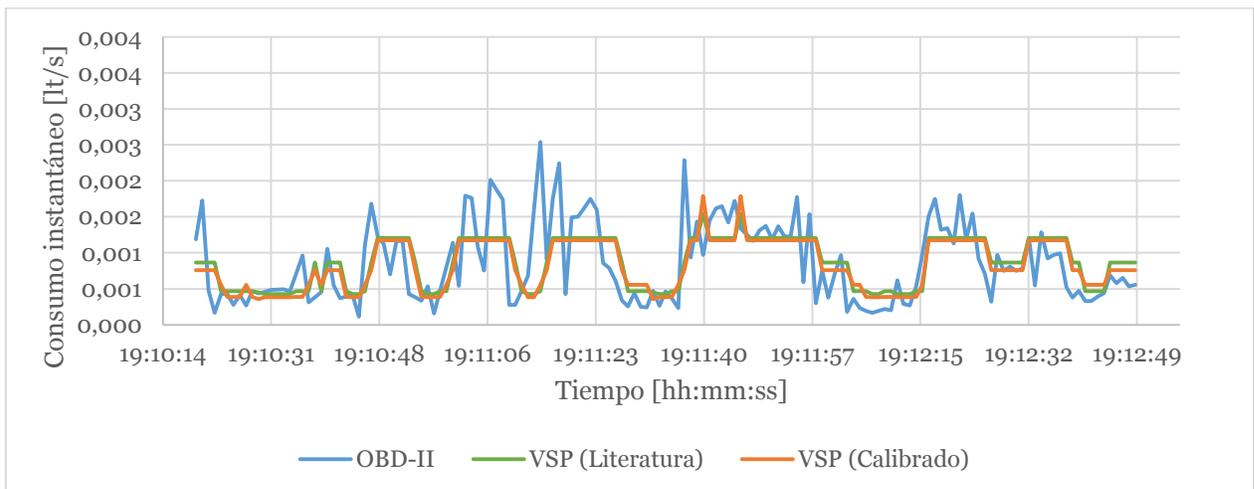


Figura 132. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 5

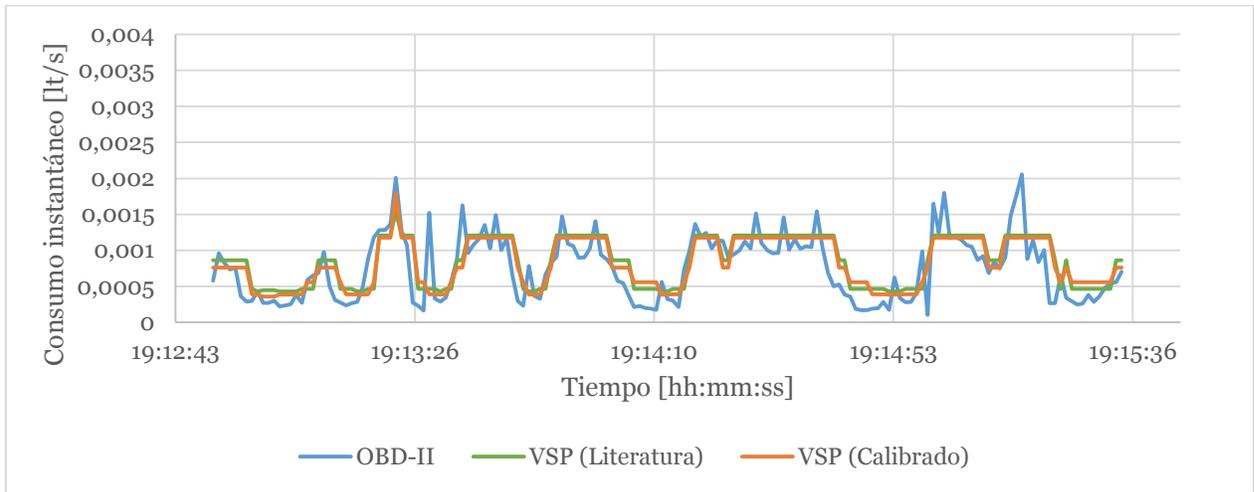


Figura 133. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 6

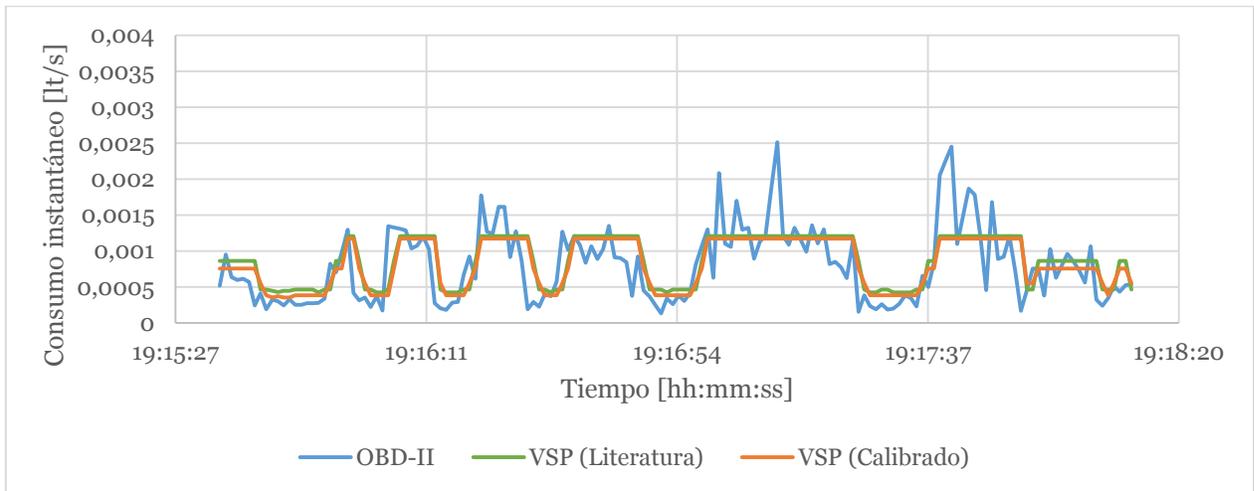


Figura 134. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 7

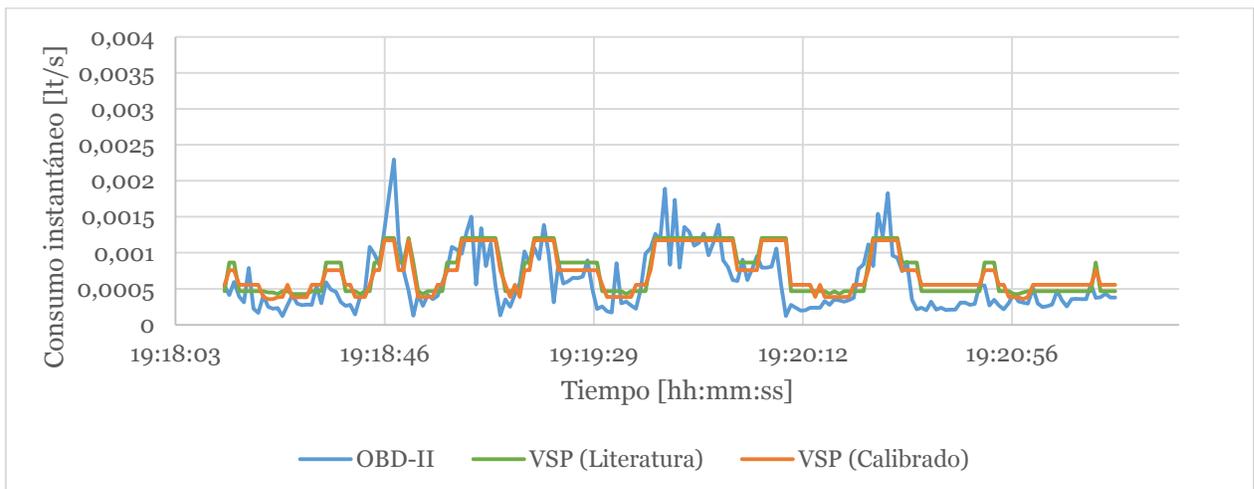


Figura 135. Consumo de combustible segundo a segundo, vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 8

