

**Fondo de Desarrollo de la Investigación
FONDEI**

**INVESTIGACIÓN Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS
DE CONTROL DE RUIDO PARA BUSES DE LA
LOCOMOCIÓN COLECTIVA.**

Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales

**Con el Patrocinio de la
Comisión Nacional del Medio Ambiente**

Indice

Información y estado del proyecto	3
Objetivos parciales y resultados comprometidos	4
Antecedentes técnicos relevantes	4
Medición de las emisiones acústicas del bus	4
Características mecánicas del bus	5
Variables mecánicas de interés	5
Resultados obtenidos	6
Costos Asociados	7
Conclusiones	9
Bibliografía	9

Información del proyecto

Coordinador del Proyecto

Prof. Ing. Matías Zañartu Salas
Categoría: *Profesor Auxiliar*

Colaboradores Internos

Prof. Ing Christian Gerard Büchi
Categoría: *Profesor Auxiliar*
Prof. Ing. Andrés Barrera Andrade
Categoría: *Profesor Instructor*

Colaboradores Externos

Ing. Igor Valdebenito Ojeda
Ingeniero del Departamento de Descontaminación,
Planes y Normas.
Comisión Nacional de Medio Ambiente.

Carrera Asociada

Ingeniería Civil en Sonido y Acústica

Areas Prioritarias

Acústica
Gestión medioambiental
Control de ruido aplicado

Fecha de Inicio

30 de Agosto de 2001

Fecha de Término

30 de Diciembre de 2002

Fundamentación y cronología del proyecto

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 buses que actualmente circulan en Santiago poseen carrocerías diseñadas y armadas en Chile, sin criterio acústico alguno. Además, no se han desarrollado técnicas de control de ruido especiales para este tipo de vehículos.

A partir de lo anterior se crea la necesidad de investigar en el desarrollo práctico de las diversas técnicas de control de ruido que faciliten el cumplimiento de la normativa, que regulará las emisiones de ruido de los buses de la locomoción colectiva. Los resultados que arroja una investigación aplicada de este tipo son decisivos para la aplicabilidad de dicha normativa, teniendo consecuencias económicas de interés para diversos sectores involucrados en el tema del transporte público y gestión ambiental, así como para la Universidad. Sin embargo, la realización de este tipo de investigación requiere necesariamente una fuerte inversión en materiales y mano de obra calificada. Para ello, el Fondo de Desarrollo de la Investigación FONDEI, creado por la Universidad Pérez Rosales, ha dispuesto los recursos necesarios para la realización de este trabajo.

El proyecto FONDEI titulado "Investigación y Aplicación de Técnicas de Control de Ruido para Buses de la Locomoción Colectiva" es presentado a fines de 2000, contando con el patrocinio de la Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. Su desarrollo se realiza mediante una Tesis de Titulación de alumnos de la carrera de Ingeniería Civil en Sonido y Acústica de nuestra Universidad. El equipo de trabajo esta compuesto por su Coordinador, el Ingeniero Matías Zañartu S., los Colaboradores Internos Ingenieros Christian Gerard B., Andrés Barrera A., y los alumnos tesistas Dirk Fox K. y Eduardo Fuentes P. Dentro del área de Colaboradores Externos se encuentra Igor Valdebenito O., Ingeniero del Departamento de Descontaminación, Planes y Normas de la CONAMA. Los trabajos de investigación comienzan en agosto de 2001, en conjunto con la tesis de grado titulada "Desarrollo e Implementación de un Sistema de Control de Ruido para Buses de la Locomoción Colectiva".

El trabajo de tesis finaliza a fines de diciembre de 2002, cumpliéndose todos los objetivos propuestos para el desarrollo de dicho trabajo.

Objetivos generales y específicos.

El objetivo general de este proyecto es desarrollar, mediante el trabajo de una tesis de grado, técnicas de control de ruido que faciliten el cumplimiento de la normativa que regulará las emisiones de ruido de los buses de la locomoción colectiva.

Los objetivos específicos para lograr esto son:

- Investigar sobre las técnicas apropiadas para el control de ruido de un modelo de bus urbano
- Diseñar modelos teóricos de Ingeniería de control de ruido, de máxima eficiencia para el modelo de bus seleccionado.

- Verificar las emisiones del bus en estudio previo el montaje de las técnicas de control diseñadas, esto se debe realizar mediante un plan de mediciones acordes a los procedimientos de la normativa (mediciones estáticas y dinámicas)
- Implementar el modelo teórico diseñado para el bus seleccionado.
- Verificar la eficiencia de las técnicas de control, mediante un plan de mediciones acordes a los procedimientos de la normativa (mediciones estáticas y dinámicas)
- Analizar y desarrollar técnicas que permitan justificar los resultados obtenidos en las campañas de mediciones.
- Publicar los resultados finales en una revista de desarrollo científico, presentando el modelo desarrollado y los resultados obtenidos.

Desarrollo del trabajo.

Antecedentes generales.

El presente proyecto se desarrolló entre Agosto de 2001 y diciembre de 2002. De dicho periodo se dedicaron aproximadamente 6 meses a la recopilación de antecedentes y teoría necesaria, que sirven de base para la propuesta de un diseño de sistema de control de ruido, que sea efectivo y factible de implementar. Posteriormente se planificó y realizó el montaje del sistema de control de ruido en el bus seleccionado. Sin duda, estas dos últimas etapas son las de mayor trascendencia en el desarrollo de del proyecto, para lo cual se trabajó durante casi un año completo. Finalmente se realizó la verificación de la efectividad del sistema instalado.

Descripción del bus seleccionado.

El vehículo seleccionado para realizar este trabajo es un bus marca Metalpar, modelo Petrohué Ecológico, carrozado en Chile en el año 1996 por la empresa Metalpar S.A. Actualmente forma parte del recorrido n° 128 (Puente Alto-Renca) de la licitación actual vigente (1998) y su propietario es el Sr. Walter Godoy. La figura 5.1 muestra fotografías del bus seleccionado.



