

Sistema de control de ruido para un bus típico de la locomoción colectiva de Santiago

Matías Zañartu Salas
Ingeniero Civil en Sonido y Acústica

Dirk M. Fox Kruckenberg
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería

Eduardo A. Fuentes Pérez
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería



0. Resumen

El siguiente artículo presenta la primera etapa de un proyecto de investigación de la Universidad (proyectos FONDEI) y de una tesis de titulación de alumnos egresados de Ingeniería Civil en Sonido y Acústica de esta casa de estudios.

El interés de crear un sistema de control de ruido para buses de la locomoción colectiva en Santiago, considerada una de las fuentes de mayor impacto de ruido urbano en esta ciudad, surge como respuesta a la nueva norma creada por CONAMA que regulará sus niveles de emisión de ruido.

En términos generales, los modelos de buses que actualmente circulan en Santiago poseen carrocerías que son diseñadas y armadas en Chile sin criterio acústico alguno. Este trabajo tiene como objetivo implementar un sistema de control de ruido efectivo y a bajo costo que permita el cumplimiento de la norma para un bus de motor trasero, que corresponde al principal modelo que actualmente ingresa al país.

El diseño se hace cargo principalmente de las emisiones producidas por el motor y

controla variables mecánicas tales como temperaturas de funcionamiento y condiciones de operación del sistema de refrigeración asociadas al caudal y presión generados por el ventilador. Para estos efectos se creará un semiencierro en el compartimiento del motor y se instalarán celosías acústicas para la entrada y salida de aire necesaria del radiador. Además se proveerá de aislación mecánica al sistema de escape de gases. En esta primera etapa, los modelos teóricos utilizados confirman la efectividad del diseño. El estudio contempla una campaña de mediciones acústicas posteriores a la instalación para verificar dicha efectividad.

1. Introducción

El precario desarrollo del rubro de transporte público con buses en Santiago de Chile, marcado por una fuerte etapa de desregulación por parte del estado durante la década de los 80, se ha traducido en un bajo poder de gestión y una mala calidad del sistema en general. Sus problemas básicos son la ausencia de un sistema intermodal, los excesivos tiempos de viaje y la deficiente calidad de los buses.

Actualmente existen en Santiago alrededor de 7600 buses, de los cuales aproximadamente un 75% han sido carrozados en Chile con chasis importados. Estos no consideran criterios acústicos en sus diseños.

El parque actual esta conformado por buses de motor delantero, mayoritariamente buses antiguos de no más de 12 años de antigüedad, y de motor intermedio y trasero, principalmente buses nuevos, exigidos por ECO94[1]. De esta forma, la ubicación del motor es de relevancia en términos acústicos, tema que hasta la fecha no había sido considerado.

2. Formulación del problema

La Comisión Nacional del Medioambiente, CONAMA, ha desarrollado una normativa que regula los niveles máximos de emisión de ruido para buses que prestan servicios de locomoción colectiva urbana y rural [2]. Esta normativa establece límites de ruido en distintos puntos de medición tanto para buses nuevos como para buses actuales en circulación. Los procedimientos de medición de esta norma están especificados bajo dos condiciones de ensayo: el ensayo estático y el dinámico, similares a los establecidos en las ISO 5130:1982[3] e ISO 362:1998[4].

Esta norma genera la necesidad de mejorar la calidad acústica de los buses, lo cual es un desafío en Chile ya que no se han desarrollado técnicas de control de ruido especiales para este tipo de vehículos. Este estudio es el inicio de la investigación para hacer cumplir las exigencias de la norma al tipo de buses que existe en nuestro país.

3. Alcances del estudio

El estudio requiere crear técnicas de control de ruido en un modelo particular de bus de locomoción colectiva. Esto resultará en un sistema con bajos costos de implementación, cuyo diseño sea efectivo tanto para buses nuevos como para buses actualmente en circulación. Su grado de efectividad se debe determinar a partir de un diagnóstico comparativo entre los niveles de emisión de ruido del bus seleccionado y los límites más exigentes de la norma. El diseño debe considerar los valores actuales de las variables mecánicas más importantes que intervienen en este proceso, asociados a una condición de normal funcionamiento del bus.