D.2.5. Consumo vehículo 5

D.2.5.1. Consumo Línea Base

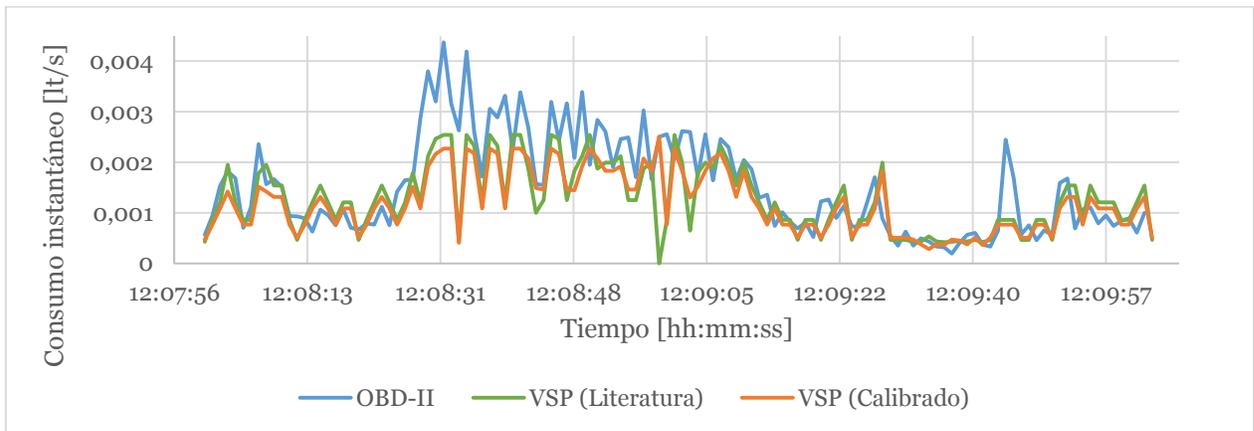


Figura 136. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 1 de 4

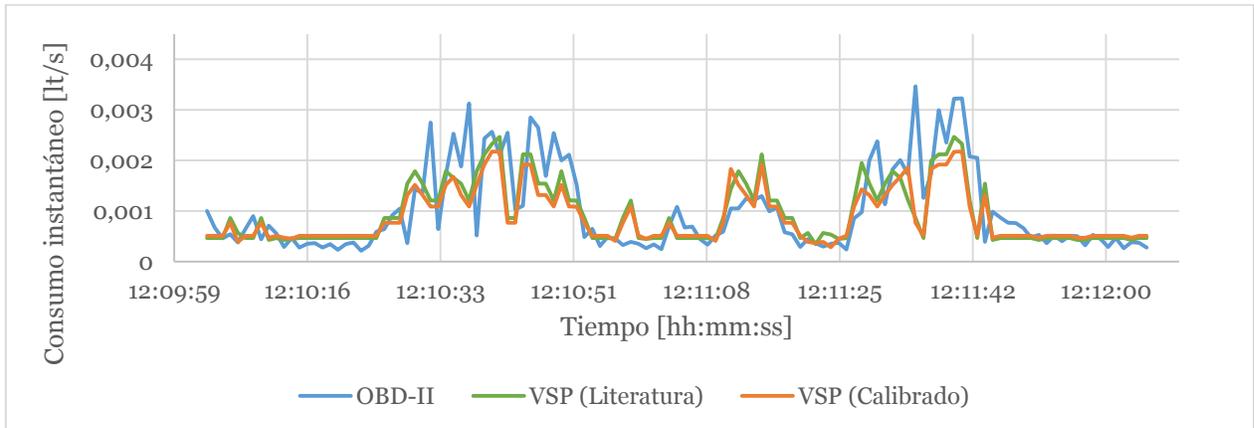


Figura 137. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 2 de 4

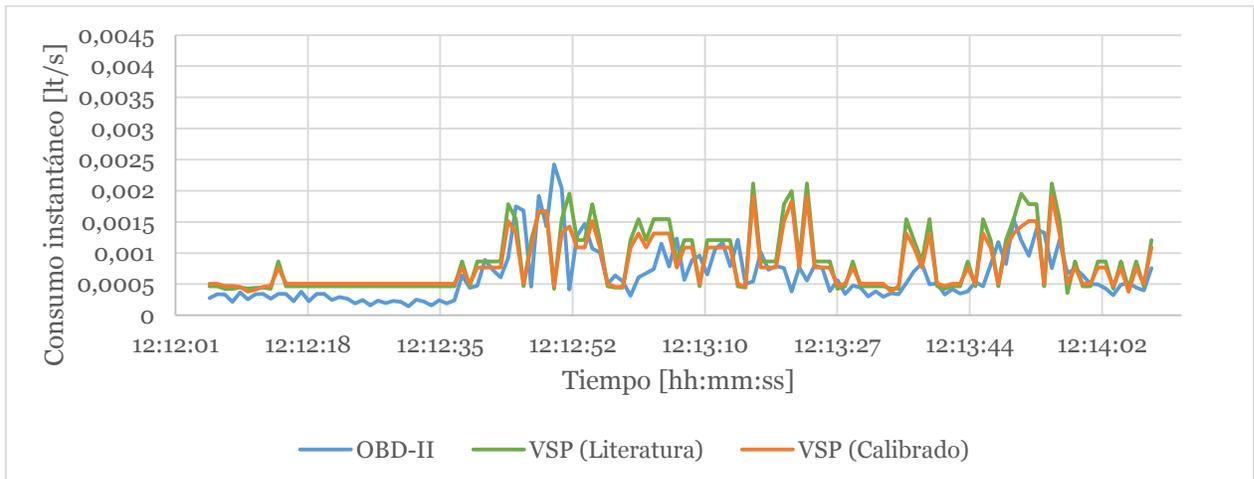


Figura 138. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 3 de 4

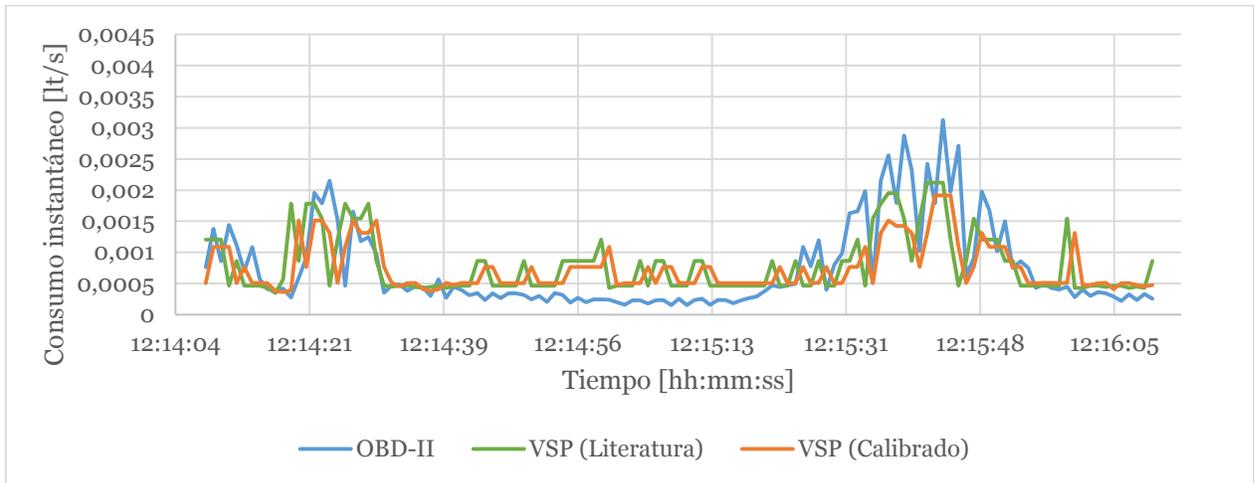


Figura 139. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 1, parte 4 de 4

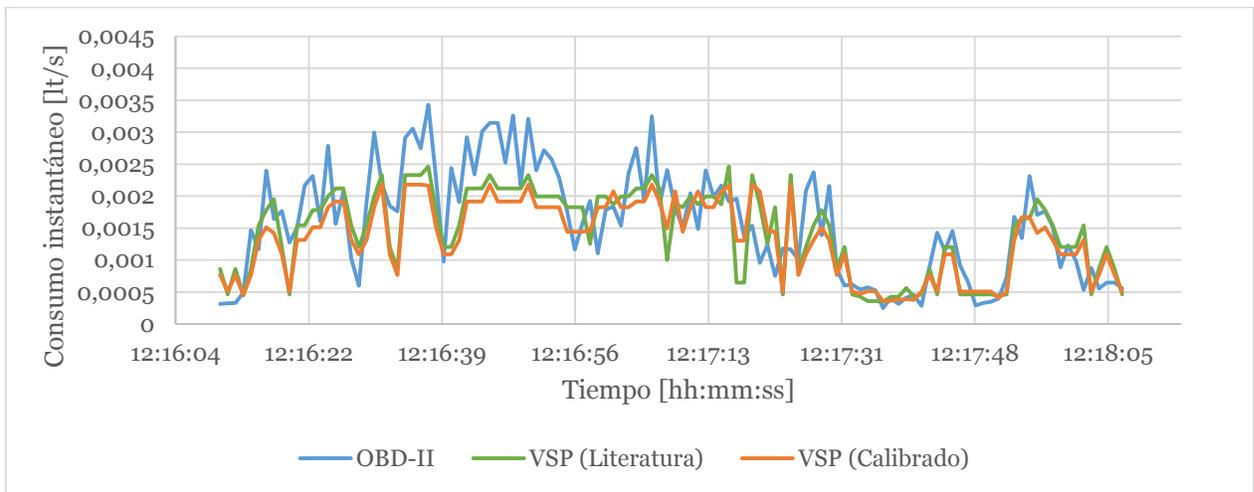


Figura 140. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 1 de 4

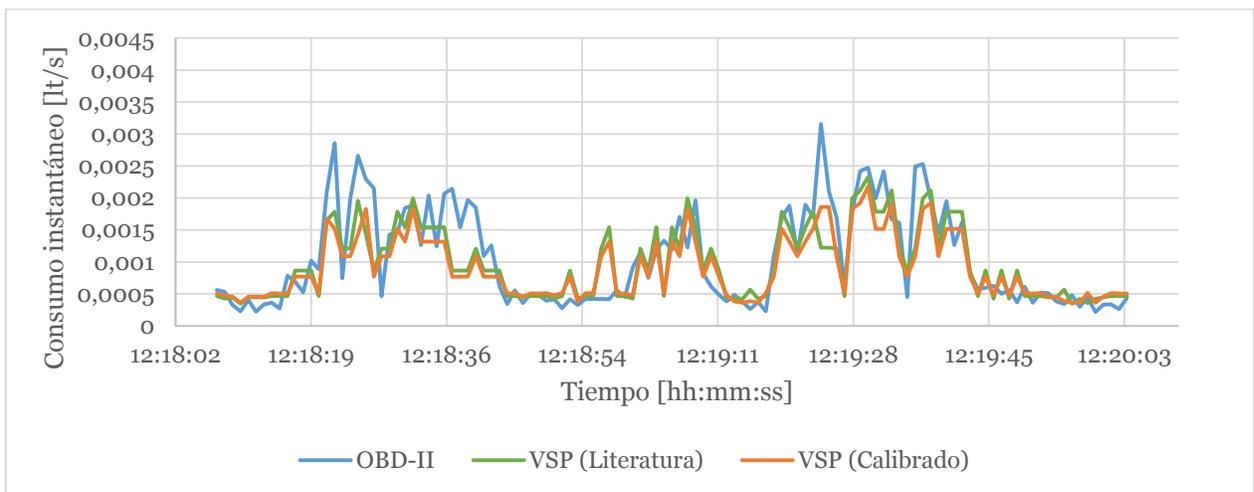


Figura 141. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 2 de 4

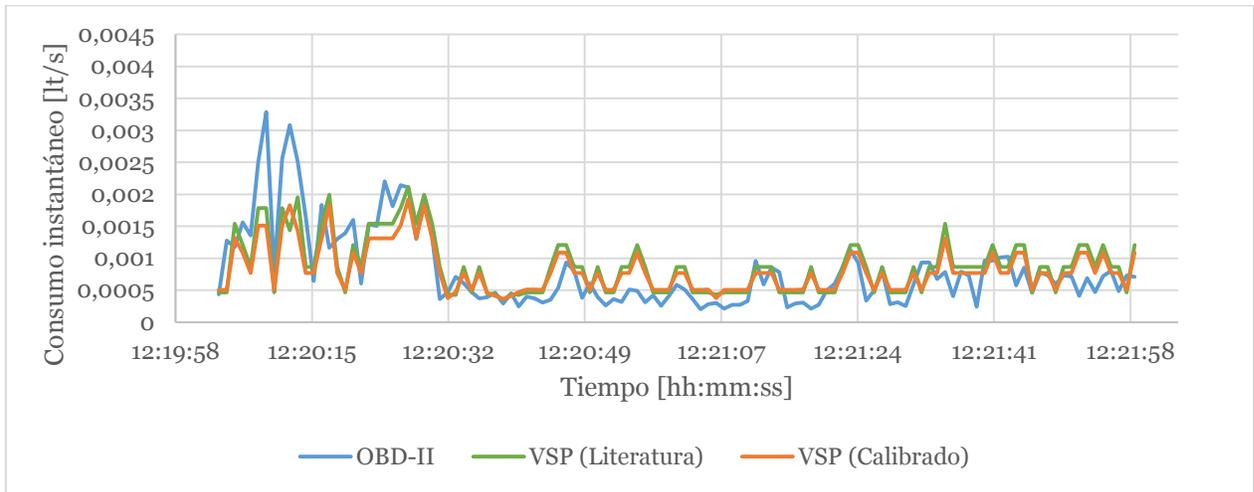


Figura 142. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 3 de 4

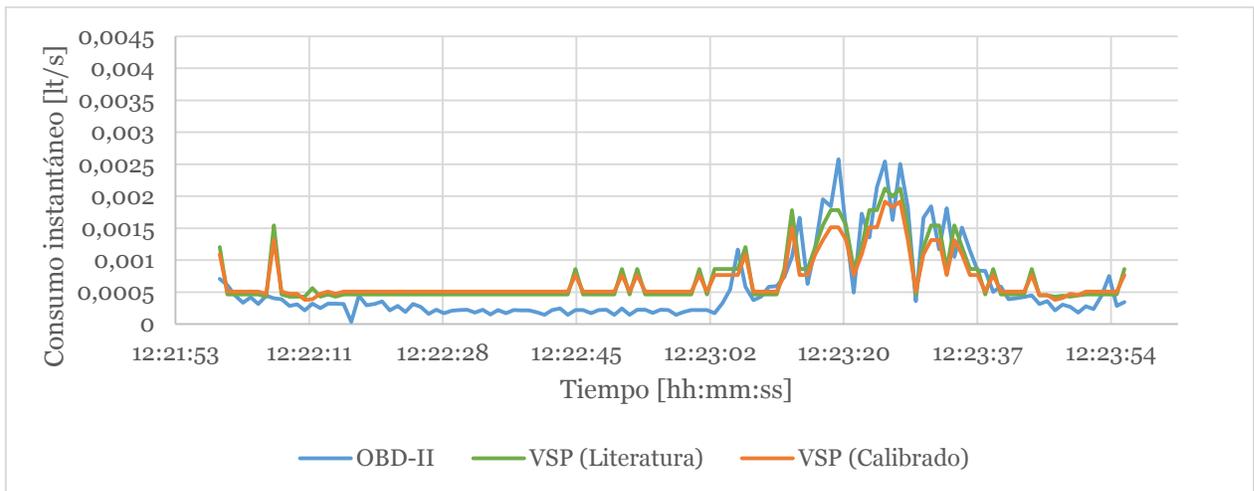


Figura 143. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 2, parte 4 de 4

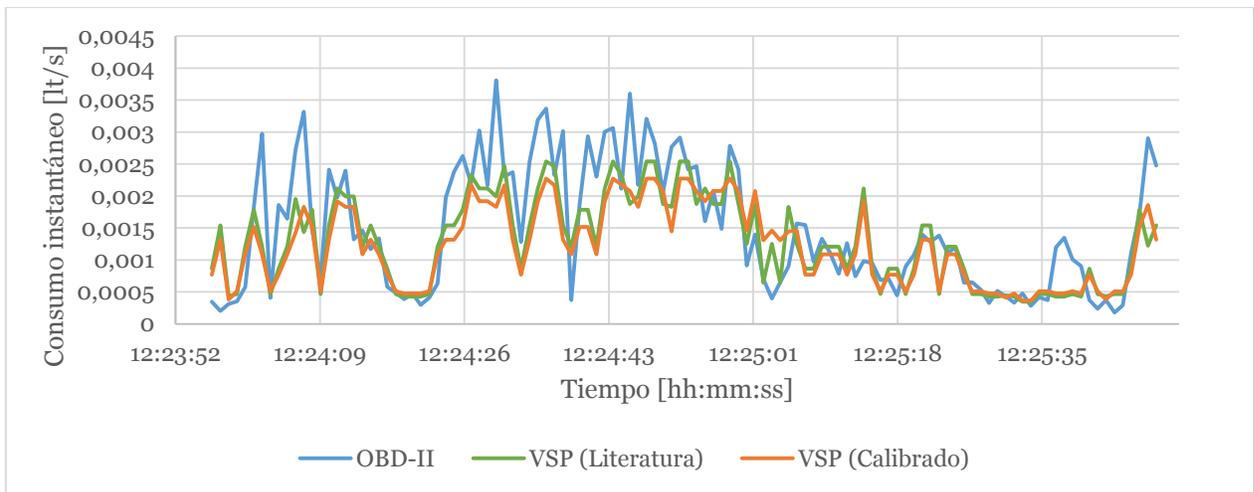


Figura 144. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 1 de 4

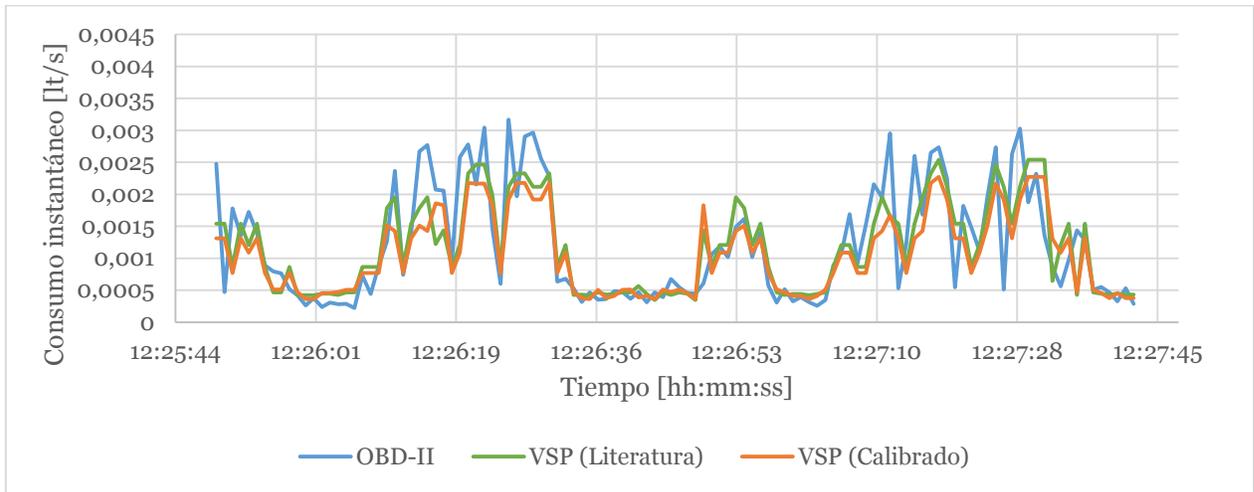


Figura 145. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 2 de 4

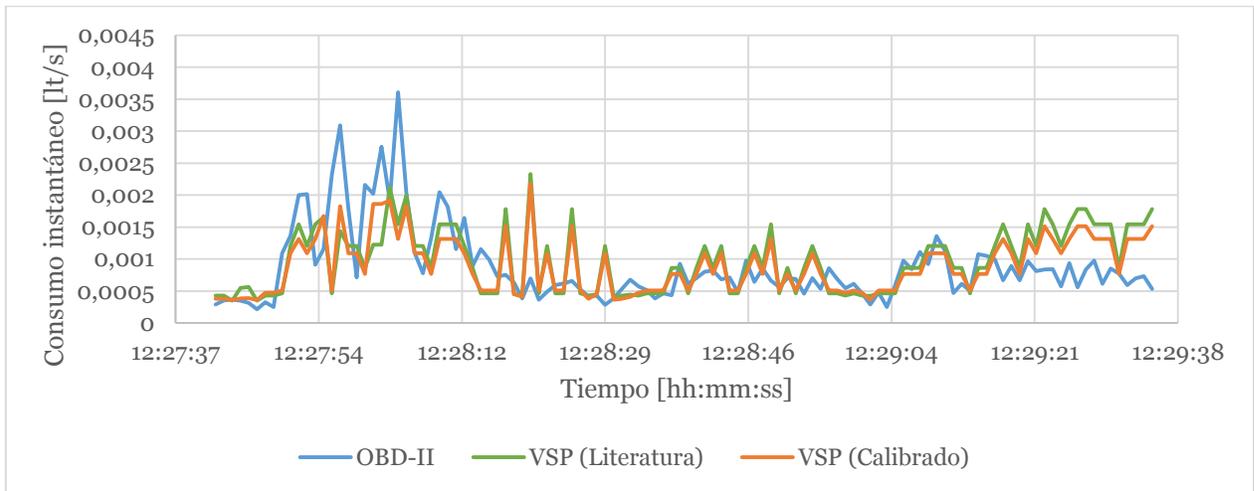


Figura 146. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 3 de 4

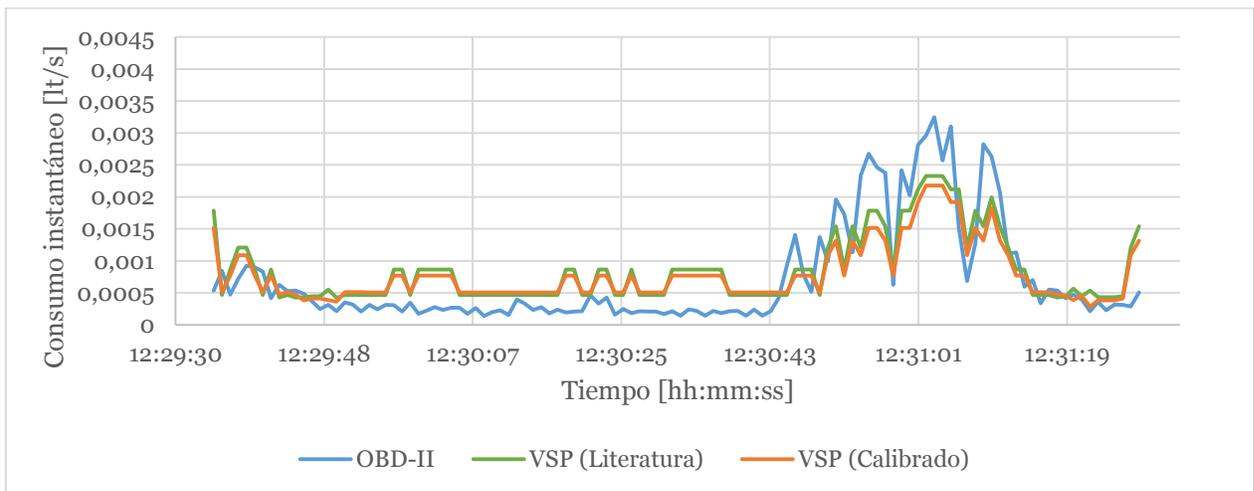


Figura 147. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 3, parte 4 de 4

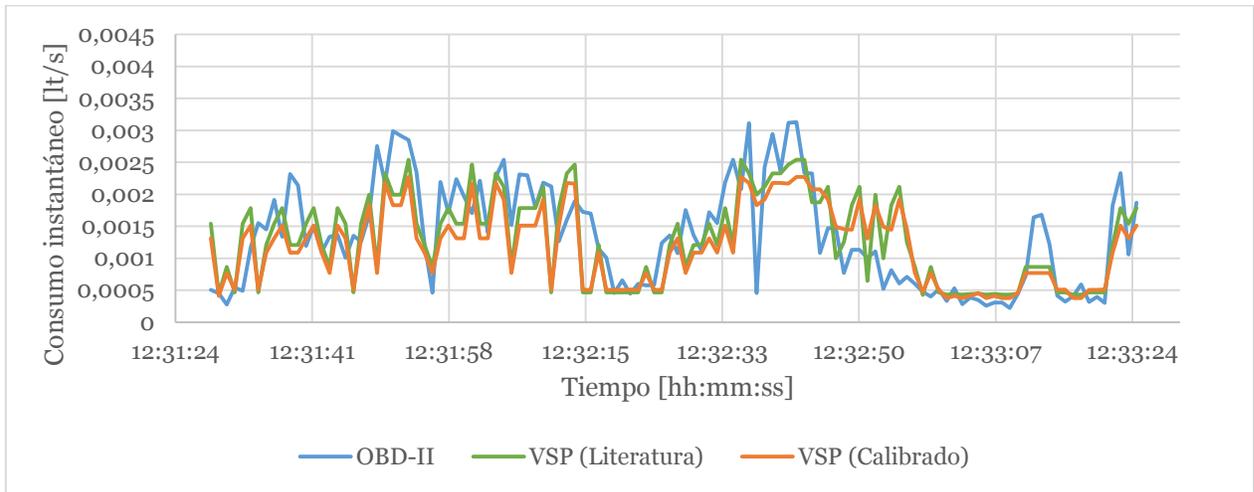


Figura 148. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 1 de 4

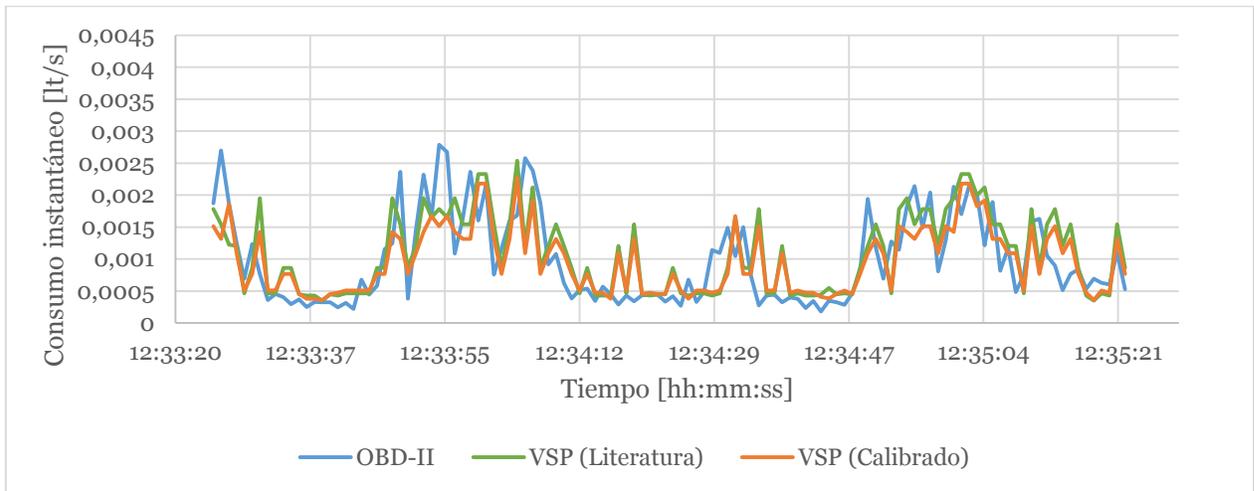


Figura 149. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 2 de 4

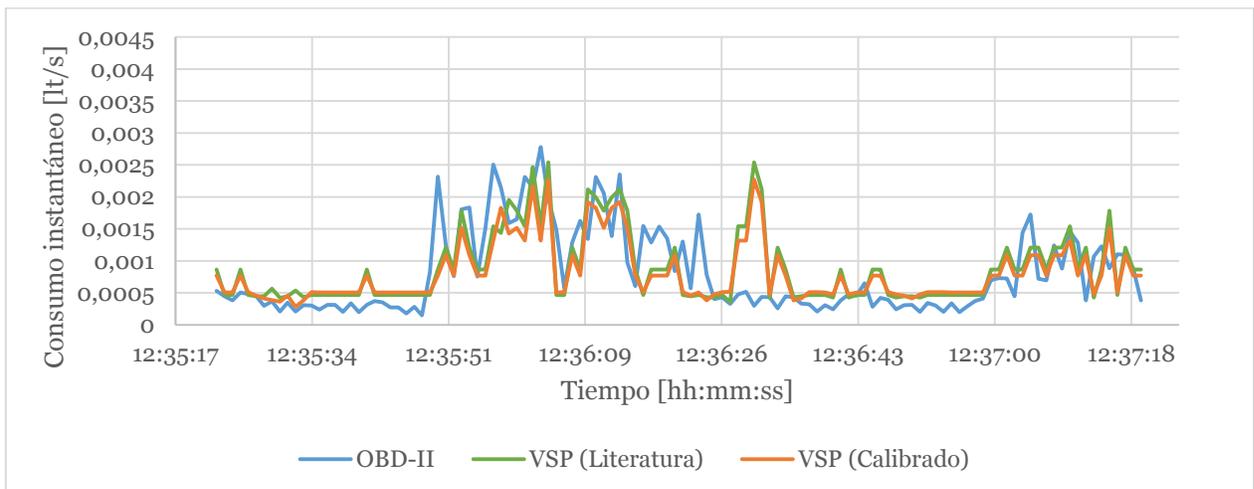


Figura 150. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 3 de 4

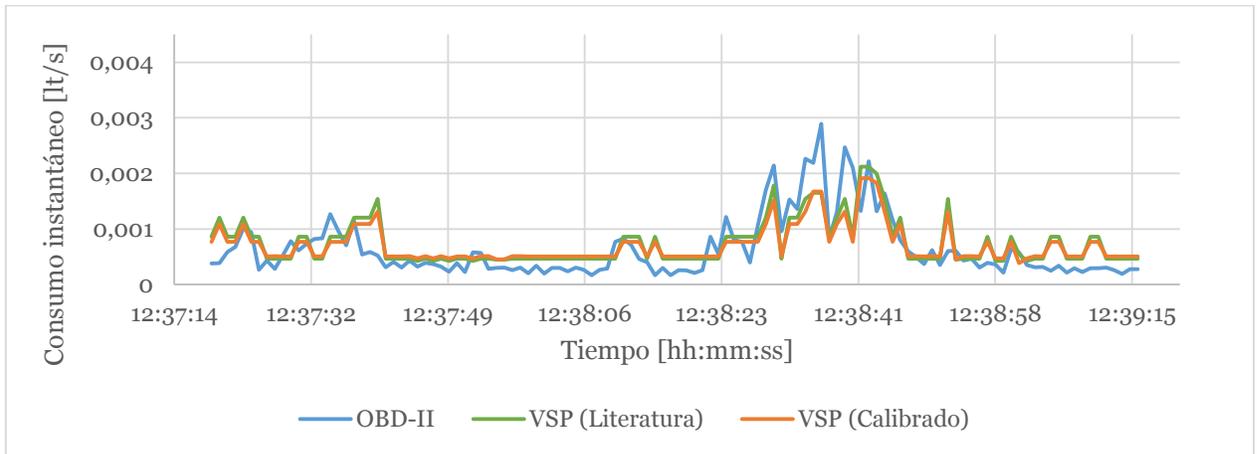


Figura 151. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo de Línea Base, vuelta 4, parte 4 de 4