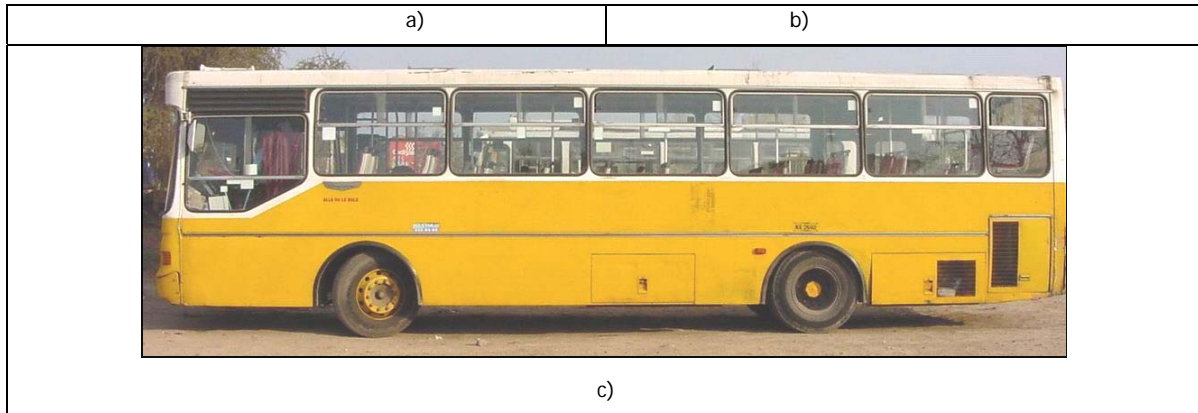


Fig. 5.1 – a) Vista frontal del bus. b) Vista trasera del bus. c) Vista lateral del bus. (Fuente: Elaboración propia).

Las figuras 5.2 y 5.3 muestran dos vistas del bus con sus respectivas dimensiones:

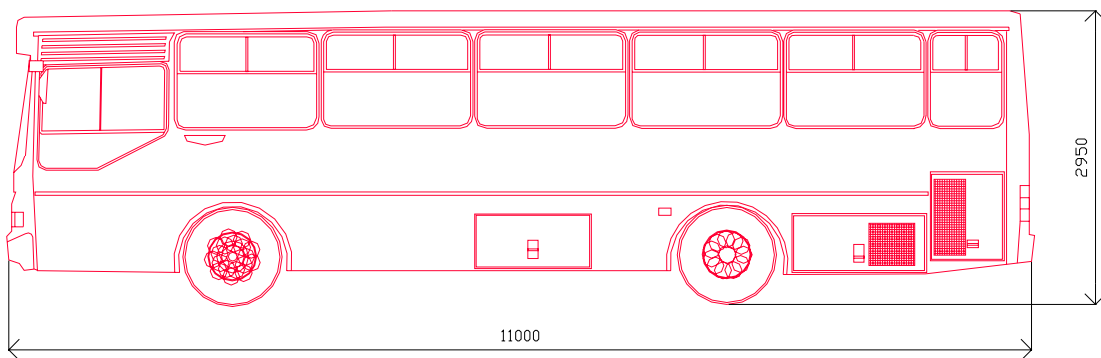


Fig. 5.2 – Vista lateral del bus. (Fuente: Elaboración propia).

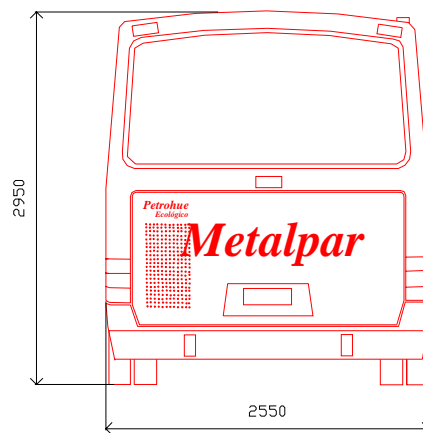


Fig. 5.3 – Vista trasera del bus. (Fuente: Elaboración propia).

El chasis sobre el cual ha sido carrozado este bus es de fabricación brasilera, de marca Mercedes-Benz, modelo OH-1420 L de exportación, con el motor ubicado en su parte trasera. El compartimiento del motor de este bus consta de paredes recubiertas parcialmente con lana mineral, que, en conjunto con la estructura divisoria entre este compartimiento y el interior del bus, sirve como aislamiento termo-acústico desde el motor hacia el interior. El piso de dicho compartimiento se encuentra completamente descubierto.

El motor del bus seleccionado tiene las siguientes características:

- 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).
- Tensión nominal del sistema eléctrico: 24Volts
- Batería de alimentación (tensión / capacidad): 2x12Volts / 2x135Ah

Además se detallan los siguientes datos relevantes:

- Motor enfriado por agua, cuyo sistema de enfriamiento en perfecto estado trabaja a una temperatura nominal de 83°C. La temperatura del agua de enfriamiento de este motor en particular escasamente desciende de los 85°C.
- El radiador actual instalado no es original y se ha podido estimar su eficiencia en un 70% respecto del radiador original.
- La velocidad de rotación del ventilador de enfriamiento corresponde a las RPM del motor del bus.

Diagnóstico mecánico.

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 ya que cualquier elemento adicional que se instale en el sistema provocará una disminución del caudal generado por el ventilador y, por ende, una disminución de su capacidad de enfriamiento.

Por otra parte, si se implementase un cierre parcial o total al compartimiento del motor como método de control de ruido, se generaría al interior de este un aumento de presión (sobrepresión) y de temperatura. Estos efectos alteran el normal funcionamiento del motor, por lo que han sido considerados en el diseño definitivo del sistema de control de ruido. Considerando los antecedentes teóricos recopilados en relación a las características mecánicas descritas y el funcionamiento del motor del bus, además de las variables que intervienen en dicho proceso, se midieron las siguientes variables:

- La *presión estática*, medida en un punto medio del deflector que une al ventilador con el radiador. Este valor representa la pérdida de carga que se genera en el sistema de enfriamiento, entre las rejillas de aire y la boca del ventilador.
- El *caudal de aire*, medido a la salida del ventilador.