4. Metodología

El vehículo seleccionado para llevar a cabo el estudio es un bus modelo Petrohué Ecológico, que corresponde a uno de los más vendidos durante la década de los 90. Fue fabricado en el año 1996 por la empresa carrocera chilena Metalpar S.A.

4.1. Diagnóstico del bus

Se realizó un diagnóstico estableciendo las condiciones iniciales de las emisiones de ruido del bus y las variables mecánicas que interactúan con el sistema de control de ruido.

4.1.1. Medición de las emisiones acústicas del bus

Según los procedimientos establecidos en la norma, se efectuaron mediciones acústicas en tres puntos para el ensayo estático. Los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla N°1, en la cual se observa que la reducción

deseada para el ensayo dinámico requiere de un tratamiento completo de todas las fuentes de ruido, no así en el ensayo estacionario, en el cual sólo se requiere una reducción en el escape.

Además se hicieron una serie de mediciones espectrales para identificar el rango de frecuencias y componentes tonales de interés. Los puntos de medición se ubicaron en posiciones a los costados y en la parte posterior del

compartimiento del motor, así como en el interior del bus. Se observa que el mayor nivel se encuentra en el costado izquierdo, con diferencias de hasta 10 dBA respecto del otro costado, debido a que este punto se ubica sobre la toma de aire en las cercanías del ventilador de enfriamiento. Esto da cuenta del énfasis que se debe hacer en el diseño respecto de las técnicas de control de ruido para ese sector.

Tabla N°1. Comparación entre niveles de ruido obtenidos y exigidos.

ENSAYO ESTÁTICO			
	Nivel obtenido (dBA)	Límite más exigente (dBA)	Reducción requerida (dBA)
Niveles de Emisión de Ruido de Escape	102,6	92,0	10,6
Niveles de Emisión de Ruido de Motor	95,8	95,0	0,8
Niveles de Emisión de Ruido Interior	85,0	85,0	0
ENSAYO DINÁMICO			
Ruido al Exterior	84,3(*)	81,0	3,3
Ruido al Interior	84,9(*)	81,0	3,9

(*) Niveles estimados a partir de valores de referencia[5]

4.1.2. Características mecánicas del bus

El bus seleccionado tiene las siguientes características:

- Chasis marca Mercedes Benz, modelo OH-1420 con motor trasero.
- Motor Diesel de 6 cilindros marca Mercedes Benz, modelo OM 366 LA6, con Turbo-Intercooler.
- Potencia: 255kW/211CV@2600RPM.
- Caja de transmisión automática ZF S 5 (5 velocidades).
- Motor enfriado por agua.

Además se detallan los siguientes datos relevantes:

- El radiador actual instalado no es original y se ha podido estimar su

eficiencia en un 60% respecto del radiador original.

- La velocidad de rotación del ventilador de enfriamiento corresponde a las RPM del motor del bus
- La hélice del ventilador posee 10 aspas y tiene un diámetro de 60cm. El aire que ingresa a la parte del compartimiento del motor donde se encuentra el radiador, lo hace a través de una rejilla, cuya área libre efectiva debe ser a lo menos igual a 0.39m²[6].
- El sistema de admisión de aire debe tener una área libre de captación de 0.039m² y la caída de presión total desde el exterior hasta un punto ubicado a la salida del filtro de aire no debe ser mayor a 255mmcd (a 4°C)[6]

- El piso del compartimiento de motor está descubierto y parte de sus paredes internas están revestidas con lana de fibra de vidrio.

4.1.3. Variables mecánicas de interés

Uno de los objetivos que persigue el sistema de control de ruido es mantener ciertas variables mecánicas en sus valores originales, de manera de no perjudicar el normal funcionamiento del motor.