D.2.5.2. Consumo Demostrativo de Ahorro

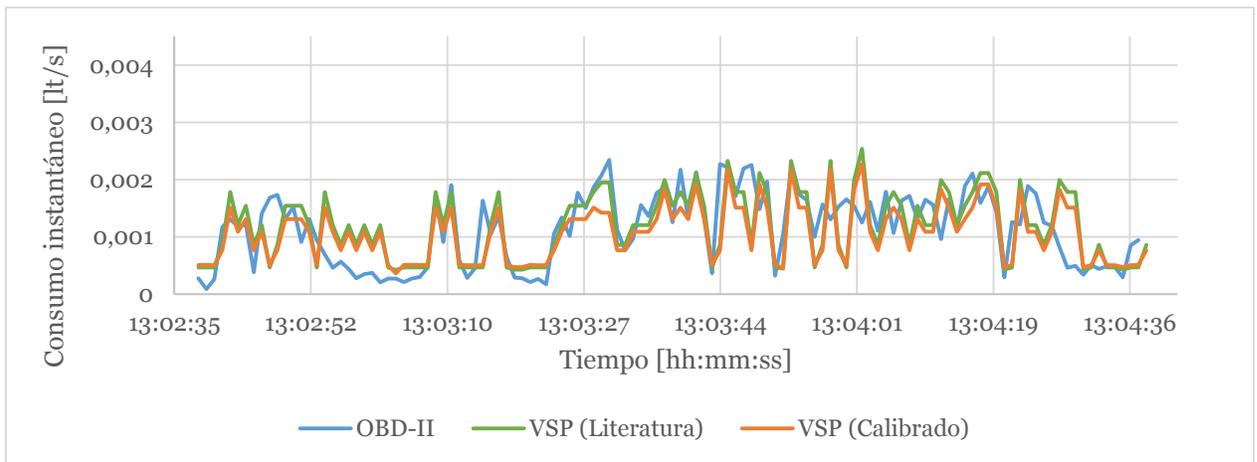


Figura 152. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 1 de 4

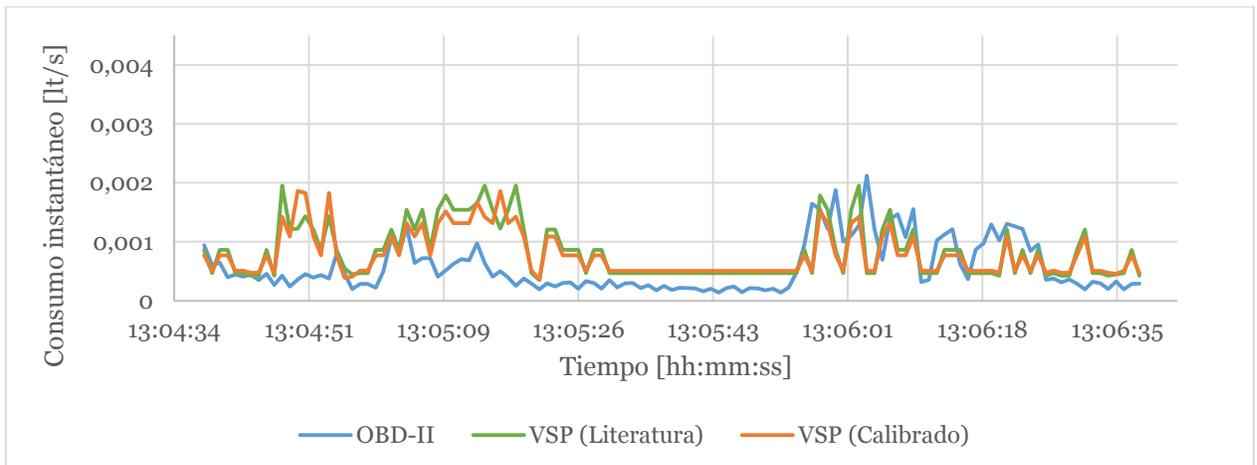


Figura 153. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 2 de 4

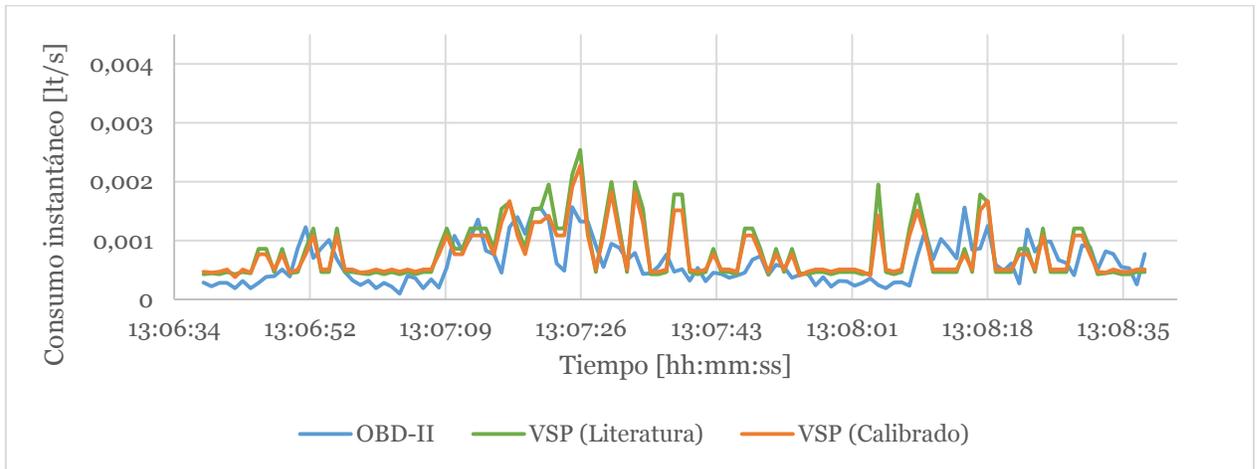


Figura 154. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 3 de 4

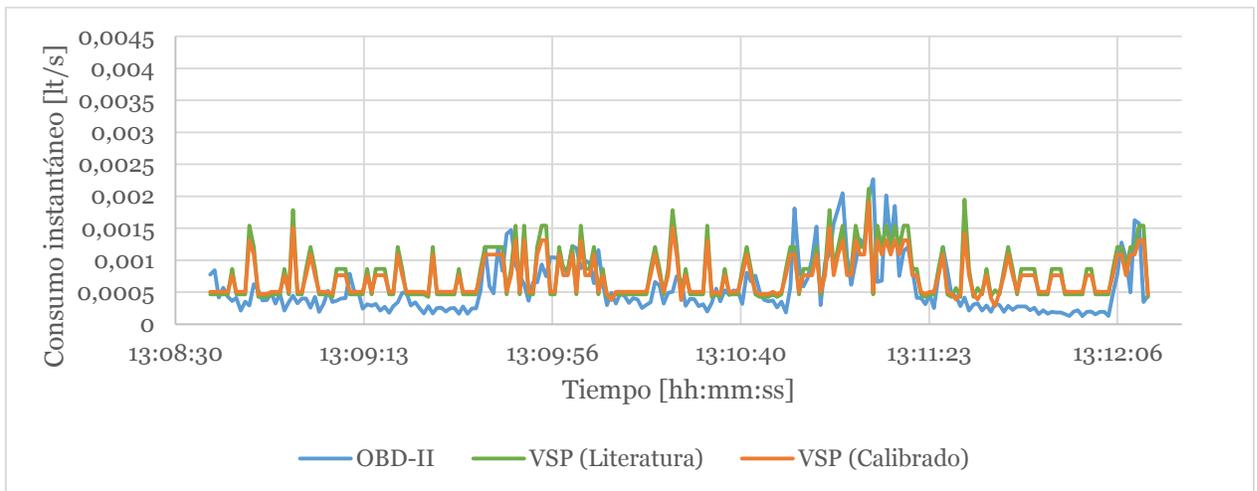


Figura 155. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 1, parte 4 de 4

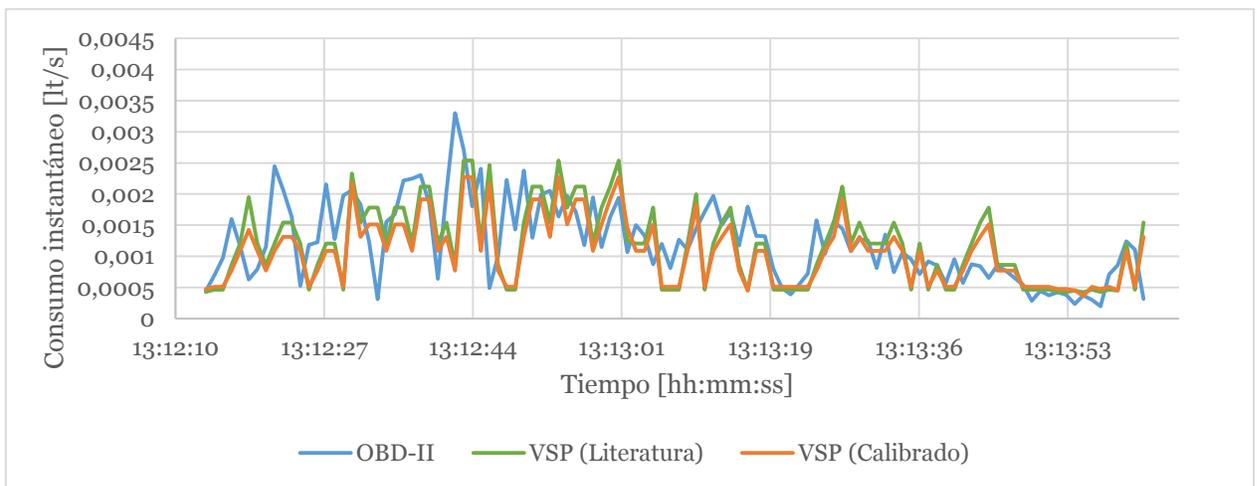


Figura 156. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 1 de 4

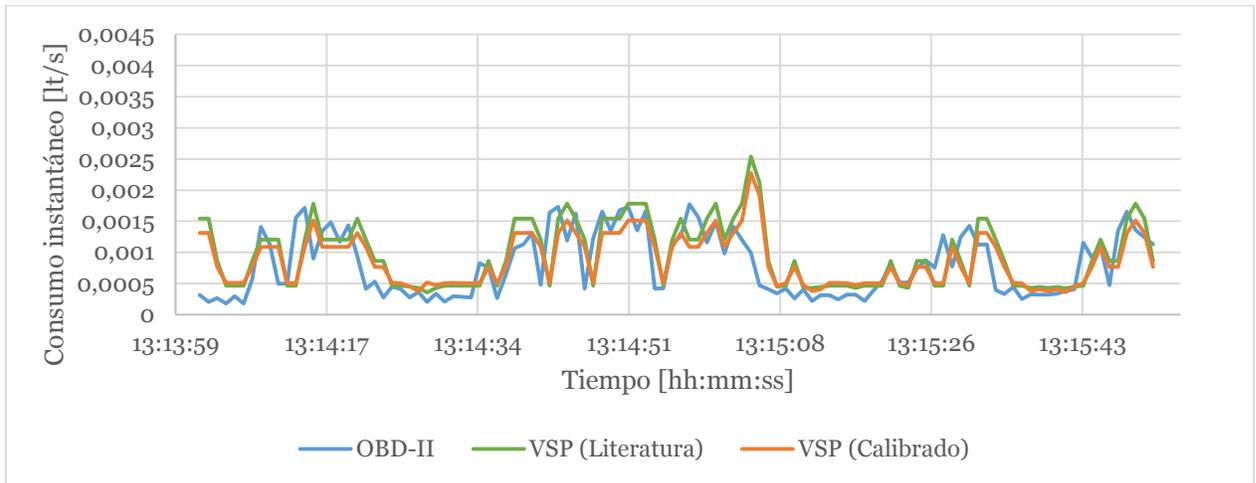


Figura 157. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 2 de 4

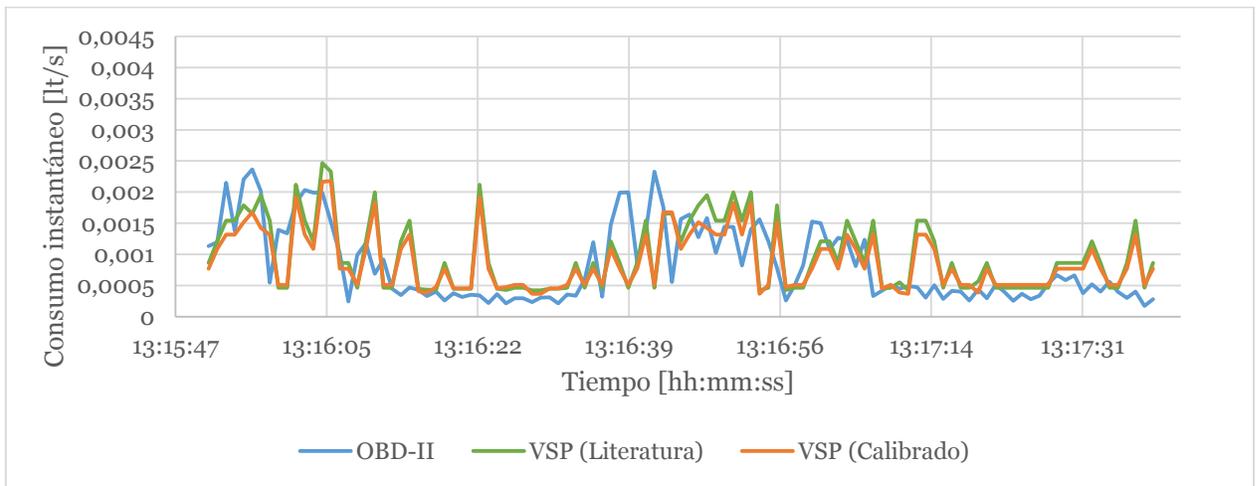


Figura 158. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 3 de 4

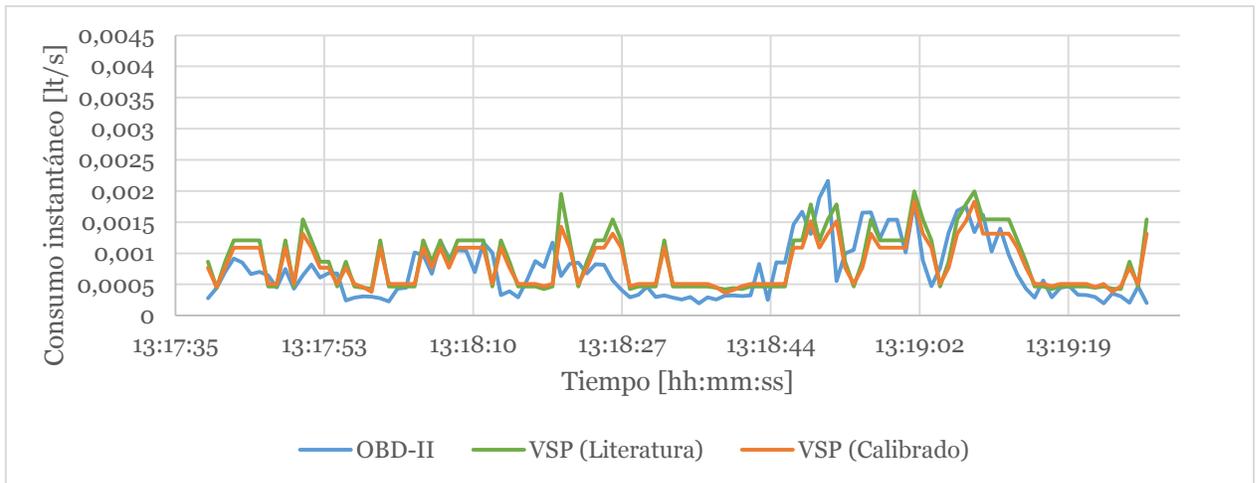


Figura 159. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 2, parte 4 de 4

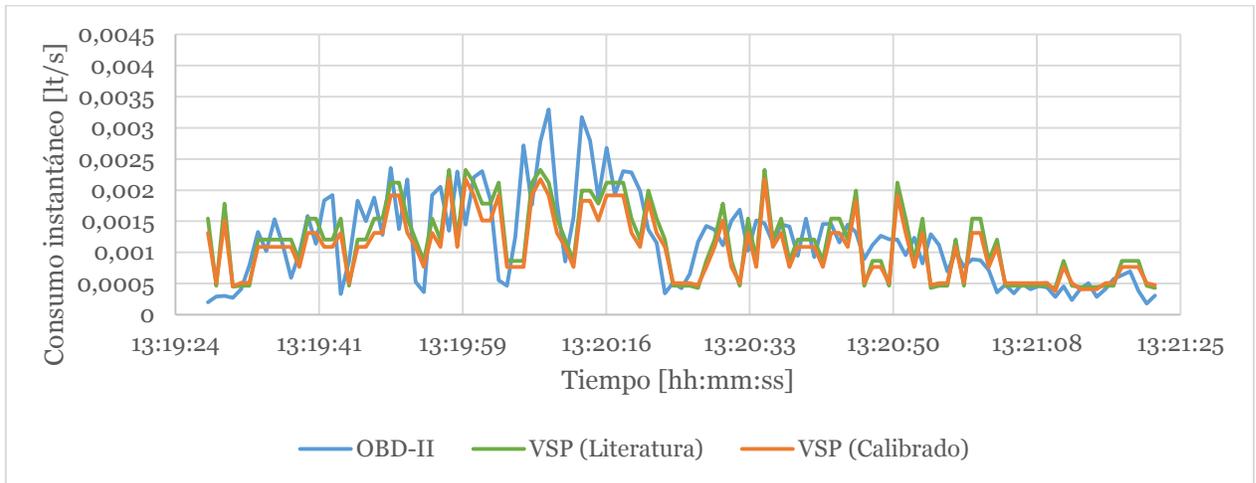


Figura 160. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 1 de 4

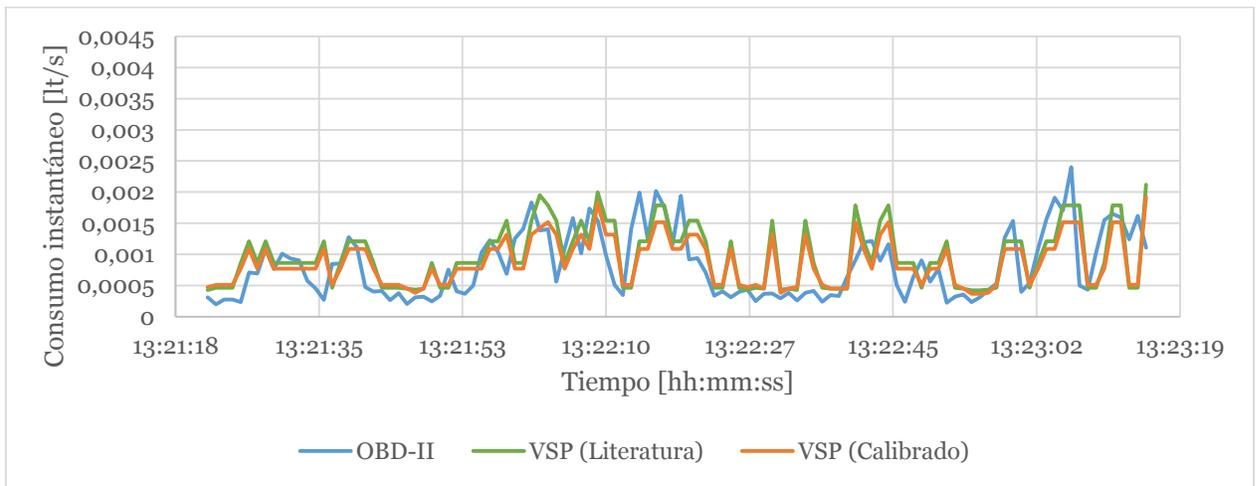


Figura 161. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 2 de 4

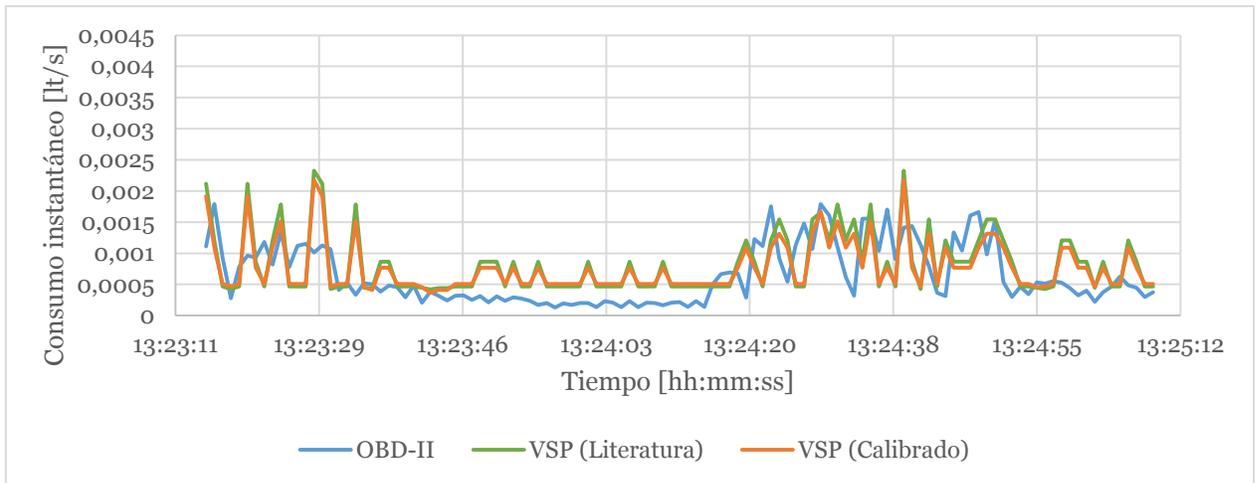


Figura 162. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 3 de 4

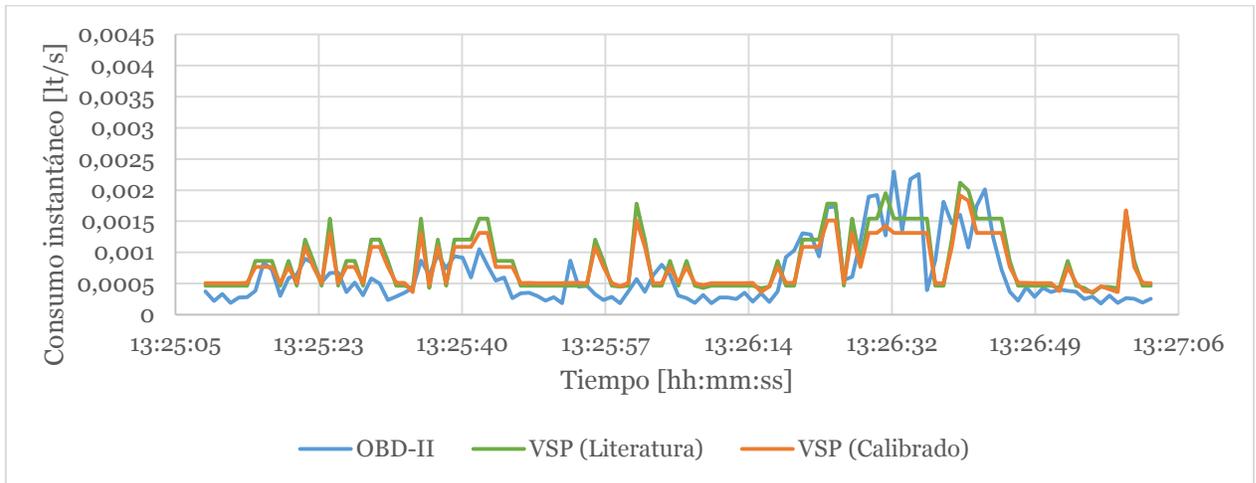


Figura 163. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 3, parte 4 de 4

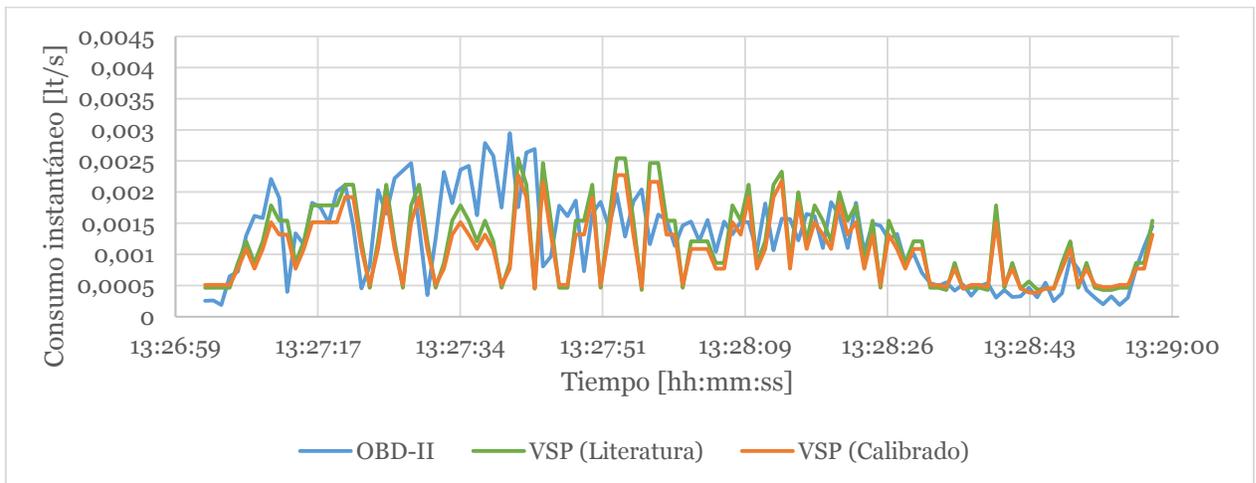


Figura 164. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 1 de 4

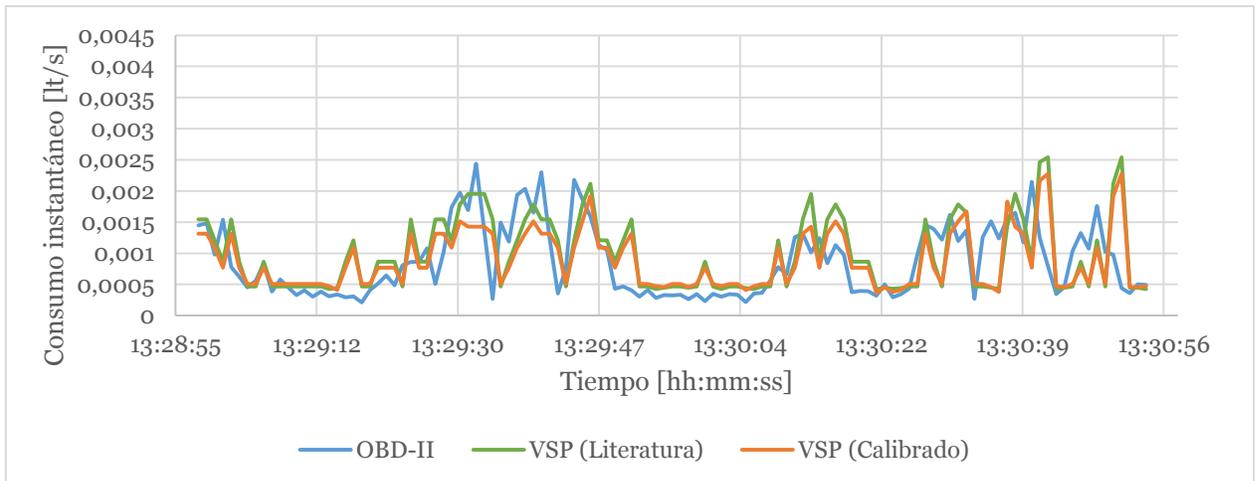


Figura 165. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 2 de 4

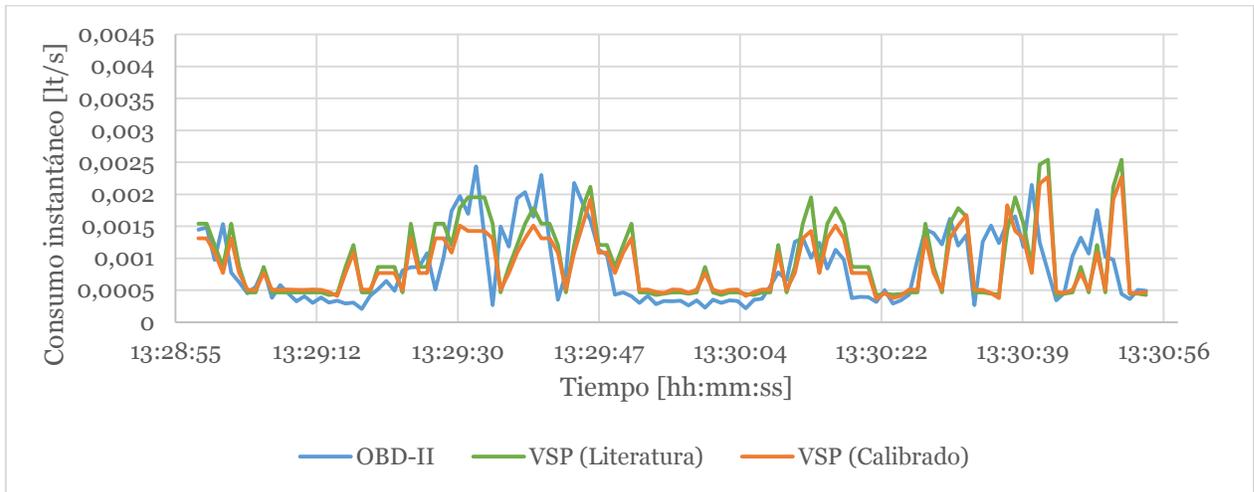


Figura 166. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 3 de 4

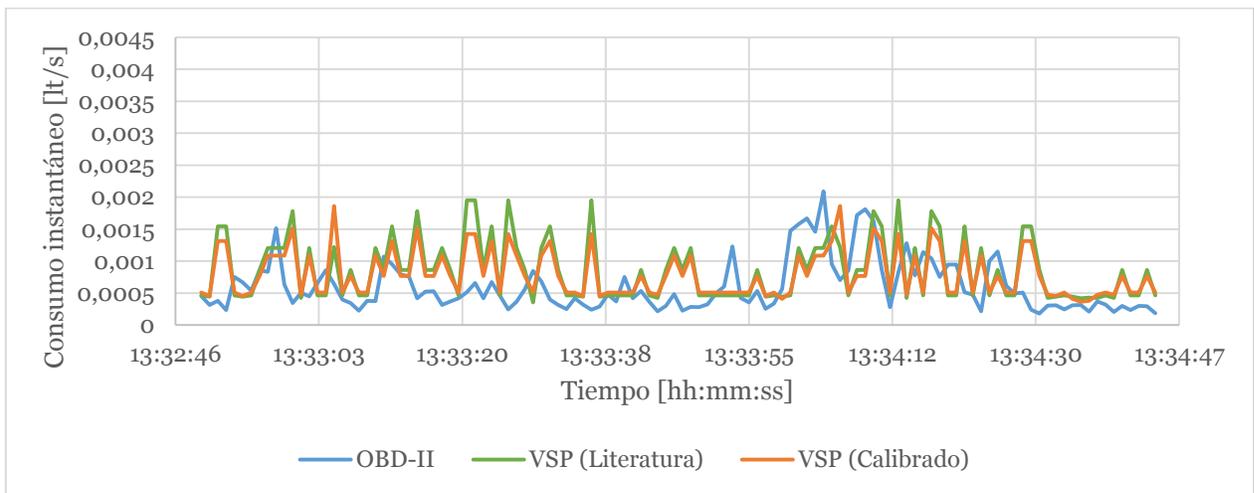


Figura 167. Consumo de combustible segundo a segundo vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro, vuelta 4, parte 4 de 4

D.3. Diferencias entre consumos medidos con Monitor y VSP vs OBD-II

A continuación se presentan los resultados de la diferencia entre los consumos por vuelta calculados con Monitor del vehículo y VSP (tanto con factores de consumo obtenido de literatura como con factores de consumo calibrados con resultados de OBD-II) versus los consumos obtenidos con OBD-II.

Tabla 32. Diferencia por vuelta del vehículo 1, periodo de Línea Base.

Vuelta	Línea Base					
	Monitor		VSP (CO2)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %

1	-0,00457	-3,16%	0,01699	12,0%	0,00002	0,01%
2	-0,00556	-3,99%	0,01355	9,88%	-0,00181	-1,32%
3	-0,00745	-5,33%	0,01496	10,9%	-0,00028	-0,20%
4	-0,00588	-4,41%	0,01295	9,39%	-0,00198	-1,43%
5	-0,00410	-3,10%	0,01257	9,05%	-0,00323	-2,33%
6	-0,00191	-1,52%	0,01093	7,38%	-0,00087	-0,59%