- Las *temperaturas del agua* al interior del circuito de refrigeración, medidas en dos puntos: un punto de agua caliente (que transporta calor transferido desde el motor) y un punto de agua fría (que ha sido enfriado por el radiador).

Los resultados para las variables descritas se presentan en la siguiente tabla.

Variable	Condición específica de operación	Valor promedio medido
Pérdida de carga del sistema de enfriamiento	Ralentí (700RPM)	6mmcda
	2000RPM	50mmcda
Velocidad de flujo de aire	Ralentí (700RPM)	2.1m/s
	2000RPM	6.0m/s
Temperatura del agua <i>caliente</i> del sistema de enfriamiento en un punto de retorno al radiador	Motor operando en condiciones de plena carga	77.3°C
Temperatura del agua <i>fría</i> del sistema de enfriamiento en un punto a la salida del radiador	Motor operando en condiciones de plena carga	76.4°C

Para el caso de las temperaturas, cabe mencionar que las condiciones de funcionamiento del sistema de enfriamiento, presentadas durante las mediciones, fueron óptimas. Esto se ve reflejado en los promedios mostrados en la tabla 5.3, los cuales están bajo los 83°C nominales establecidos

Diagnóstico de las emisiones acústicas.

Si bien el bus usado para este trabajo está actualmente en circulación, las mediciones y todo el análisis posterior se realizó suponiendo que se trabaja con un bus nuevo, para el cual la norma es más rigurosa en términos de niveles máximos y cantidad de mediciones. Además, el sistema de control de ruido propuesto pretende cumplir los límites más exigentes que contempla la normativa de buses, esto es, los niveles de ruido exigidos para buses nuevos a treinta meses de su entrada en vigencia.

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.

Se realizaron 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 observó 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.

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			

ENSAYO ESTÁTICO	Nivel obtenido (dBA)	Límite más exigente (dBA)	Reducción requerida (dBA)
Ruido al Exterior	86,5	81,0	5,5
Ruido al Interior	82,8	81,0	1,8

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

Sistema de control de ruido.

El sistema de control mitiga el ruido proveniente del compartimiento de motor, interviniendo sólo sus superficies, y las emisiones de ruido a la salida del escape de gases. Esto se logra mediante la implementación de los siguientes tratamientos o elementos:

- Instalación de dos celosías acústicas para el sistema de enfriamiento, una en la entrada de aire, en el lugar donde se encuentran las rejillas de captación, y otra instalada en la tapa trasera del compartimiento de motor.
- Cambio de puerta trasera existente por una nueva puerta de dos paños.
- Implementación de un encierro parcial del motor, cerrando la parte descubierta del piso, mediante el uso de placas removibles.
- Implementación de un sistema de extracción de aire para el compartimiento del motor, mediante la instalación de un electro-ventilador instalado en el piso del compartimiento.
- Cambio del silenciador del escape de gases existente e instalación de soportes antivibratorios.

El grado de efectividad del sistema instalado se determinó a partir de un diagnóstico comparativo entre los niveles de emisión de ruido del bus seleccionado y los límites más exigentes de la norma. Su 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.

El diseño específico de cada uno de los elementos del método de control se realiza en base a la siguiente hipótesis: la implementación del sistema tiene directa relación con las emisiones de ruido medidas en el ensayo dinámico, ya que su registro es el resultado de la interacción del conjunto de focos de propagación de ruido desde el interior del compartimiento de motor. Las emisiones de ruido del escape de gases se tratan de forma independiente, a parte del conjunto de emisiones de ruido mencionadas. Por otra parte, se descarta la influencia del efecto del ruido de rodado, debido a los altos niveles de ruido provenientes del motor, que se generan durante la condición de carga máxima requerida para este ensayo.

Por lo tanto, la efectividad del sistema de control de ruido corresponde a la suma algebraica de las efectividades acústicas de cada elemento que lo compone, excepto el tratamiento para el escape de gases, y debe ser igual, o en la medida de lo posible, mayor a 5,5dBA. Este valor equivale a la reducción requerida para el ensayo dinámico. La efectividad del tratamiento para el escape de gases equivale a la reducción requerida en el ensayo estacionario, en esa posición específica.

La efectividad acústica de los diversos tratamientos que comprende el sistema de control de ruido se obtiene mediante un método analítico que compara las cantidades de energía sonora que se propagan a través de una superficie determinada antes de implementar en ella algún tipo de tratamiento, y después de la implementación de dicho tratamiento. Lo anterior se realiza en función de la reducción de ruido que otorgan los materiales y elementos que conforman las superficies analizadas, para ambas situaciones consideradas.

En resumen, son tres las superficies del compartimiento del motor que se deben intervenir debido a la implementación del método de control. Estas son: *costado izquierdo*, producto de la instalación de una celosía y cierre de las rejillas actuales de captación de aire; *puerta trasera*, debido al cambio de puertas e instalación de una celosía; y *parte inferior*, ya que se considera cerrar el piso del compartimiento.

En el trabajo de tesis se presenta en detalle el desarrollo matemático realizado para calcular la efectividad de cada uno de los tratamientos propuestos. La tabla 5.8 presenta los resultados finales de dicho análisis.

Tratamiento	Reducción [dBA]
Piso	-6
Costado Izquierdo	-5
Puerta trasera	4
Nivel sonoro al interior del compartimiento	2
Total	-5

Tabla 5.8 – Resumen de reducciones para los tratamientos propuestos. Los valores positivos corresponden a un incremento del nivel resultante, debido a la implementación de un tratamiento determinado. (Fuente: Elaboración propia).