El sistema de enfriamiento del motor posee una serie de elementos, donde cada uno genera una caída de presión determinada, cuya suma corresponde, en valor absoluto, a la pérdida de carga total del sistema de enfriamiento[7]. Este dato es muy importante para el diseño y su valor se obtuvo mediante medición de la presión estática en un punto del deflector ubicado entre el ventilador y el radiador. Se midió con la tapa trasera del compartimiento de motor abierta, despreciando el efecto de las pérdidas de carga a la salida del ventilador, constituidas principalmente por la contrapresión que se genera con el choque del aire en la tapa trasera.

También se midió la velocidad del flujo de aire que atraviesa el radiador y las temperaturas del agua en dos puntos específicos del sistema de enfriamiento: uno a la salida del motor (agua caliente) y otro a la salida del radiador (agua fría). Además se midió la temperatura al interior del compartimiento del motor.

4.2. Sistema de control de ruido

El sistema de control de ruido diseñado considera los siguientes tratamientos:

- i) Instalación de dos celosías acústicas para el sistema de enfriamiento, una en la entrada de aire, en el lugar donde se

encuentra la rejilla de captación, y otra instalada en la tapa trasera del compartimiento de motor con su centro lo más próximo posible al eje del ventilador.

- ii) Implementación de un encierro parcial del motor, sellando la parte descubierta del piso.
- iii) Recubrimiento de las paredes interiores del semienclerco con material absorbente para reducir el nivel interior.
- iv) Cambio del silenciador del escape de gases existente e instalación de soportes antivibratorios y sellos acústicos en los lugares necesarios.

El diseño considera mantener constante la cantidad de aire que ingresa al radiador para no afectar la eficiencia del sistema de refrigeración. La instalación de dos celosías aumentan la caída de presión total del sistema, lo que produce los siguientes efectos asociados: variación de la curva característica del sistema; corrimiento del punto de operación del ventilador; y, por ende, una disminución del caudal generado. Se debe reestablecer la condición inicial mediante un cambio en la configuración de la hélice o aumentando la velocidad de rotación de la misma[7]. A partir de los datos de diseño de las celosías, se puede estimar que el ventilador debe aumentar su velocidad de giro en 200 RPM para igualar la presión estática total (PEV) original, en presencia de las nuevas caídas de presión del sistema. Con esto se logra mantener constante el caudal a costas de un aumento de 1.3 veces la potencia original consumida por el ventilador.

Las celosías acústicas se diseñaron en forma de V (dos vías) con largos de 300mm y áreas abiertas de 40% y 50% para el costado y la parte trasera respectivamente. Sus *baffles* forman ángulos opuestos de 45° y están

revestidos con 26mm de lana de fibra de vidrio con densidad 35Kg/m³, por ambos lados. Sus pérdidas por inserción (IL) calculadas son 6 y 7dBA respectivamente, y sus caídas de presión equivalen a 20mmca para cada una[8],[9]. La celosía del costado tiene una superficie de 0,7m², correspondiente al 33% de la superficie de este lado del compartimiento del motor, lo que entregará una atenuación de 3dBA en la emisión total, ya que su IL es mayor al del material reemplazado en su lugar. La otra celosía, que cubre una superficie total de 0,5m², genera un efecto negativo, ya que el IL que entrega es menor al del material reemplazado en su lugar. Esto produce un incremento de 2dBA en el nivel global de emisiones. El efecto combinado de ambas celosías sobre las emisiones globales entrega una reducción aproximada de 1dBA.