7	-0,00803	-6,08%	0,00772	5,20%	-0,00377	-2,54%
8	0,00539	5,03%	0,01492	12,2%	-0,00001	-0,01%

Tabla 33. Diferencia por vuelta del vehículo 1, periodo Demostrativo de Ahorro.

Vuelta	Demostrativo de ahorro					
	Monitor		VSP (CO ₂)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	-0,01310	-9,38%	0,02137	15,3%	0,00192	1,38%
2	0,00470	3,91%	0,02562	21,3%	0,00793	6,61%
3	-0,00265	-2,20%	0,02600	21,6%	0,00851	7,06%
4	0,00352	3,04%	0,02974	25,6%	0,01160	10,0%
5	-0,00100	-0,83%	0,02791	23,3%	0,00981	8,18%
6	-0,00507	-4,16%	0,02430	19,9%	0,00635	5,21%
7	-0,00516	-4,29%	0,02236	18,6%	0,00453	3,77%
8	-0,00494	-4,49%	0,02155	19,6%	0,00424	3,86%

Tabla 34. Diferencia por vuelta del vehículo 2, periodo de Línea Base

Vuelta	Línea Base					
	Monitor		VSP (CO ₂)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	0,00996	5,70%	-0,01929	-11,0%	0,00370	2,12%
2	-0,00235	-1,36%	-0,02694	-15,6%	-0,00320	-1,86%
3	-0,00844	-4,72%	-0,02964	-16,6%	-0,00143	-0,80%
4	-0,00694	-3,97%	-0,02720	-15,6%	-0,00179	-1,02%
5	-0,02600	-13,4%	-0,03962	-20,4%	-0,00634	-3,26%
6	-0,01727	-9,24%	-0,02738	-14,6%	-0,00031	-0,17%
7	-0,01712	-9,00%	-0,01843	-9,69%	0,01665	8,75%
8	-0,00267	-1,67%	-0,02762	-17,2%	-0,00097	-0,61%

Tabla 35. Diferencia por vuelta del vehículo 2, periodo Demostrativo de Ahorro

Vuelta	Demostrativo de ahorro					
	Monitor		VSP (CO ₂)		VSP (OBD-II)	

	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	-0,00328	-2,55%	0,01695	13,1%	0,01300	10,1%
2	-0,00279	-2,25%	0,01072	8,7%	0,00659	5,33%
3	-0,00852	-7,22%	0,02127	18,0%	0,01695	14,4%
4	-0,00912	-7,57%	0,02062	17,1%	0,01673	13,9%
5	-0,00463	-4,08%	0,01940	17,1%	0,01556	13,7%
6	-0,00950	-8,13%	0,02028	17,4%	0,01686	14,4%
7	-0,00887	-7,68%	0,02211	19,2%	0,01708	14,8%
8	-0,01206	-11,1%	0,01936	17,9%	0,01466	13,5%

Tabla 36. Diferencia por vuelta del vehículo 3, periodo de Línea Base.

Vuelta	Línea Base					
	Monitor		VSP (CO ₂)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	-0,00457	-3,16%	0,01455	10,1%	-0,00448	-3,10%
2	-0,00556	-3,99%	0,01599	11,5%	0,00111	0,80%
3	-0,00745	-5,33%	0,01823	13,0%	0,00113	0,81%
4	-0,00588	-4,41%	0,01545	11,6%	0,00013	0,10%
5	-0,00410	-3,10%	0,02021	15,3%	0,00140	1,06%
6	-0,00191	-1,52%	0,02657	21,1%	0,00266	2,12%
7	-0,00803	-6,08%	0,01964	14,9%	0,00297	2,25%
8	0,00539	5,03%	0,02944	27,5%	0,00280	2,61%

Tabla 37. Diferencia por vuelta del vehículo 3, periodo Demostrativo de Ahorro.

Vuelta	Demostrativo de ahorro					
	Monitor		VSP (CO ₂)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	-	-	0,03805	33,8%	0,01770	15,7%
2	-	-	0,04899	47,7%	0,02749	26,8%
3	-	-	0,04492	44,8%	0,02601	26,0%
4	-	-	0,04444	45,2%	0,02354	23,9%
5	-	-	0,04860	50,3%	0,02568	26,6%
6	-	-	0,05330	56,2%	0,02792	29,4%
7	-	-	0,05696	60,7%	0,02999	32,0%
8	-	-	0,06166	72,4%	0,02573	30,2%

Tabla 38. Diferencia por vuelta del vehículo 4, periodo de Línea Base.