El ítem *Nivel sonoro al interior del compartimiento* está asociado al aumento de nivel al interior del compartimiento, que se produce debido al cerramiento del piso.

A continuación se presentan los diseños de cada uno de los tratamientos y sus detalles constructivos.

Sistema de escape de gases.

Se cambió el silenciador instalado por el original nuevo de Mercedes-Benz. Sin embargo, mediciones realizadas de acuerdo a los procedimientos de la normativa de buses a ambos silenciadores, instalados en el bus en forma paralela, entregaron valores bastante similares. Incluso los valores entregados por el silenciador nuevo fueron mayores que los del silenciador antiguo, por lo que se debe buscar otra solución para lograr mayor reducción de ruido a la salida del escape de gases.

Para conseguir esto existen dos posibilidades: cambiar el silenciador original por uno que entregue una mayor pérdida por inserción y proporcione la reducción necesaria al sistema, o incluir un silenciador nuevo, en serie con el original del fabricante.

La primera opción, que aparece como la más simple, es desechada para este caso, debido a la falta de espacio en el compartimiento de motor. Esto se debe a que un silenciador de mayor rendimiento acústico implica necesariamente mayores dimensiones en su estructura. Esto se puede implementar, pero para ello es necesaria una intervención mayor en la estructura del compartimiento, lo que queda fuera de los alcances de este trabajo.

Luego, la instalación de dos silenciadores en serie se presenta como la mejor opción a implementar en el bus. Para esto y a modo de prueba, se considera instalar del silenciador adicional en la parte superior del bus, montado en una estructura de soporte, como se muestra en la figura 5.18.

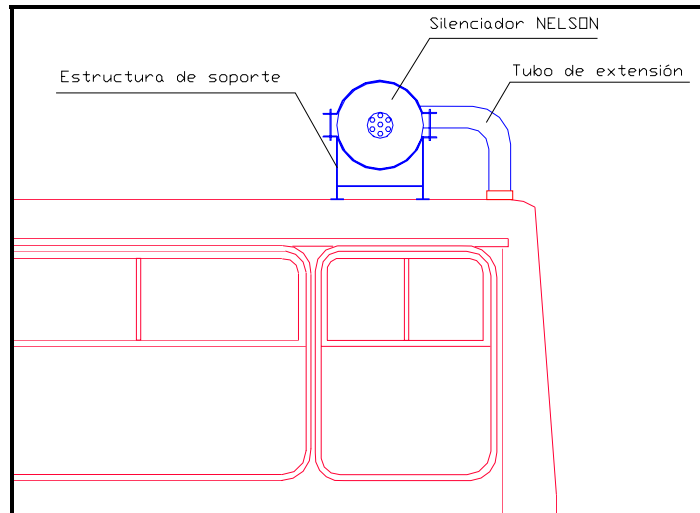


Fig. 5.18 – Ubicación del silenciador adicional en el techo del bus. (Fuente: Elaboración propia).

El silenciador que se seleccionó para aumentar la atenuación a la salida del escape de gases es marca Nelson, modelo 43230, tipo residencial. Se realizaron mediciones en sala anecoica de la Universidad para determinar el nivel de atenuación que entregaban los silenciadores y, particularmente, la del silenciador Nelson debido a que el fabricante sólo entrega una reducción aproximada y en bandas de octava. Este conjunto de mediciones dieron como resultado que el silenciador original Mercedes-Benz tiene una pérdida por inserción de 9dBA y el silenciador Nelson una de 16,7dBA.

Por otro lado, la medición del ruido de escape en el diagnóstico de emisiones acústicas se realizó con el silenciador Mercedes-Benz instalado, por lo que la atenuación adicional de 16,7dBA del nuevo silenciador deberá garantizar la reducción necesaria de 10,6dB para el escape de gases.

Encierro parcial inferior.

El principal lugar por donde se propaga el ruido hacia el exterior lo constituye la parte inferior del compartimiento de motor, debido a que esta zona se encuentra completamente descubierta y sin ningún tipo de protección acústica. Este sector debe tratarse acústicamente y para ello se requiere implementar una superficie inferior, que junto a la carrocería conforme un semiencierro acústico. Este semiencierro, sin embargo, debe considerar la mantención mecánica periódica que se le realiza al bus, prácticamente a diario, y su deficiente estado, lo que implica el derrame de líquidos (agua, aceite, petróleo) en el interior del compartimiento. Estos antecedentes indican que el tratamiento debe ser completamente removible para tener un acceso rápido al motor y, por otro lado, debe poseer un sistema de evacuación de líquidos para que estos no se acumulen en su interior. Queda descartado entonces el uso de material con absorción acústica expuesto hacia el interior, debido al riesgo de inflamación de los elementos combustibles en su interior.

A partir de las restricciones presentadas anteriormente, se determinó crear una superficie compuesta únicamente de placas metálicas, apernadas a una estructura de soporte como se muestra en la figura 5.22.