Se instalará un cierre en el piso del compartimiento del motor, que generará un aumento de temperatura en su interior, el cual ha de ser controlado mediante un sistema de extracción de aire forzada. Este sistema debe entregar una renovación de aire suficiente para permitir que el motor y sus componentes funcionen dentro de un rango permitido. De esta forma, se instalará, en una de las placas del cierre, un electro-ventilador extractor de 172mm de diámetro que es capaz de mover un caudal de 480m³/h a baja presión. Este cierre del piso del compartimiento del motor está compuesto por 5 placas removibles y una placa semiremovible de acero de 2 mm de espesor, fijadas a una estructura metálica instalada en la parte inferior del bus. Se usarán placas removibles para facilitar cualquier mantención mecánica que se requiera. Cada una tiene una pérdida por transmisión TL aproximadamente de 10dBA y en conjunto cubren un 70% de

la superficie inferior, lo que entregará una atenuación aproximada de 4dBA sobre las emisiones totales del ruido del motor

Al cerrar el piso, el nivel al interior del compartimiento aumenta, por lo que es necesario revestir con material poroso que absorba las reflexiones en sus paredes. Este revestimiento permitirá reducir el nivel de ruido, tanto al interior del compartimiento del motor como al interior del bus. El material a usar en el interior será lana mineral de espesor 25mm y densidad 50Kg/m³. No se recubrirán las placas metálicas removibles, ya que al estar bajo el motor, éstas se ensuciarán rápidamente, perdiendo su efectividad en absorción. De esta forma, la superficie total a recubrir corresponde aproximadamente al 46% de la superficie interior total, que sin tratamiento tiene una absorción estimada de 12 % y con tratamiento aumenta a 70 %. El efecto total es una reducción de 2dBA sobre el total de emisiones.

Por último, para que la solución propuesta entregue la efectividad deseada, se incorporarán sellos acústicos en todas las aberturas existentes.

Integrando los tratamientos anteriores, se obtiene la reducción total de las emisiones provenientes del motor, como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla N°2. Tratamiento del motor

Tipo de Tratamiento	Efectividad estimada
Absorción en el compartimiento	-2dBA
Cierre del piso del motor	-4dBA
Celosía y tratamiento lateral	-3dBA
Celosía trasera	+2dBA
Reducción Total Estimada	-7dBA

Se cambiará el silenciador existente por uno nuevo, preferentemente por el original del fabricante. Adicionalmente, se recubrirá el ducto de escape de gases con lana mineral de alta densidad y se reemplazarán los soportes antivibratorios que posee la estructura que sostiene al silenciador. Este tratamiento cumple dos funciones: contribuir a la disminución de la temperatura al interior del compartimiento del motor; y disminuir la transmisión de ruido por vía aérea y estructural que se pueda inducir en el ducto desde el motor. Todo esto deberá bajar el nivel de emisión de ruido del escape en aproximadamente 11dBA, según lo establecido en la tabla N°1. Esta atenuación se asocia sólo a la medición de ruido estacionaria en el escape y no refleja una reducción en el nivel global de emisiones dado en el ensayo dinámico.

5. Conclusión.

Se presentan las principales consideraciones y características del proyecto de control de ruido que confirman la efectividad del diseño. Este diseño se instalará en el bus seleccionado en mayo de 2002 para posteriormente realizar una campaña de verificación de la eficiencia del diseño. En la siguiente etapa se optimizará el diseño propuesto en función de los resultados obtenidos.

6. Referencias

- [1] MTT. *Reglamento de los servicios nacionales de transporte publico de pasajeros*, 2000.
- [2] CONAMA. "*Proyecto Definitivo de Norma de Emisión de Ruido para Buses de Locomoción Colectiva Urbana y Rural*". 2001.
- [3] ISO 5130-1982. *Acoustics – Measurements of noise emitted by stationary road vehicles – Survey method*.
- [4] ISO362-1998. *Acoustics – Measurements of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method*.
- [5] CONAMA. *Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto de norma de emisión de ruido para buses de la locomoción colectiva que prestan servicios de locomoción colectiva urbana y rural*. Diciembre 2000.
- [6] Mercedes-Benz do Brasil S.A. *Manual de Encarroçamento de Ônibus*.2002
- [7] ACGIH (American Conference Of Governmental Industrial Hygienists. *Industrial Ventilation*. 1992.
- [8] Gerges, Samir. *Ruido: Fundamentos y Control*. 1998.
- [9] Beranek, Leo L. & Vér, István L. *Noise and Vibration Control Engineering*. 1992.