Vuelta	Línea Base					
	Monitor		VSP (CO2)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	0,00631	3,86%	-0,01168	-7,14%	-0,00050	-0,30%
2	-0,00553	-3,31%	-0,01507	-9,03%	-0,00010	-0,06%
3	-0,01409	-8,34%	-0,02039	-12,1%	-0,00850	-5,03%
4	0,00108	0,71%	-0,00787	-5,17%	0,00018	0,12%
5	0,00227	1,54%	-0,00631	-4,27%	0,00199	1,34%
6	-0,00040	-0,27%	-0,00273	-1,85%	0,00243	1,65%
7	0,01224	9,21%	0,01412	10,6%	0,02135	16,1%
8	-0,00026	-0,20%	0,00368	2,77%	0,00840	6,32%

Tabla 39. Diferencia por vuelta del vehículo 4, periodo Demostrativo de Ahorro.

Vuelta	Demostrativo de ahorro					
	Monitor		VSP (CO2)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	0,01984	15,1%	0,01782	13,5%	0,00972	7,38%
2	0,00096	0,80%	0,01699	14,2%	0,01244	10,4%
3	-0,00115	-0,96%	0,01814	15,0%	0,01097	9,10%
4	0,00017	0,15%	0,01527	13,2%	0,00893	7,70%
5	-0,00378	-3,15%	0,01173	9,8%	0,00632	5,27%
6	-0,00732	-6,00%	0,01939	15,9%	0,01423	11,7%
7	-0,00581	-4,83%	0,01879	15,6%	0,01180	9,80%
8	-0,00402	-3,66%	0,02659	24,2%	0,02391	21,8%

Tabla 40. Diferencia por vuelta del vehículo 5, periodo de Línea Base.

Vuelta	Línea Base					
	Monitor		VSP (CO2)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	-	-	-0,00341	-0,71%	-0,03354	-6,98%
2	-	-	-0,00012	-0,03%	-0,03111	-6,62%
3	-	-	-0,00292	-0,60%	-0,03681	-7,58%
4	-	-	0,01986	4,46%	-0,01395	-3,13%

Tabla 41. Diferencia por vuelta del vehículo 5, periodo Demostrativo de Ahorro.

Vuelta	Demostrativo de ahorro

	Monitor		VSP (CO2)		VSP (OBD-II)	
	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %	Error [lt/100km]	Error %
1	-	-	0,10425	25,9%	0,07019	17,4%
2	-	-	0,04036	10,3%	0,00348	0,89%
3	-	-	0,05502	14,5%	0,02039	5,39%
4	-	-	0,06148	16,0%	0,02614	6,80%

Anexo E Simulación CFD como medidor de reducción del consumo de combustible debido a dispositivos aerodinámicos

E.1. Revisión bibliográfica de publicaciones relacionadas con el estudio del coeficiente de arrastre aerodinámico de dispositivos aerodinámicos que disminuyen el consumo de combustible en camiones.

E.1.1. Estudio 1: A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck [20]

Nombre: Estudio sobre el coeficiente aerodinámico de un camión con semi-remolque.

Autores: Harun Chowdhury*²², Hazim Moria, Abdulkadir Ali, Iftekhar Khan, Firoz Alam and Simon Watkins.

Institución: School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University, Melbourne, VIC 3083, Australia.

Año: 2013

E.1.1.1. Descripción

El objetivo principal de este estudio es determinar el impacto en la aerodinámica de varios dispositivos usados en camiones con semi-remolque. Para lograr esta tarea se realizan pruebas en un túnel de viento con un modelo de un camión a una escala de 1:10, en donde se realizan mediciones para distintas configuraciones de velocidad, ángulos de ataque del viento y dispositivos. A continuación se indican las combinaciones de dispositivos utilizadas, mostradas en la Figura 168:

- a) Carenado superior
- b) Carenado superior + Carenado frontal

²² Autor correspondiente

- c) Carenado superior + Faldones laterales cortos
- d) Carenado superior + Faldones laterales largos
- e) Carenado superior + Carenado frontal + Faldones laterales cortos
- f) Carenado superior + Carenado frontal + Faldones laterales largos

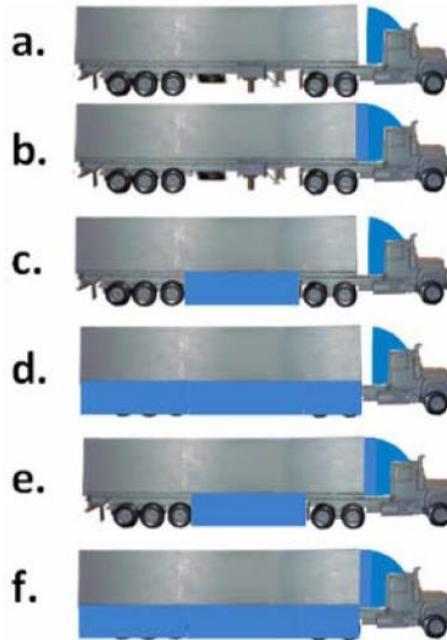


Figura 168. Combinaciones de dispositivos analizados

Algunas de las características de las pruebas fueron:

- Se utilizó un túnel de viento de la universidad RMIT de Australia, cuya velocidad máxima es de 145 km/hr.
- Para tener un control del flujo de aire es que se utilizó una escala de 1:10 para el modelo del camión.
- Se conectó un sensor *JR3 multi-axis load cell* a la parte inferior del modelo, como se muestra en la Figura 169. Este sensor se utilizó para medir las fuerzas de arrastre, sustentación y fuerzas laterales, además de los momentos de cabeceo, alabeo y guiñada instantáneos.
- Se tomaron mediciones durante 10 segundos a una frecuencia de 20 Hz, para cada velocidad dada, donde se promediaron los valores obtenidos para minimizar los posibles errores en la toma de datos.
- El rango de velocidades estuvo entre 40 y 120 km/hr, para los ángulos de ataque de 0°, 5°, 10° y 15° para simular el efecto de viento cruzado.
- El coeficiente de arrastre se obtuvo mediante la ecuación (26).

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (26)$$

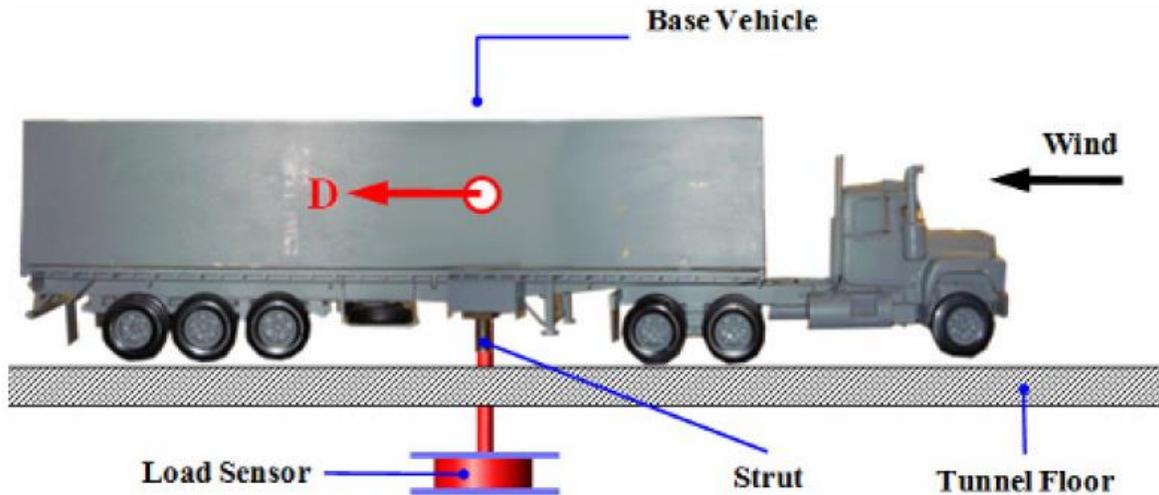


Figura 169. Esquema del montaje experimental

E.1.1.2. Resultados

En la Figura 170 se muestran los coeficientes de arrastre medidos para las distintas configuraciones de dispositivos, con 0° de ángulo de ataque del viento, en función de la velocidad. Se observa que para el caso base el coeficiente no varía en mayor medida, y se encuentra en torno a 0,8, valor superior a todas las configuraciones de dispositivos. Se observa a su vez, que en general a medida que aumenta la velocidad, el coeficiente de arrastre disminuye. Por último, se tiene que los menores valores del coeficiente de arrastre se obtienen para la configuración f).

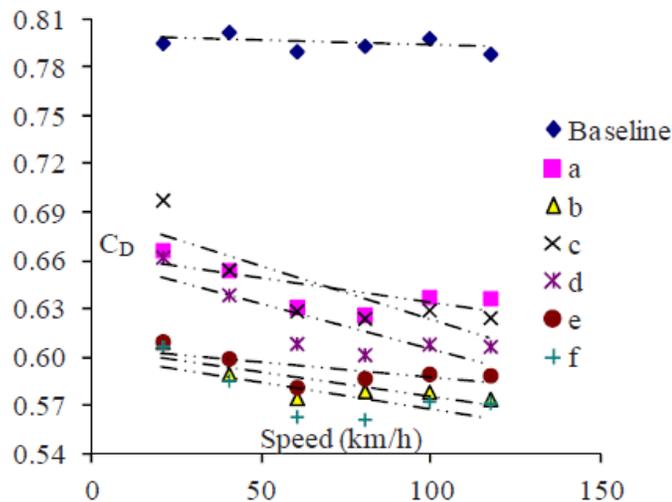


Figura 170. Coeficiente aerodinámico como función de la velocidad para diferentes configuraciones, con un ángulo de ataque de 0° .

En la Figura 171 se muestra el porcentaje de disminución del coeficiente de arrastre de las distintas configuraciones de dispositivos, en función del ángulo de ataque del viento.

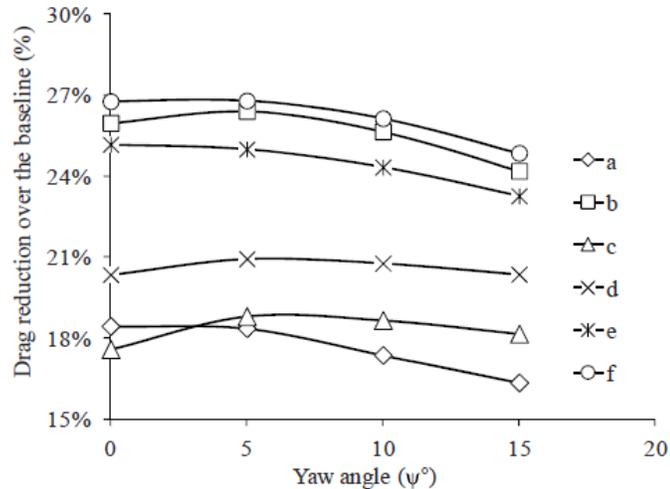


Figura 171. Porcentaje de disminución del coeficiente de arrastre para las distintas configuraciones en comparación con el caso base, en función del ángulo de ataque

E.1.1.3. Conclusiones

Los resultados muestran que los distintos dispositivos aerodinámicos tienen un notable impacto en el arrastre aerodinámico, obteniéndose que la máxima disminución del coeficiente de arrastre es de un 27% aproximadamente, obtenida para la configuración f) con un ángulo de inclinación entre 0° y 5°.

E.1.2. Estudio 2: Computational simulation of model and full scale Class 8 trucks with drag reduction devices [21]

Nombre: Simulación computacional de un camión Clase 8 con dispositivos aerodinámicos en tamaño completo y a escala

Autores: Daniel G. Hyams, Kidambi Sreenivas, Ramesh Pankajakshan, D. Stephen Nichols, W. Roger Briley, David L. Whitfield

Institución: National Center for Computational Engineering, University of Tennessee at Chattanooga

Año: 2010

E.1.3.2. Descripción

En este estudio investiga el efecto de flujos no estacionarios en el rendimiento de camiones Clase 8. Para esto se hacen tres tipos de simulaciones en software CFD. La primera tiene las mismas condiciones de volumen de control y tamaño de modelo de camión que las de un ensayo realizado en el túnel de viento NASA Ames de 7' x 10' (escala del modelo 1:8), con el objetivo de comparar y validar de resultados. La segunda

simulación utiliza un modelo de camión a escala completa con la incorporación de las condiciones de piso y ruedas en movimiento, que también se compara con estudios en túneles de viento. Y por último, con el mismo modelo a escala completa se analiza la incorporación de distintos dispositivos aerodinámicos. Primero se modelan faldones laterales, cuyos resultados se comparan con pruebas en que se realizan en túneles de viento y en ruta, además se analiza un carenado frontal y tres diseños de tapabarro (tapabarro completo, tapabarro de listones y medio tapabarro).

Las características de la modelación son las siguientes:

- Se utilizan soluciones numéricas del promedio de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) en flujos no estacionarios, obtenidas con un solucionador de flujo paralelo implícito.
- Se utiliza un código denominado *Tenasi*, el cual es una familia de solvers de flujos estructurados y no estructurados que desarrollado por el SimCenter de la Universidad de Tennessee en Chatanooga.
- Se consideran tanto las ecuaciones para flujos compresibles e incompresibles, que son resueltas usando una discretización de un volumen de control con un mallado no estructurado.
- Se utilizan los siguientes modelos de turbulencia de forma débilmente acoplada: SAS, DES, $\kappa\text{-}\varepsilon$ y $\kappa\text{-}\omega$.
- Se utiliza un procedimiento de solución en paralelo, que consiste en un algoritmo de soluciones escalables, implementadas para trabajar eficientemente con múltiples procesos.
- El modelo CAD utilizado es el denominado Generic Conventional Model (GCM), mostrado en la Figura 172.
- Las pruebas con el GCM se comparan con los resultados de pruebas en el túnel de viento NASA Ames de 7' x 10'.
- Se realizan mediciones para ángulos de ataque entre 0° y 10°.
- Para generar el mallado se utilizó una combinación de los métodos GridGen y HUGG.

En particular, para la simulación con modelo GCM se tienen las siguientes características:

- Para 0° de ángulo de ataque se utilizaron aproximadamente 20,5 millones de puntos y 66 millones de elementos (principalmente tetraedros y prismas).
- Para el caso de 10° se utilizaron aproximadamente 18,9 millones de puntos y 65 millones de elementos.
- Para el modelo GCM se utilizan 500.000 pasos de tiempo computacional.
- Todos los casos presentados fueron corridos en 200 procesadores, con un número de Reynolds de $1,15 \times 10^6$ y un número de Mach de 0,15.

- El equipo utilizado para obtener los resultados fue el UT SimCenter's Dell 1300-core 325-node diskless Linux cluster, el cual fue configurado con un procesador dual-core Intel EM64T 3.0 GHz Xeon, de 4 GB de RAM por nodo.

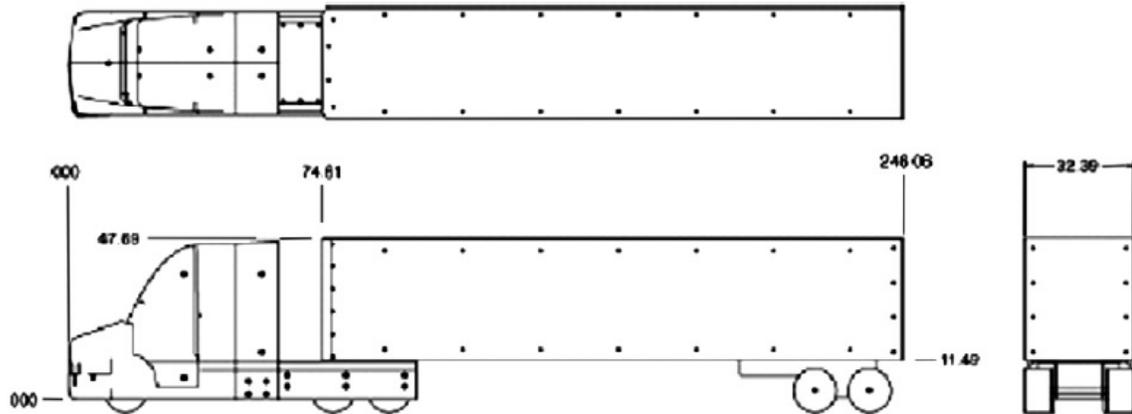


Figura 172. Vistas superior, lateral y posterior del GCM (medidas en cm)

Para la modelación a escala completa se tienen las siguientes características:

- El mallado se hace con una combinación de los métodos GridGen y HUGG.
- El mallado tiene aproximadamente 1,1 millones de elementos en la superficie del camión y 18 millones de volúmenes de control en el campo.
- El tiempo de solución para cada caso fue de 3 días, en 200 núcleos de procesadores usando el mismo hardware utilizado en las pruebas con escala de 1:8
- Una modificación del modelo GCM es utilizada como caso base. Estas modificaciones incluyen un carenado frontal y remoción de estructura utilizada para fijar el modelo en túneles de viento.
- Se simula teniendo en cuenta suelo y ruedas con movimiento.
- El modelo a escala completa tiene un ancho de 8,5'.
- Se utilizó un número de Reynolds de 5,15 millones.
- Se simula una velocidad de viaje de 65 mph.
- Se simula viento cruzado a 7 mph con una inclinación de 15°, 45°, 75°, 105°, 135° y 165° con respecto a la dirección de viaje del camión.
- Se analiza el efecto de: dejar las ruedas con y sin movimiento, la incorporar un deflector trasero (ver Figura 173), un carenado frontal (ver Figura 174) y tres diseños de tapabarros (ver Figura 175, Figura 176 y Figura 177).

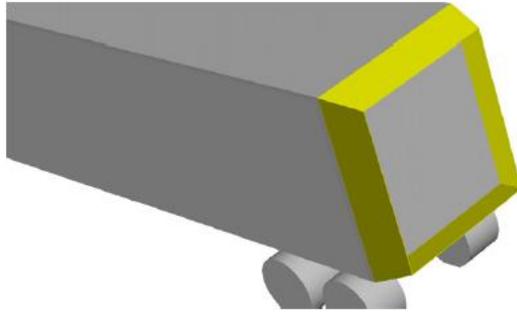


Figura 173. Geometría de deflector trasero.

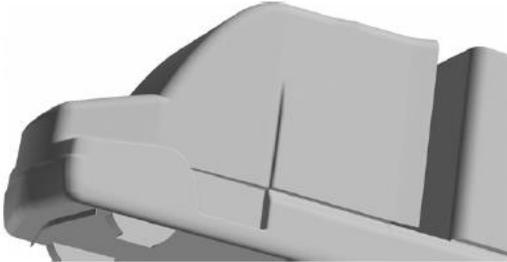


Figura 174. Geometría de carenado frontal.

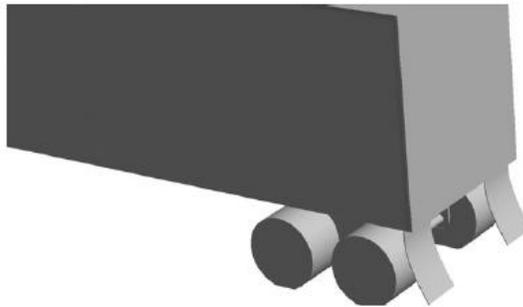


Figura 175. Geometría de tapabarro completo.