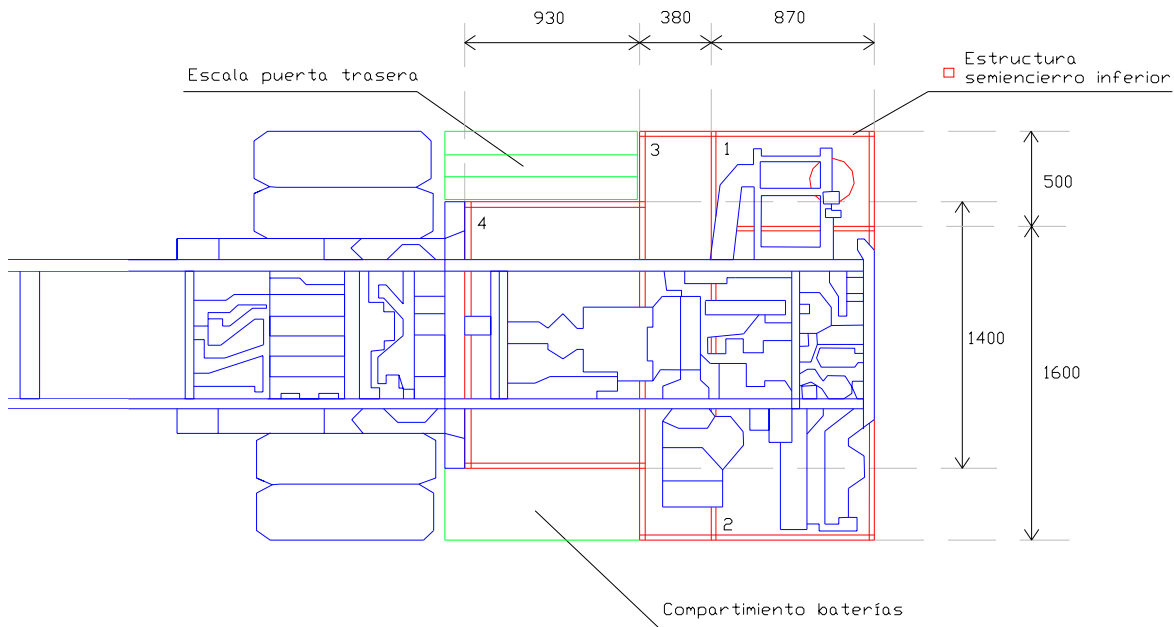


Fig. 5.22 – Vista superior de parte trasera del chasis OH 1420. Se incluye la estructura de soporte para el semiencierro y sus dimensiones. La numeración presentada se refiere a las 4 placas que conforman el encierro del piso. (Fuente: Elaboración propia).

Esta estructura cubre aproximadamente una superficie total de $5,0\text{m}^2$ y se extiende desde el parachoques trasero hasta el eje trasero del bus. La superficie del semiencierro consta de 4 placas removibles (ver fig. 5.22), donde la placa 2 se diseña como bandeja para que se pueda acceder de forma rápida a la zona que se encuentra justo debajo del motor, que es donde se requiere mayor mantención. La placa 1 considera una abertura para la instalación de un extractor de aire, el que se detallará mas adelante.

La estructura inferior está formada por perfiles metálicos tipo U y tipo L, de 2mm de espesor. Las placas metálicas a utilizar tienen un espesor de 3mm, las cuales tienen una aislación de 12dBA, incluyendo la abertura en la placa 1. Este valor se calculó mediante el modelo de predicción combinado de TL Sharp – Davy [11].

Puerta lateral de acceso al radiador.

Las mediciones del diagnóstico de emisiones acústicas demostraron que el mayor nivel de ruido se presenta en el costado izquierdo o punto *exterior 1*. Esto se debe principalmente a la presencia del sistema de enfriamiento del motor, ubicado en este sector, donde su principal fuente de ruido la constituye el ventilador de enfriamiento.

En este sector de la carrocería existen aberturas que admiten la cantidad de aire necesaria hacia el radiador, pero por otro lado, permiten que el ruido se propague hacia el exterior sin ningún tipo de protección o tratamiento. Debido a esto, se propone el tratamiento acústico de este sector, tapando la rejilla de la puerta de acceso al radiador e incorporando una celosía de entrada de aire en el lugar donde se encuentra la segunda rejilla. El material utilizado para tapar la rejilla de la puerta de acceso al radiador es una placa de metal de 3mm de espesor. La figura 5.23 muestra los cambios proyectados para este costado.

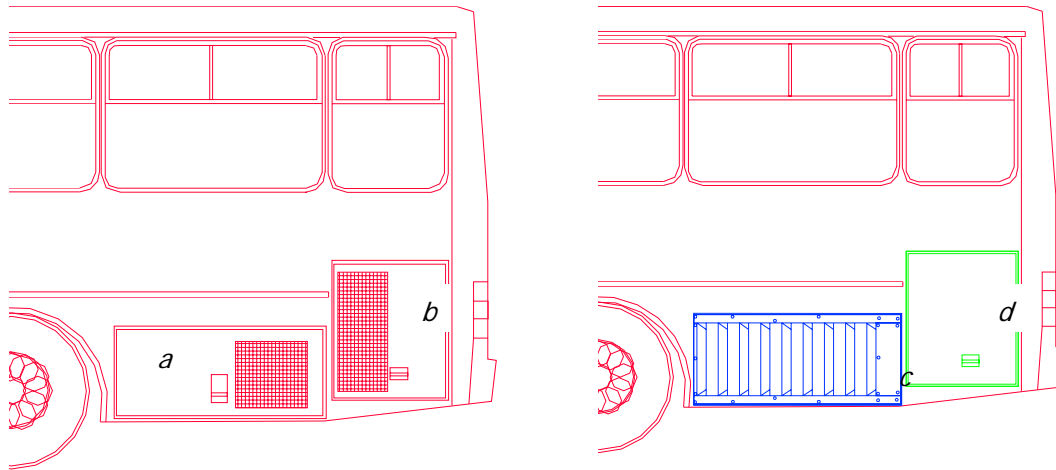


Fig. 5.23 – Cambios proyectados para el costado izquierdo del bus. Se incluye una celosía acústica para la admisión de aire y el cierre de las aberturas existentes. (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 5.23, (a) muestra el compartimiento de las baterías y (b) muestra la puerta de acceso al radiador, donde ambas cuentan con rejillas de admisión de aire. El tratamiento propone remover la puerta (a), cambiar las baterías al compartimiento del motor e instalar la celosía de admisión en este sector, como se muestra en la parte (c) de la figura. A su vez, en (d) se muestra la puerta de acceso al radiador tapada, sin rejilla, ya que el aire sólo entrará por la celosía.

Celosías acústicas para la admisión y salida de aire del sistema de enfriamiento.