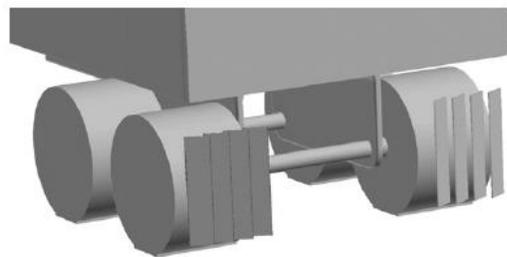


Figura 176. Geometría de tapabarro de listones.

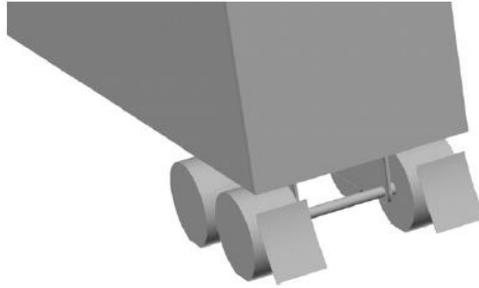


Figura 177. Geometría de medio tapabarro.

E.1.3.3. Resultados

E.1.2.1.1. Modelo a escala GCM

En la Figura 178 se muestra el perfil de velocidad alrededor del modelo GCM obtenido como resultado de la simulación CFD. En la Figura 179 y Figura 180 se muestra la línea de presiones a lo largo del camión para un ángulo de ataque de 0° , tanto para el resultado experimental en túnel de viento como los de las simulaciones en CFD. Se observa que los valores experimentales en túneles de viento tienen una buena concordancia con resultantes de la simulación.

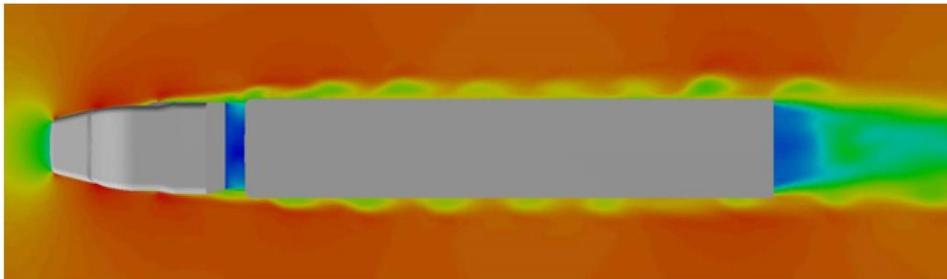


Figura 178. Velocidad instantánea axial en el contorno del camión.

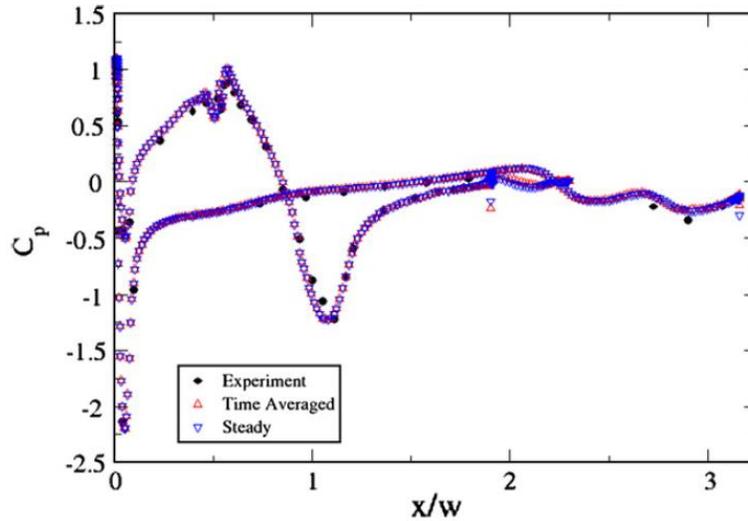


Figura 179. Comparación de la línea central de presiones del tracto para 0° de ataque, graficada sobre la coordenada horizontal.

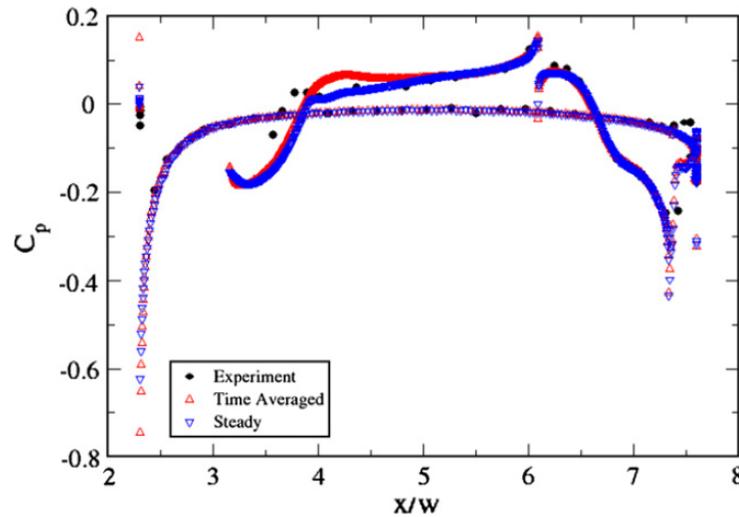


Figura 180. Comparación de la línea central de presiones del remolque para 0° de ataque, graficada sobre la coordenada horizontal.

E.1.2.1.2. Validación para rueda rotativa

Luego del análisis del modelo a escala se simula un modelo con tamaño y condiciones más realistas, como lo son ruedas y piso móvil. Para el caso de rueda aislada se utiliza un estudio como validación. El coeficiente de presión a lo largo de la línea central de la rueda es computado usando una simulación estacionaria. En la Figura 181 se observa que el resultado de la simulación tiene una gran concordancia con los resultados experimentales.

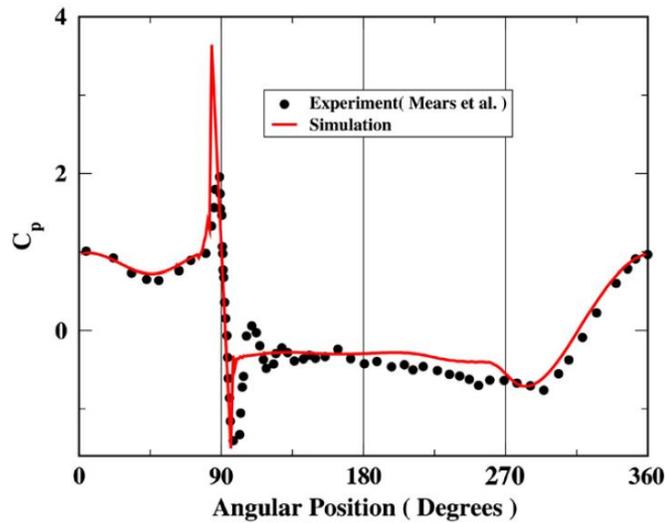


Figura 181. Coeficiente de presión de rueda aislada.

E.1.2.1.3. Simulaciones a escala completa

En la Figura 182 se muestra el modelo a escala completa de camión utilizado para realizar el análisis del impacto en el arrastre de mejoras aerodinámicas. En la imagen se puede observar el modelo GCM modificado para el caso del camión más carenado frontal. También se puede observar el mallado en el plano del suelo.

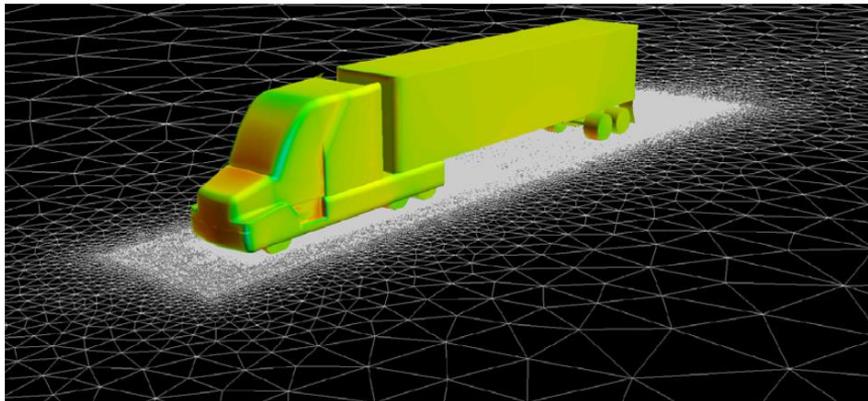


Figura 182. Modelo a escala completa

E.1.2.1.3.1. Efecto de ruedas con y sin rotación

En la Figura 183 se muestra el incremento en el arrastre en el remolque, tapabarros y en el eje de la rueda, debido al efecto de dejar las rudas estáticas. Se observa que el arrastre aumenta considerablemente cuando se establecen ruedas inmóviles en la simulación.

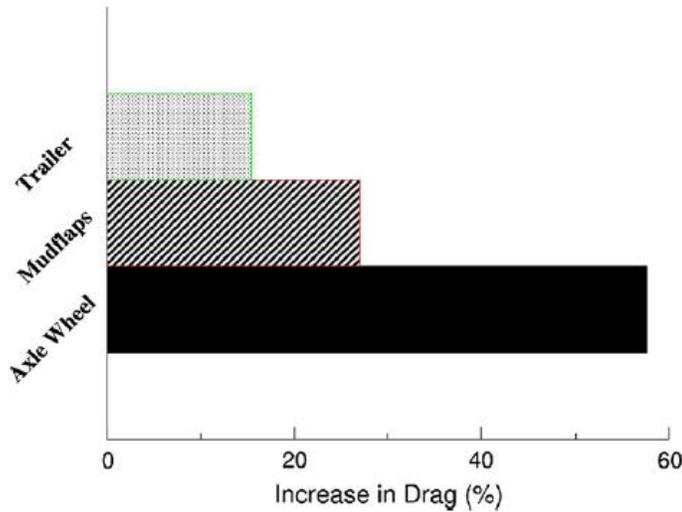


Figura 183. Incremento en el arrastre debido al efecto de simular con rueda sin rotación sobre el remolque, tapabarros y sobre el eje de la rueda

E.1.2.1.3.2. Efecto de deflector trasero

En la Figura 184 se muestra la reducción en el arrastre debido al deflector trasero para distintos ángulos de viento cruzado. El resultado promedio de reducción en el arrastre es de un 15%, el cual es comparado favorablemente con mediciones en otros test:

- Túnel de viento: reducción de un 14% aproximadamente utilizándose el modelo GCM con y sin modificaciones.
- Test en ruta: reducción entre un 12% y un 20%, para un camión Clase 8. En este caso se asume que el porcentaje de reducción en consumo de combustible corresponde a la mitad de la reducción en el coeficiente de arrastre.

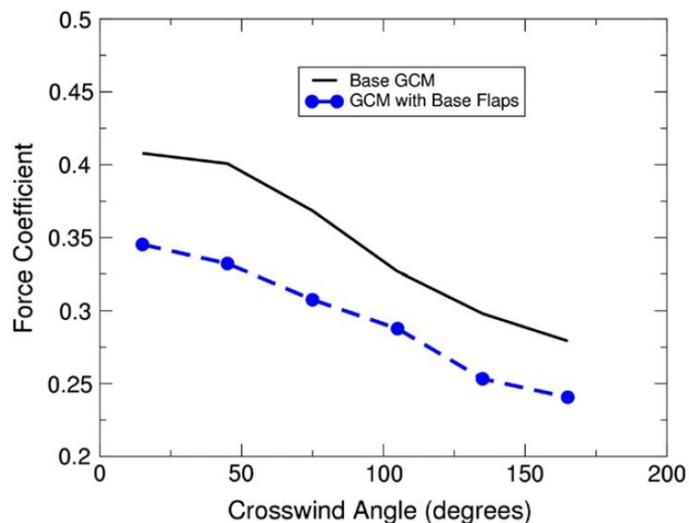


Figura 184. Variación del coeficiente aerodinámico de la fuerza de arrastre axial debido a deflector trasero.

E.1.2.1.3.3. Efecto de carenado frontal

Para el caso de carenado frontal, en la Figura 185 se muestra el efecto de este en el coeficiente de arrastre de los componentes del camión, se observa que hay una pequeña disminución en el tracto, el remolque y el ensamble de las ruedas, que sin embargo no alcanza a superar el arrastre que aporta el dispositivo en sí mismo, por lo que el resultado neto es un aumento en un 0,2%, como se puede observar en la Figura 186, para distintos ángulos de viento cruzado. En este estudio se plantea que para evaluar de manera más precisa este dispositivo se deben hacer simulaciones con un modelo de camión más realista.

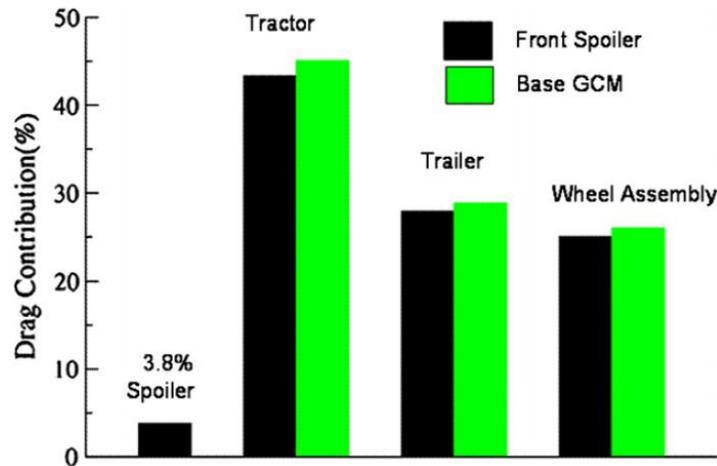


Figura 185. Efecto del carenado frontal en el arrastre en los componentes del camión.

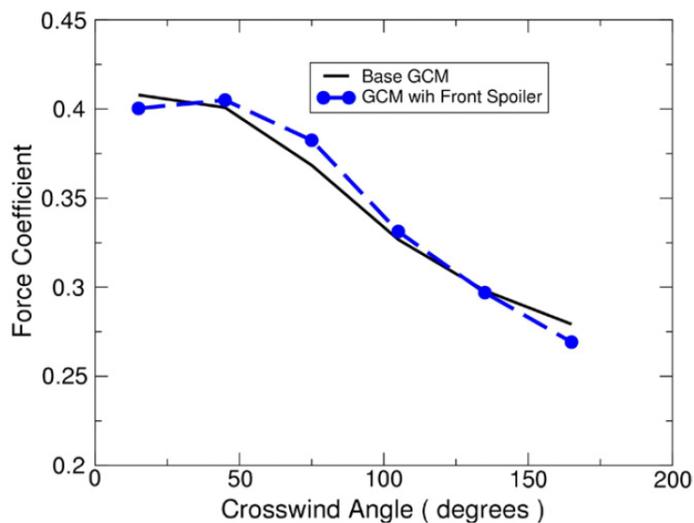


Figura 186. Variación del coeficiente de arrastre para distintos ángulos de viento cruzado debido al carenado frontal.

E.1.2.1.3.4. Efecto de tres tipos de tapabarro

En la Figura 187 se muestra el coeficiente de arrastre para los distintos tipos de tapabarro y su variación porcentual respecto al caso base. Se observa que el tapabarro completo es el que más aporta en el arrastre, con un 8,6% más que el caso base, en

segundo lugar está el medio tapabarro, con un 2,1% y en tercer lugar está el tapabarro de listones que a diferencia de los otros reduce el coeficiente de arrastre en un 0,1%. En la Figura 188 se muestra el efecto del viento cruzado en el coeficiente de arrastre para los tres tapabarros y el caso base.

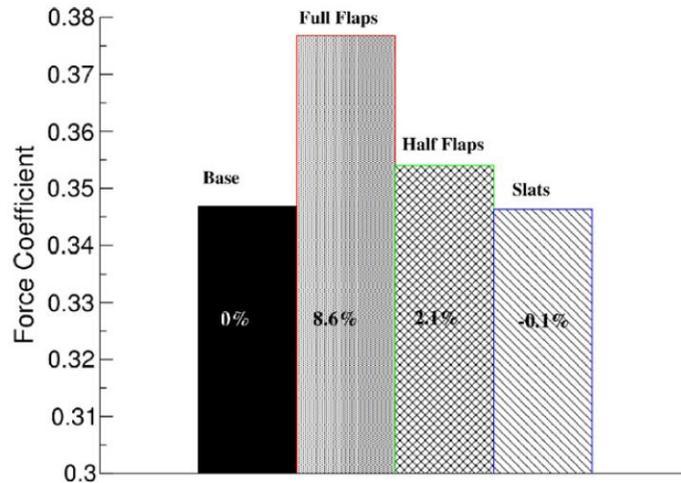


Figura 187. Coeficientes de arrastre para los tres tipos de tapabarro.

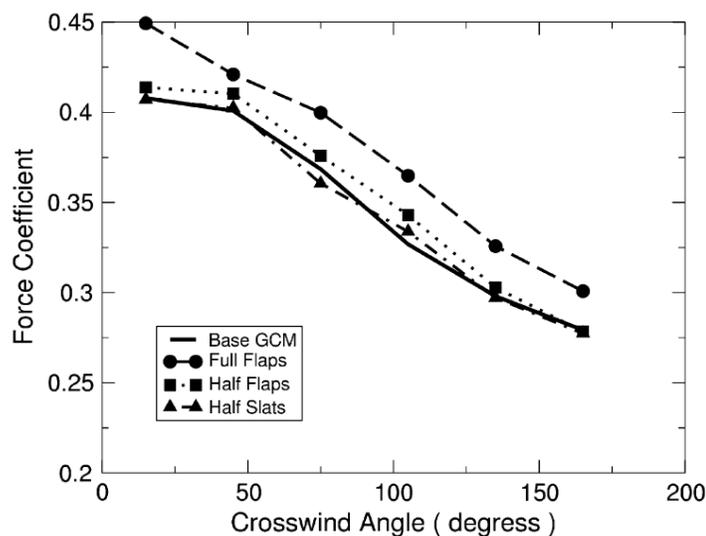


Figura 188. Variación en el coeficiente de arrastre para distintos ángulos de viento cruzado debido a los tres tipos de tapabarros.

E.1.3.4. Conclusiones

En este estudio se concluye lo siguiente:

- Los resultados en túneles de viento concuerdan buena manera con el análisis CFD realizado, en particular para el caso de 0° de inclinación del viento.

- Las presiones en la base del camión arrojaron buenos resultados para el caso de 0° , sin embargo para 10° se recomienda refinar el mallado en algunos puntos en específico o emplear mejores modelos de turbulencia.
- Las simulaciones a escala real indican que es necesario un tratamiento realista para las ruedas del camión, que incluya movimiento rotatorio de estas más el movimiento del suelo.
- La simulación de deflectores traseros arroja resultados razonables.
- El carenado frontal no arrojó cambios en el coeficiente de arrastre.
- Con respecto a la simulación de los tapabarros se concluye que los distintos diseños efectivamente tienen distintos impactos en el arrastre.

E.1.3. Estudio 3: Large eddy simulation of the flow-field around a full-scale heavy-duty truck [22]

Nombre: Simulación del campo de flujos alrededor de un camión pesado a escala completa mediante Large Eddy Simulation (LES)

Autores: Prasanjit Das, Makoto Tsubokura, Tomofuyu Matsuuki, Nobuyuki Oshima y Kozo Kitoh

Institución: Chittagong University of Engineering and Technology (CUET)

Año: 2013

E.1.3.1. Descripción

En este estudio se utiliza el modelo LES de turbulencia para estudiar el campo de flujo alrededor de dos camiones pesados a escala completa, uno con carenado superior y otro sin el dispositivo. Lo que finalmente se compara son los resultados obtenidos en pruebas de túneles de viento con los simulados para un volumen de control igual al de las pruebas y con los simulados en un volumen de control mayor que permite tener condiciones más ideales.

Los detalles de la simulación son explicados a continuación:

- Los modelos del camión tienen un alto detalle, como se muestra en la Figura 189.
- Las dimensiones del camión simulado son de 12 m de largo, 2,5 m de ancho y 3,7 m de alto.
- Se analiza el efecto de 0° , 5° y 10° de ángulo de ataque.
- El mallado se compone de elementos tetraédricos (ver Figura 190). El mallado en la superficie del camión se tienen 1,5 millones de triángulos aproximadamente.
- Se realizan simulaciones con dos volúmenes de control.

- En el primer volumen de control se tiene una razón de bloqueo²³ de un 10%, la cual es la misma de un experimento en el túnel de viento DNW-German Dutch, el cual es utilizado para validación de resultados (ver Figura 191). Este es el caso base.
- En el segundo volumen de control se tiene una razón de bloqueo de un 1% para obtener resultados más precisos en la simulación CFD (ver Figura 192).
- Se realizan simulaciones para flujo estacionario incompresible, utilizando el modelo de turbulencia LES.
- En ambos casos se fija una velocidad del viento entre 21 m/s y 25 m/s.
- Se aplica un factor de corrección al coeficiente de arrastre obtenido con túnel de viento con motivo de quitar el efecto de la razón de bloqueo en dichos resultados. El factor de corrección se obtiene con la ecuación de Maskell.
- Los valores de los coeficientes de arrastre no se muestran por motivos de confidencialidad, solo se muestran diferencias de coeficientes entre los distintos casos evaluados.

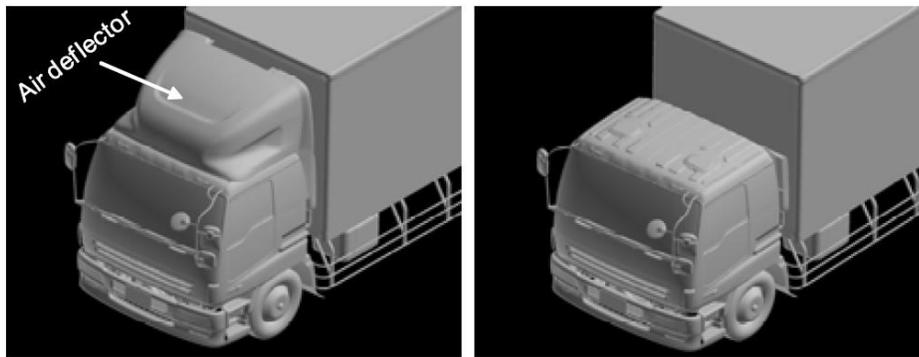


Figura 189. Geometría de los modelos de camiones.

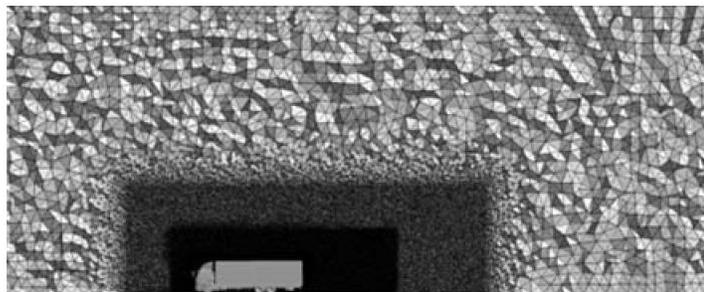


Figura 190. Sección transversal del mallado tetraédrico.

²³ Se entiende por razón de bloqueo como la división entre el ancho del modelo por el ancho del volumen de control.

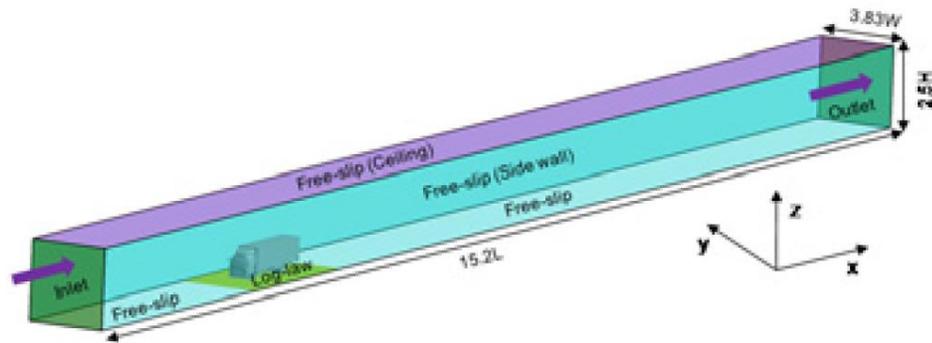


Figura 191. Volumen de control con razón de bloqueo de 10%.

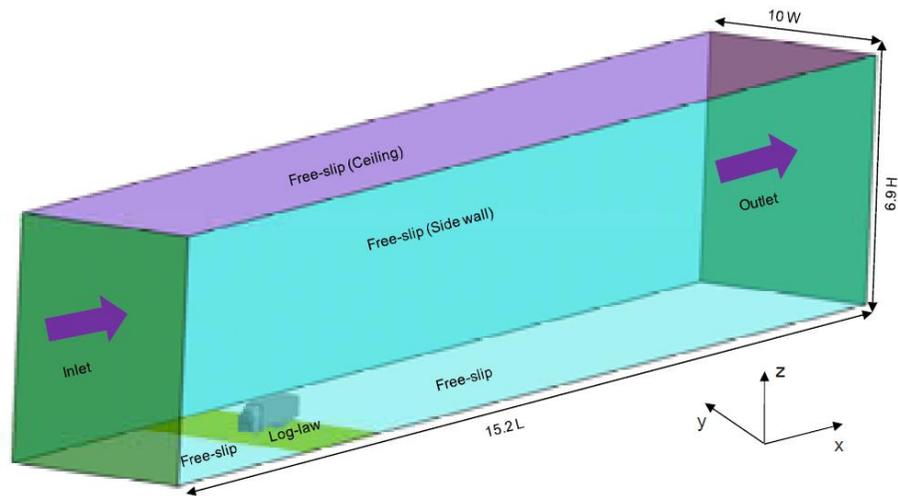


Figura 192. Volumen de control con razón de bloqueo de un 1%.

E.1.3.2. Resultados

A continuación se muestran los principales resultados de este estudio.

En el experimento realizado en túnel de viento la reducción en el coeficiente de arrastre debido a la implementación de un carenado superior es de un 16,5%, mientras que en la simulación es de un 15%.

En la Figura 193 se muestra la vista superior de la distribución de velocidades para distintos ángulos de ataque para el camión con carenado superior y para el camión tomado como base, en la Figura 194 se muestra la vista lateral de la distribución de velocidades, y en la Figura 195 se muestra la vista superior de la vorticidad instantánea alrededor del vehículo.

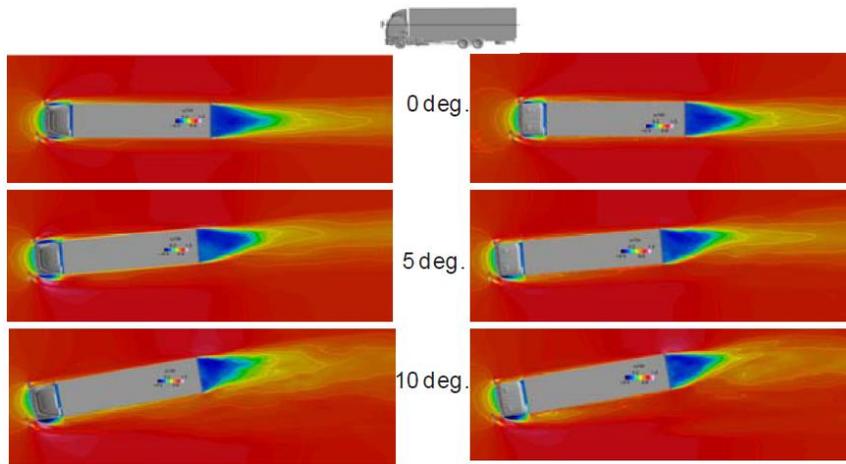


Figura 193. Vista superior de la distribución de velocidades alrededor del vehículo (a la izquierda modelo con carenado superior, a la derecha modelo base).

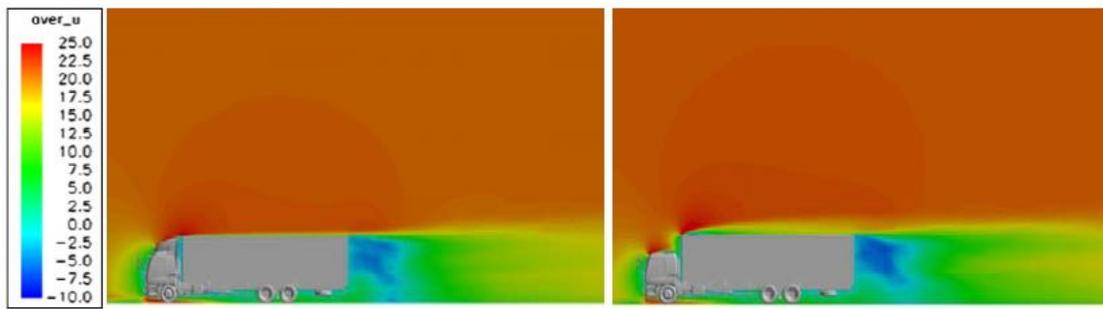


Figura 194. Vista lateral de la distribución de velocidades para un ángulo de ataque de 0° (a la izquierda modelo con carenado superior, a la derecha modelo base).

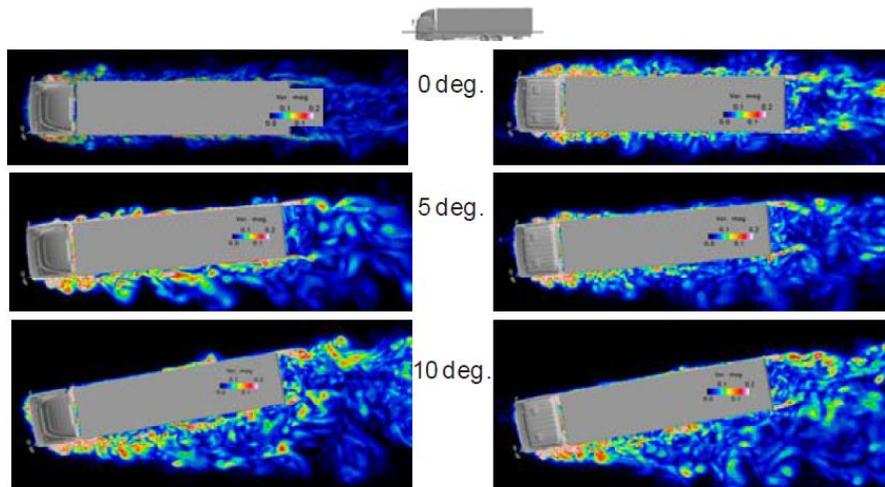


Figura 195. Vista superior de la vorticidad instantánea alrededor del vehículo (a la izquierda modelo con carenado superior, a la derecha modelo base).

En la Figura 196 y Figura 197 se presentan los resultados de coeficientes de arrastre para distintos ángulos de ataque, y para el modelo sin carenado superior y con carenado superior, respectivamente. En ambos casos se muestran los resultados para el experimento en túnel de viento (Expt. (DNW)), para la simulación del caso base tomado

en el volumen de control más pequeño (LES (Baseline)), para el valor experimental corregido con la ecuación de Maskel (Corrected value of Expt.) y para la simulación del en el volumen de control más grande (LES (Ideal)). Se tiene que la diferencia entre el valor del coeficiente de arrastre para el caso ideal y el valor corregido experimental para los 0° , 5° y 10° respectivamente es de -3,3, -4,5 y -3,3 (caso con carenado superior) y -1,3, -4,1 y -7,1 (caso sin carenado superior). En términos porcentuales la diferencia par el modelo con carenado superior es menor al -5%, y para el modelo sin carenado superior la diferencia varía entre -1,3% y 7% dependiendo del ángulo de ataque.

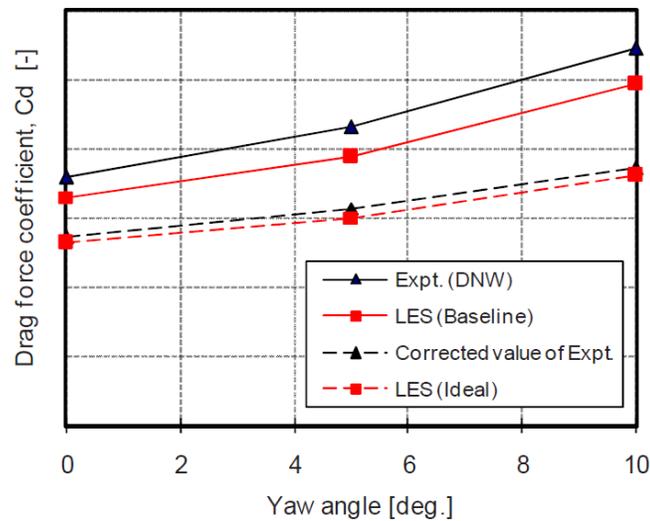


Figura 196. Coeficiente de arrastre para el modelo sin carenado superior.

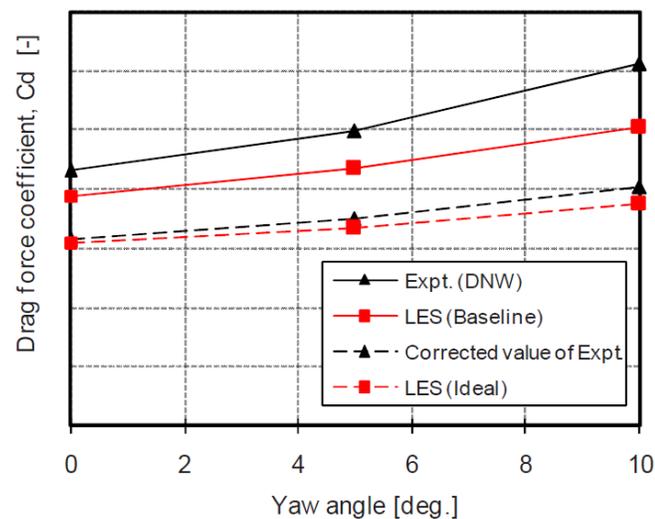


Figura 197. Coeficiente de arrastre para el modelo con carenado superior.

E.1.3.3. Conclusiones

Con la simulación CFD se obtiene una disminución en el coeficiente de arrastre de 15% para el carenado superior estudiado. Se tienen bajas diferencias entre lo encontrado con túnel de viento y simulación CFD, siendo los errores menores al 5% cuando se estudia el

camión con el dispositivo aerodinámico, y menores al 7% cuando se estudia sin dispositivo.

E.1.4. Estudio 4: Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction [23]

Nombre: Ahorros de combustible en vehículos pesados gracias a reducción en el coeficiente de arrastre.

Autores: Antonio Filippone, Zulfaa Mohamed-Kassim.

Institución: School of Mechanical, Aerospace, and Civil Engineering, The University of Manchester

Año: 2010

E.1.4.1. Descripción

En este estudio se explica y aplica una metodología que permite evaluar la reducción en el consumo de combustible en función de la reducción en el coeficiente de arrastre. Esta metodología está basada en un modelo general de las fuerzas involucradas en el gasto energético de vehículos, y se evalúa segundo a segundo en Matlab. Los casos evaluados son para dos ciclos de conducción, uno para carretera (LHDC, ver Figura 198) y otro urbano (NEDC, ver Figura 199) y dos vehículos con distinta carga, uno de 20 Ton y otro de 40 Ton, lo que da un total de 4 casos.

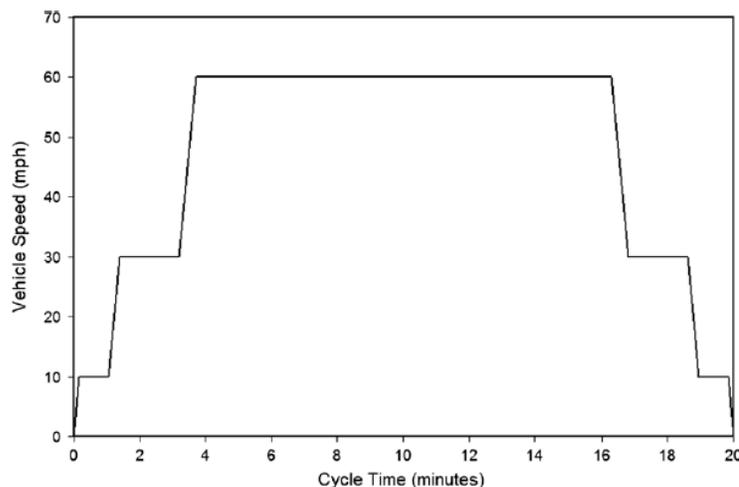


Figura 198. Ciclo de conducción para carretera.

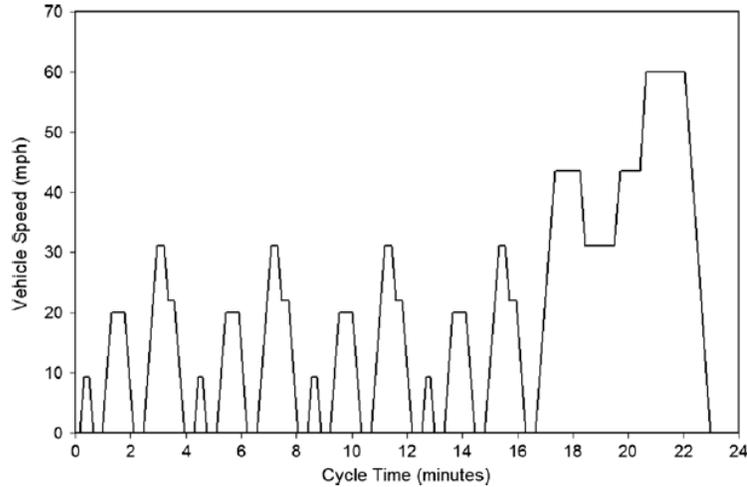


Figura 199. Ciclo de conducción urbano.

En la ecuación (27) se muestra cómo se calcula el consumo de combustible a partir de las fuerzas involucradas en el movimiento del vehículo.

$$B = \frac{\frac{c}{\rho_f} \int b_e \left(\frac{F_t V}{\eta_d} + P_A \right) dt}{\int V dt} \quad (27)$$

Donde:

- B : Consumo de combustible [lt/100km].
- F_t : Sumatoria de las fuerzas involucradas en el movimiento del vehículo.
- V : Velocidad del vehículo [m/s].
- b_e : Consumo específico de combustible debido al freno.
- η_d : Eficiencia de la transmisión.
- t : Tiempo de viaje.
- dt : Paso de tiempo de un segundo.
- P_a : Potencia usada por los accesorios del auto.
- c : Factor de conversión de unidad

En este caso no se considera la pérdida debido al frenado y al tiempo que se está en ralentí por considerarse pequeñas. El consumo debido a los accesorios se asume como un 8% del consumo total, mientras que la eficiencia de la transmisión se estima que es de un 10,6%.