Se propone instalar una celosía acústica a la entrada del sistema de enfriamiento, para captar la totalidad del aire necesaria. Además, se requiere la instalación de una celosía acústica en la puerta trasera del compartimiento de motor, próxima al ventilador. Su función es guiar el aire que es movido a través del radiador directamente hacia el exterior.

Celosía de entrada de aire.

El espacio óptimo dispuesto para la instalación de la celosía de entrada de aire es un compartimiento lateral donde se ubican las baterías que alimentan al motor de partida. Su forma geométrica es rectangular, con dimensiones 0,6x1,4x0,65 (altura, ancho, profundidad), lo cual limita a diseñar la celosía con una superficie frontal máxima de $0,6 \times 1,4 \text{ mts} = 0,84 \text{ m}^2$. Para poder utilizar este espacio es necesario: en primer lugar, reubicar las baterías al interior del compartimiento de motor, sobre el filtro de aire, e instalarlas en una estructura de soporte con bandeja removible; y segundo, utilizar una celosía acústica cuya profundidad no supere los 300mm para no afectar el paso del aire hacia la boca de aspiración del ventilador.

La celosía para la entrada de aire al radiador tiene las siguientes especificaciones generales de diseño:

Ancho [mm]	1340
Alto [mm]	545
Largo (profundidad) [mm]	300
Configuración de celdas	En forma de "V" (invertidas)
Ángulo de inclinación de celdas (<i>pitch</i>) [°]	35
Espesor de celda [pulgadas] / [mm]	2 / 52
Porcentaje de área libre total[%]	47
Área libre total [m ²]	0,31

Tabla 5.10 – Características de diseño para la celosía de entrada de aire. (Fuente: Elaboración propia).

Se realizó una modelación matemática para estimar la caída de presión de la celosía acústica, utilizando los caudales correspondientes a las velocidades de flujo medidas durante el diagnóstico mecánico. Estos son 6107m³/h para 2000RPM y 2138m³/h para *ralentí* (700RPM). Los resultados de dichas modelaciones se presentan en la tabla 5.11.

Condición	Flujo de aire		Caída de presión	
	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /h]	[mmcda]	[Pa]
Ralentí	2,1	2138	0,26	2,64
2000RPM	6	6107	2,16	21,55

Tabla 5.11 – Datos calculados de caída de presión para la celosía de entrada de aire, a distintos régimen de funcionamiento. (Fuente: Elaboración propia).

Celosía de salida de aire.

El diseño de la celosía de salida de aire tiene la limitante, que su largo no debe exceder los 300mm, debido al poco espacio existente entre la puerta y la polea del ventilador.

La celosía para la salida de aire del ventilador tiene las siguientes especificaciones generales de diseño:

Ancho [mm]	960
Alto [mm]	600
Largo (profundidad) [mm]	300
Configuración de celdas	En forma de "V" (invertidas)
Ángulo de inclinación de celdas (<i>pitch</i>) [°]	35
Espesor de celda [pulgadas] / [mm]	2 / 52
Porcentaje de área libre total[%]	38
Área libre total [m ²]	0,19

Tabla 5.12 – Características de diseño para la celosía de salida de aire. (Fuente: Elaboración propia).

Se modeló su caída de presión, utilizando caudales de aire de 6107m³/h para 2000RPM y 2138m³/h para *ralentí* (700RPM). Los resultados de dichas modelaciones se presentan en la tabla 5.13.

Condición	Flujo de aire		Caída de presión	
	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /h]	[mmcda]	[Pa]
Ralentí	2,1	2138	1,53	15,29
2000RPM	6	6107	12,48	124,77

Tabla 5.13 – Datos calculados de caída de presión para la celosía de salida de aire, a distintos régimen de funcionamiento. (Fuente: Elaboración propia).

Se midió la efectividad acústica de ambas celosías, en términos de su pérdida por inserción (*IL* – Insertion Loss). La metodología que se empleó consiste en la medición de las celosías al interior de un ducto, utilizando una fuente de ruido rosa en la entrada de este. Luego se obtiene la pérdida por inserción de la celosía en bandas de tercio de octava y global, por medio de la diferencia de nivel de presión medida en su salida, con y sin la celosía respectiva instalada en su interior.

La pérdida por inserción global de ambas celosías se muestra en la tabla 5.14.

IL Celosía de entrada [dBA]	11,0
IL Celosía de salida [dBA]	11,5

Tabla 5.14 – Pérdida por inserción de ambas celosías, en dBA. (Fuente: Elaboración propia).

Las mediciones de caída de presión de las celosías se llevaron a cabo con el mismo ducto utilizado para las mediciones acústicas. En su interior se generaron distintas velocidades de flujo de aire y se midió la presión estática, en un punto *aguas abajo*¹ de la celosía. Luego, la pérdida de carga de la celosía respectiva se obtiene por medio de la diferencia de presión estática medida, con y sin la celosía instalada en el interior del ducto. En la tabla 5.15 se muestra el resultado obtenido.

Caudal [m ³ /h]	Caída de presión [mmcda]
0	-0,12
576	0,60
850	0,95
1109	1,27
2138	2,56
6107	7,55

Tabla 5.15 – Caída de presión de la celosía TRASERA. Los valores en negro corresponden a datos medidos. Los valores en azul corresponden a valores calculados mediante extrapolación de los valores medidos. El anexo 8 detalla la metodología utilizada y describe las relaciones matemáticas utilizadas para las regresiones lineales.

¹ Un punto ubicado *aguas abajo* de un objeto, se refiere a que su posición relativa al objeto es hacia el lado que indica la dirección del flujo.

No se pudieron obtener valores para la celosía de entrada de aire, debido a que su pérdida de carga de diseño es baja y la rapidez de flujo generada por el ventilador no fue suficiente para registrar lecturas claras en el manómetro.

Puerta trasera de acceso al motor.