La modelación de las fuerzas se presenta en las ecuaciones (28), (29), (30), (31) y (32).

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A \overline{C_d} \quad (28)$$

$$R_R = mg f_r \cos(\alpha) \quad (29)$$

$$f_R = 0,0041 + 0,0000917V \quad (30)$$

$$R_A = m \frac{dV}{dt} \quad (31)$$

$$R_c = mg \sin(\alpha) \quad (32)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire.

g : Aceleración gravitacional.

α : Inclinación del camino.

$\overline{C_d}$: Coeficiente de arrastre promedio del camión.

f_R : Coeficiente de rodadura.

m : Masa del camión.

En este caso se asume un camino sin inclinación. Finalmente las expresiones que permiten calcular el consumo debido a cada fuerza se muestran en las ecuaciones.

$$B = B_D + B_R + B_A + B_T \quad (33)$$

$$B_D = \frac{K \sum \frac{1}{2} \rho V^3 A \overline{C_d} dt}{\sum V_i dt} \quad (34)$$

$$B_D = \frac{K \sum mg f_r V_i dt}{\sum V_i dt} \quad (35)$$

$$B_D = \frac{K \sum m \frac{(V_i - V_{i-1})}{dt} V_i dt}{\sum V_i dt} \quad (36)$$

Donde:

B_D, B_R y B_A : Consumo debido a las fuerzas de tracción.

K : Constante que interpreta gruesamente a los términos de c , ρ_f , b_f y η_D .

El término K es determinado de forma experimental resolviendo la ecuación (33) usando el ciclo de conducción LHDC con un camión considerado como línea base (sin dispositivos aerodinámicos) de 40 Ton, cuya eficiencia promedio es obtenida bajo reales condiciones de manejo, con un valor de 7,5 mpg (millas por galón).

E.1.4.2. Resultados

En la Tabla 42 se muestran los resultados del consumo de combustible para el camión de 40 Ton. Para el consumo anual se asume un nivel de actividad de 80.000 millas. El consumo debido a la fuerza de arrastre es de un 38,2% para el caso de carretera, en el caso urbano el consumo más importante es el debido a aceleraciones. En la Figura 200 se pueden apreciar estos resultados gráficamente.

Tabla 42. Resultados de consumo de combustible para camión de 40 Ton.

Ciclo de conducción	Consumo de combustible		Unidad	Consumo anual [klit]	B _i /B _o (%)
	FE ²⁴				
LHDC	FE ²⁴	7.5	mpg	-	-
	B _o	31.4	lt/100km	40,4	100
	B _D	12.0	lt/100km	15,5	38,2
	B _R	11.0	lt/100km	14,1	35
	B _A	2.6	lt/100km	3,3	8,3
NEDC	F _E	6.7	mpg	-	-
	B _o	35.4	lt/100km	45,6	100
	B _D	5.2	lt/100km	6,7	14,7
	B _R	8.1	lt/100km	10,4	22,9
	B _A	15.6	lt/100km	20	43,9

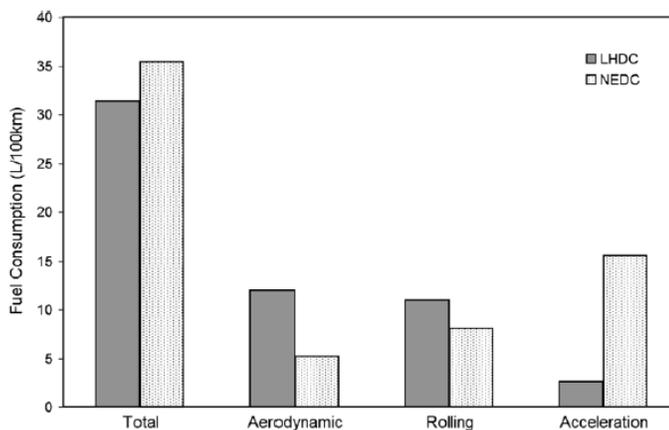


Figura 200. Consumo de combustible para camión de 40 Ton.

En la Tabla 43 se muestran los resultados para el caso de 20 Ton. Aquí el consumo debido al arrastre aerodinámico es un 52,1% para el caso en carretera. En el caso urbano, al igual que para el camión de 40 Ton, el consumo más importante es el debido a aceleraciones.

²⁴ FE: Rendimiento (Fuel economy)

Tabla 43. Resultados de consumo de combustible para camión de 20 Ton.

Ciclo de conducción	Consumo de combustible		Unidad	Consumo anual [kl]	B _i /B ₀ (%)
LHDC	FE	10.3	mpg	-	-
	B ₀	23.1	L/100	29,7	100
	B _D	12.0	L/100	15,5	52,1
	B _R	5.5	L/100	7,1	23,8
	B _A	1.3	L/100	1,7	5,6
NEDC	FE	11.3	mpg	-	-
	B ₀	20.9	L/100	27	100
	B _D	5.2	L/100	6,7	25
	B _R	4.1	L/100	5,2	19,4
	B _A	7.8	L/100	10	37,2

En la Figura 201 se muestra el consumo de combustible para los 4 casos estudiados.

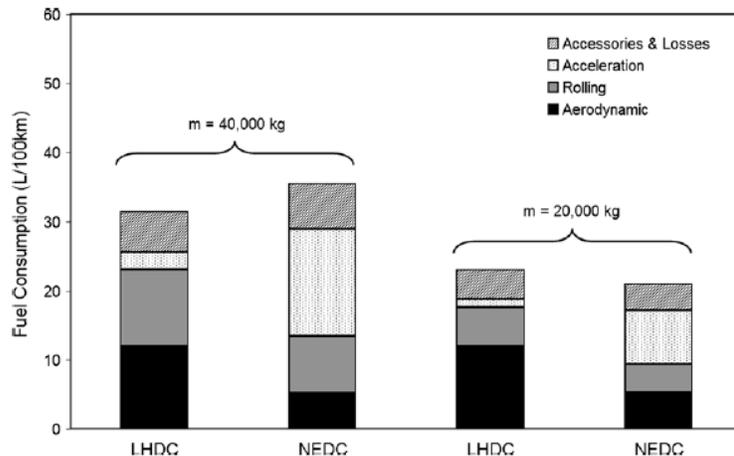


Figura 201. Consumo para los 4 casos estudiados.

En la Tabla 44 se muestran los resultados para distintos dispositivos aerodinámicos, cuyos valores de reducción en el coeficiente de arrastre son sacados de la literatura. Estos resultados pueden observarse gráficamente en la Figura 202. Los dispositivos utilizados son:

- Carenado superior
- Carenado delantero del remolque
- Faldones para el tracto
- Faldones para el remolque
- Deflector trasero
- Carenado frontal

Tabla 44. Resultados para distintos dispositivos aerodinámicos

Ciclo de conducción	Dispositivos aerodinámicos	$-\frac{\overline{C_d}}{C_{d_0}} [\%]$	$-\Delta F_A [klt]^{25}$	$-\frac{\Delta B}{B_0} [\%]$	
				m = 40 Ton	m = 20 Ton
LHDC	Carenado superior	9-17	1,4-2,6	3,4-6,5	4,7-8,8
	Carenado delantero del remolque	7-10	1,1-1,6	2,7-3,8	3,6-5,2
	Faldones para el tracto	4-6	0,6-0,9	1,5-2,3	2,1-3,1
	Faldones para el remolque	4-6	0,6-0,9	1,5-2,3	2,1-3,1
	Deflector trasero	4-5	0,6-0,8	1,5-1,9	2,1-2,6
	Carenado frontal	0-4	0,0-0,6	0,0-1,5	0,0-2,1
NEDC	Carenado superior	9-17	0,6-1,1	1,3-2,5	2,3-4,3
	Carenado delantero del remolque	7-10	0,5-0,7	1,0-1,5	1,8-2,5
	Faldones para el tracto	4-6	0,3-0,4	0,6-0,9	1,0-1,5
	Faldones para el remolque	4-6	0,3-0,4	0,6-0,9	1,0-1,5
	Deflector trasero	4-5	0,3-0,3	0,6-0,7	1,0-1,3
	Carenado frontal	0-4	0,0-0,3	0,0-0,6	0,0-1,0

²⁵ Delta de consumo anual

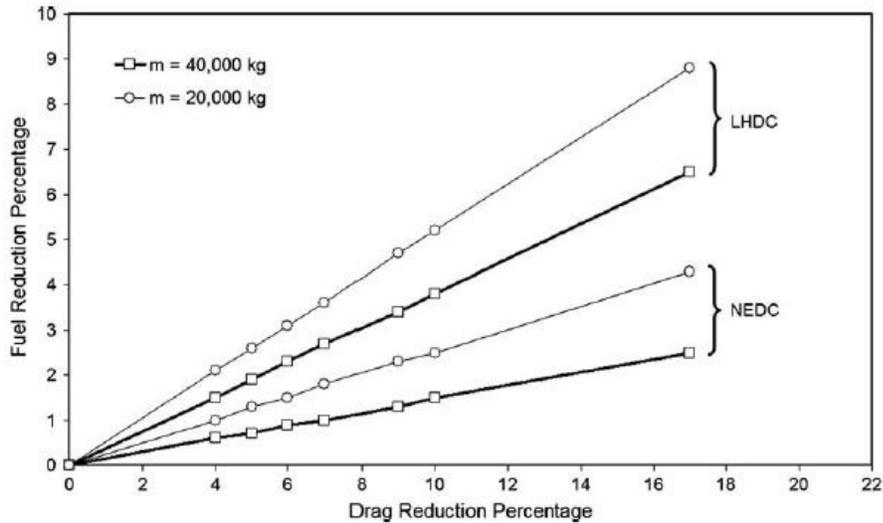


Figura 202. Porcentaje de reducción del consumo de combustible vs porcentaje de reducción del coeficiente de arrastre.

E.1.4.3. Conclusiones

Las mayores reducciones en el consumo de combustible debido a la incorporación de dispositivos aerodinámicos se dan para el ciclo de conducción en carretera, y a su vez dentro de este ciclo, para el camión de 20 Ton. Según las condiciones de este estudio, para un camión de 40 Ton la reducción en un 10% del coeficiente de arrastre significa una reducción en el consumo de 1,5% para un ciclo NEDC, y un 3,8% para un ciclo LHDC, mientras que para un camión de 20 Ton, un 10% en la reducción del coeficiente de arrastre significa una reducción en el consumo de 2,5% para un ciclo NEDC, y un 5,2% para un LHDC.

E.1.5. Estudio 5: Impacto de la Aerodinámica para el Ahorro de Combustible

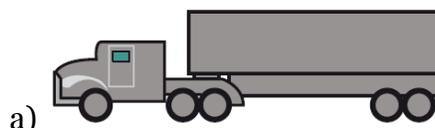
Autores: Julio Villalobos. [24]

Institución: Agencia Chilena de Eficiencia Energética, Universidad Andrés Bello

Año: 2013

E.1.5.1. Descripción

En este estudio se aplica la norma SAE J1321 (test en ruta) para determinar el impacto en el consumo de combustible debido a la instalación de los kits de dispositivos aerodinámicos que aparecen en la Figura 203.



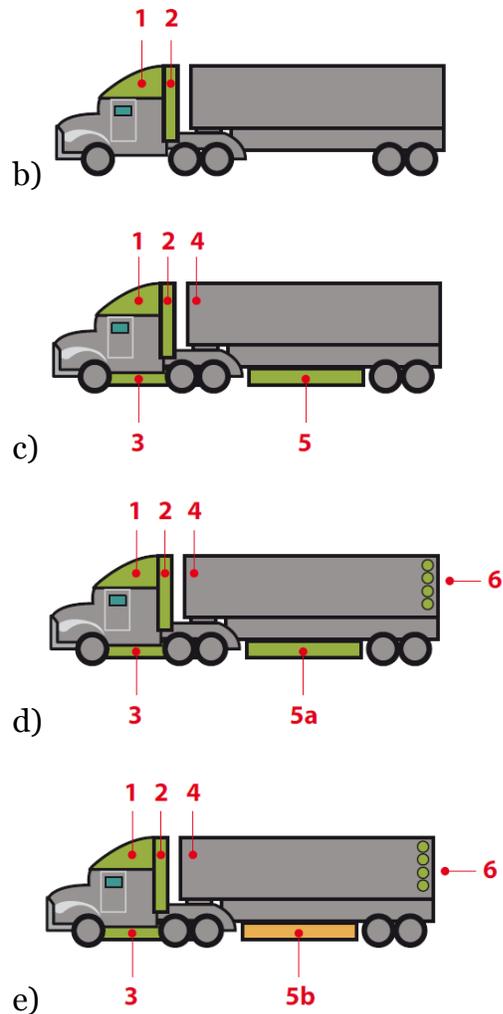


Figura 203. Configuración de kits aerodinámicos

- a) Caso base.
- b) Kit estándar: carenado superior + carenado frontal.
- c) Kit intermedio: carenado superior + carenado frontal + faldón lateral del tracto + faldón lateral del remolque tipo a
- d) Kit completo A: Carenado superior + carenado frontal + faldón lateral del tracto + faldón lateral del remolque tipo a + generadores de vórtice.
- e) Kit completo B: Carenado superior + carenado frontal + faldón lateral del tracto + faldón lateral del remolque tipo b + generadores de vórtice.

En el procedimiento experimental se define a continuación:

- Se dan tres vueltas a una ruta determinada de 76,1 km.
- Se cuantifica la masa de combustible que se consume en cada una vuelta pesando un estanque externo utilizado especialmente para este test.
- Para las pruebas se utiliza un camión patrón, el cual mantiene sus mismas condiciones en toda la experiencia.

- Se controla el manejo de los conductores por medio de monitores copiloto.
- Para que las vueltas sean válidas no deben tener más de 17 segundos de diferencia.
- La velocidad a la que deben manejar los camiones es de 90 km/hr con velocidad crucero.

Para determinar el impacto en el consumo de combustible se utilizan dos índices, el ahorro y la mejora. Ambos valores se muestran en las ecuaciones (37) y (38), respectivamente.

$$\% \text{ ahorro} = \frac{\text{Prom. consumo T/C LB} - \text{Prom. consumo T/C DA}}{\text{Prom. consumo T/C LB}} \quad (37)$$

$$\% \text{ mejora} = \frac{\text{Prom. consumo T/C LB} - \text{Prom. consumo T/C DA}}{\text{Prom. consumo T/C DA}} \quad (38)$$

Donde:

LB: Línea Base.

DA: Demostrativo de Ahorro.

T/C: Consumo del camión de prueba dividido consumo de camión patrón.

E.1.5.2. Resultados

Los resultados se pueden ver en la Tabla 45 y en la Figura 204. Se observa que el mejor resultado se obtiene para el kit e), obteniéndose un ahorro de 15,39%. También es destacable que el *kit intermedio* y el *kit completo A* obtienen los mismos resultados, esto debido a que la adición de generadores de vórtices no fue apreciable para este ensayo. Además, se observa que el solo cambio en el diseño del faldón lateral influye en el consumo de combustible en casi un 2%.

Tabla 45. Resultados de ahorro y mejoras para los distintos kits.

Kit aerodinámico	% de Ahorro	% de Mejora
Estándar	11,96	13,59
Intermedio	13,54	15,79
Completo A	13,64	15,79
Completo B	15,39	17,58

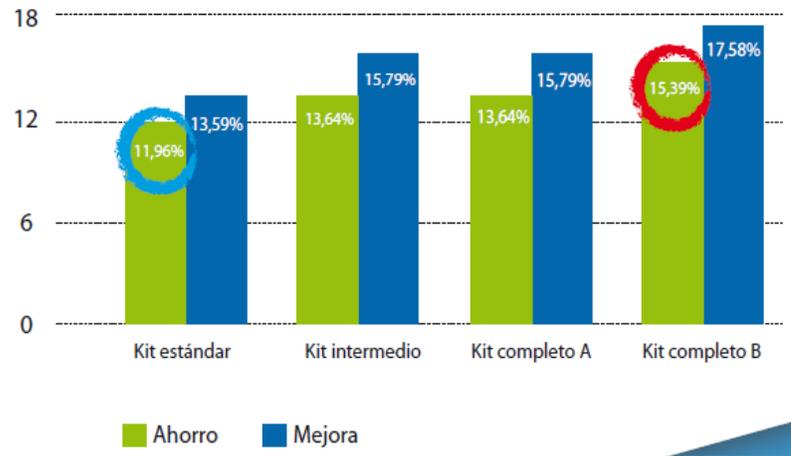


Figura 204. Porcentaje de ahorro y mejora para los distintos kits.

E.1.5.3. Conclusiones

En este estudio se concluye que los dispositivos aerodinámicos si aportan en la reducción del consumo de combustible, pudiendo obtener ahorros de un 15%. También se concluye que el diseño de estos dispositivos cobra vital importancia en los ahorros obtenidos, como se aprecia al comparar los resultados entre el kit completo A y el B.

E.2. Costos

E.2.1. Cotizaciones de software

A continuación se presentan dos cotizaciones de software CFD, una de ANSYS (Tabla 46) y otra de COMSOL (Tabla 47

) válidas hasta el 22 de septiembre del 2014.

La licencia de ANSYS cuenta con la modalidad de un año o 6 meses, mientras que la licencia para COMSOL es perpetua.

Tabla 46. Costos licencia ANSYS

Producto	Costo 1 año [USD]	Costo 6 meses [USD]
ANSYS CFD	\$ 21.850	\$ 14.750
ANSYS HPC PACK	\$ 9.210	\$ 6.215
Ansyes SpaceClaim Direct Modeler	\$ 2.395	\$ 1.615
Total	\$ 33.454	\$ 22.580

Tabla 47. Costos licencia COMSOL

Producto	Licencia individual [USD]	Licencia flotante [USD]
COMSOL Multiphysics	\$9,995	\$19,990
CFD Module	\$9,995	\$19,990

Total	\$19,990	\$39,980
--------------	-----------------	-----------------

E.2.2. Costos pruebas NCh 331

El presupuesto mostrado en la ... para realizar pruebas con la norma NCh 3331 es obtenido a partir de una propuesta a la licitación del proyecto denominado *Evaluación de tecnologías, dispositivos y/o aditivos que mejoren la eficiencia energética en el transporte de carga caminero* de la AChEE publicado el presente año. Este presupuesto fue realizado por la consultora Sociedad Consultora Sistemas Sustentables.

Tabla 48. Presupuesto pruebas NCh 3331.

Ítem	Aporte postulante y patrocinadores	Aporte AChEE	Total
Gastos de operación	\$7.378.000	\$10.980.000	\$ 18.358.000
Gastos de administración	-	\$360.000	\$ 360.000
Gastos de difusión y/o producción	-	\$1.475.000	\$ 1.475.000
Recursos Humanos	\$2.460.000	\$1.940.000	\$ 4.400.000
Total	\$9.837.000	\$14.756.000	\$ 24.593.000