El diseño incorpora el cambio total de la puerta posterior de acceso al motor. Este cambio responde a la necesidad de incluir una celosía para la salida de aire en la puerta trasera del bus y dado el actual sistema de apertura de la puerta, que es hacia arriba, se considera mejor crear una puerta con dos hojas que se abran hacia los lados, de manera que uno de sus paños incluya la celosía.

El segundo objetivo de este cambio lo constituye el aumento de la absorción acústica al interior del compartimiento y el sellado de la puerta respecto a la carrocería. El revestimiento interno de esta puerta (donde no se encuentra la celosía) se hará con lana de fibra de vidrio con densidad igual a 80 Kg/m^3 . Si bien, el área cubierta es bastante menor respecto del área interna total, esto ayuda en parte a disminuir el nivel de ruido en el compartimiento del motor. En lo que respecta a los sellos, la puerta original del fabricante tiene una buena aislación del ruido, pero posee bastantes fisuras que hacen disminuir su rendimiento acústico. De ahí que radica la necesidad de incluir sellos en el diseño de la nueva puerta a instalar.

La estructura de sus paños consta de perfiles tipo U de 3mm, soldados a una placa metálica de 3mm de espesor, los cuales se montan en un marco construido con perfiles tipo Z (figura 5.29). En su interior se encuentra lana de fibra de vidrio cubierta con una malla de metal desplegado. Para sellar el espacio entre la puerta y el marco se han incluido burletes de goma caucho. Para sellar los espacios entre ambas hojas de la puerta y entre el marco de la puerta y la carrocería se ha usado pletinas de 2mm de espesor.

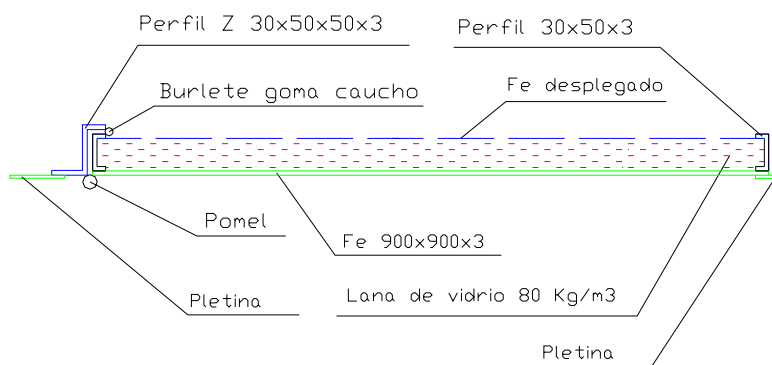


Fig. 5.29 – Diseño de puerta de acceso al motor. Vista superior para un paño. (Fuente: Elaboración propia).

Una vista más general de la puerta se muestra en la figura 5.30 donde se incluye la celosía montada en una de las hojas y demás elementos, incluyendo manilla y chapa.

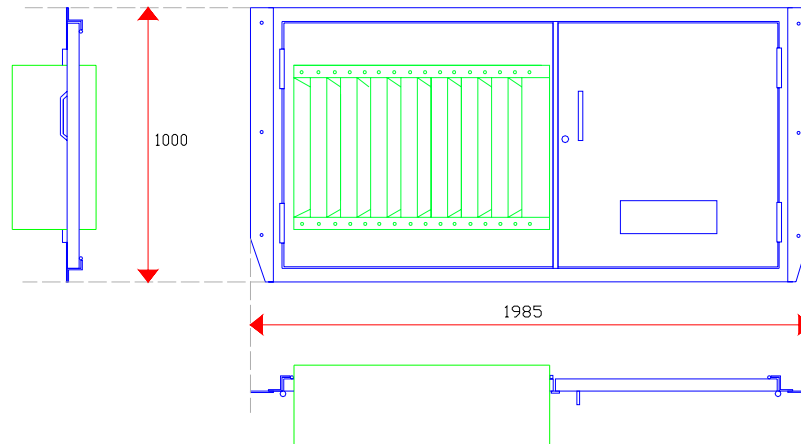


Fig. 5.30 – *Diseño de puerta de acceso al motor. Vistas frontal, lateral y superior para ambos paños. (Fuente: Elaboración propia).*

Los cálculos para obtener la pérdida por transmisión (TL) de la placa de 3mm, mediante el modelo combinado de Sharp y Davy [11], entregaron una reducción de 12dBA. El valor de atenuación de la puerta deberá, entonces, situarse en un rango cercano a este valor, debido a que depende también de la influencia de la celosía acústica de salida y de la lana de fibra de vidrio en su interior.

Elementos adicionales.

Algunos elementos de importancia que no fueron mencionados en los títulos anteriores, son:

- soportes antivibratorios, para el silenciador de escape,
- electro-ventilador, para la extracción de aire al interior del compartimento de motor.

Los soportes antivibratorios vienen instalados de fábrica para aislar la vibración transmitida desde el silenciador hacia la carrocería. Sin embargo, las observaciones detectaron que estos elementos se encontraban en mal estado, por lo que es conveniente reemplazarlos por los soportes originales del fabricante. Un esquema del soporte es mostrado en la figura 5.31.

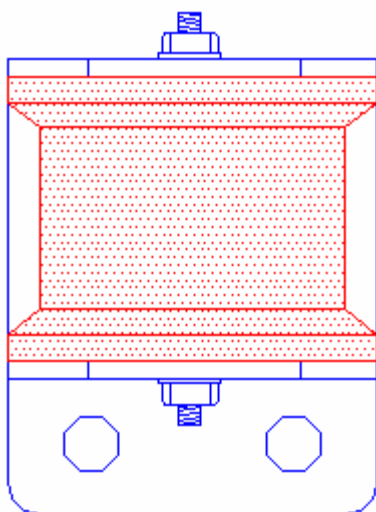


Fig. 5.31 – *Esquema del soporte antivibratorio con su estructura de montaje y fotografía del estado deteriorado del soporte original del fabricante. (Fuente: Elaboración propia).*

El electro-ventilador usado para la extracción de aire al interior del compartimiento, tiene las siguientes características:

- Diámetro de la hélice: 0,32m
- Número de aspas: 7.
- Voltaje de alimentación: 24Volts DC.

Como se especificó anteriormente, se ubicará en una de las placas inferiores del encierro parcial y será alimentado desde el tablero eléctrico en la parte delantera del bus. Para esto, es necesario conectar el electro-ventilador y el tablero mediante cables que recorren el bus a lo largo. El ventilador será activado en el tablero mediante el uso de un interruptor instalado para estos fines.

Fabricación y montaje del sistema de control de ruido.

Esta etapa se llevó a cabo durante los meses de julio y noviembre de 2002. Su coordinación comprende desde la selección de los proveedores para los servicios de fabricación y montaje, hasta la planificación para efectuar dichos trabajos, incorporando a todas las partes involucradas en el proceso.

La tabla 5.16 presenta los nombres de las partes subcontratadas y una descripción del servicio realizado, en orden cronológico.

Nombre o Razón Social	Descripción del servicio
Nicodemus Cerda.	Fabricación de celosías lateral y trasera para sistema de enfriamiento.
Juan Esteban Riquelme.	Fabricación de estructura de soporte para silenciador de escape de gases.
Ingeniería en Control Acústico Ltda.	Fabricación y montaje de estructura de puertas traseras.
Roberto Rodríguez.	Fabricación e instalación de estructura de soporte y bandeja extraíble para baterías.
Ingeniería en Control Acústico Ltda.	Fabricación y montaje de elementos para el semicierro del piso en el compartimiento de motor y otros elementos restantes.

Tabla. 5.16 – Partes subcontratadas para la etapa de fabricación y montaje del sistema de control de ruido.

A continuación se detalla cada una de las etapas de la fabricación y montaje del sistema de control de ruido.

- El silenciador de escape en uso se cambió en junio de 2002 por uno nuevo de iguales características, adquirido en Kaufmann S.A. Este trabajo fue realizado por los alumnos tesistas.
- Las celosías y la estructura de soporte para el silenciador de escape de gases se fabricaron en julio. La estructura de puertas traseras se fabricó en las dependencias de Control Acústico Ltda., durante la última semana de octubre. Su instalación se efectuó la noche del 29 y la madrugada del 30 de octubre en el terminal de buses Línea 128 de Renca
- La fabricación e instalación de la estructura de soporte y bandeja extraíble para las baterías se realizó en un taller mecánico de la comuna Renca, el día jueves 14 de noviembre. La modificación del tendido de cables de batería se realizó durante ese mismo día.
- La fabricación y montaje de los elementos restantes del sistema de control de ruido fue realizada por Ingeniería en Control Acústico Ltda., el 21 de noviembre, en las dependencias de la Maestranza Mussre Ltda. Se seleccionó este lugar, ya que sus instalaciones incluyen *pozos* para camiones y terminales eléctricos de alto amperaje, elementos indispensables para realizar el montaje.

Finalmente, se muestran imágenes del resultado de la instalación efectuada.



a)



b)



c)



d)

Fig. 5.40 – a) Vista costado izquierdo. b) Vista parte trasera. c) Detalle silenciador de escape sobre el techo. d) Vista costado derecho.

Verificación de la efectividad acústica del sistema instalado.

Para saber de que forma afecta el sistema implementado en las emisiones de ruido del bus, es necesario efectuar el mismo procedimiento de medición que se realizó en la etapa de diagnóstico acústico, a fin de determinar el nivel de reducción que este sistema otorga y sus niveles espectrales asociados.

Las mediciones según norma se realizaron con y sin el extractor en funcionamiento, siguiendo los procedimientos descritos en la etapa del diagnóstico acústico, previo al montaje del sistema de control. Los resultados se muestran en la tabla 5.21.

Resultados evaluación para norma de buses – dBA		
Ensayo estacionario	CON extractor	SIN extractor
Nivel de Emisión de Ruido de Escape	89,9	89,8
Nivel de Emisión de Ruido de Motor	93,1	91,5
Nivel de Emisión de Ruido Interior Estacionario	87.9	87.2
Ensayo dinámico		
Nivel de Emisión de Ruido Exterior	83,1	82,9
Nivel de Emisión de Ruido Interior Dinámico	85,9	85,8

Tabla 5.21 – Resultados de la evaluación diagnóstico según la norma de buses. (*Fuente: Elaboración propia*).

Verificación de las variables mecánicas del bus.

Una vez finalizada la verificación de la efectividad acústica del sistema de control de ruido, la cual se efectuó inmediatamente después del término de la etapa de montaje, el bus retomó su régimen normal de funcionamiento. Durante la mañana del primer día de funcionamiento en recorrido, el indicador de temperatura del agua de refrigeración, ubicado en el tablero de control, comenzó a mostrar un nivel considerablemente mayor a los 83°C nominales. Su lectura registró máximos de 95°C, manteniéndose siempre por sobre los 90°C. Debido a esto, se removieron, en el transcurso del mismo día, las placas del piso del compartimiento de motor y la puerta lateral de acceso al radiador, para restaurar en cierta medida la condición original de funcionamiento y, por ende, tratar de disminuir la temperatura en torno al nivel nominal. A partir de esto y en condiciones críticas de funcionamiento (con temperaturas exteriores de 30°C y el motor funcionando a plena carga), la temperatura se ha mantenido en torno a los 85°C con variaciones de +/- 5°C.

En consecuencia, no se realizaron las mediciones requeridas para la verificación de las variables incluidas en el diagnóstico mecánico, debido a los siguientes motivos:

- Las condiciones en las que se midió la verificación de la efectividad acústica del sistema no representa una condición normal de funcionamiento del bus, ni menos crítica, por lo que no permite la realización de las mediciones requeridas.
- Durante el primer día de funcionamiento, se modificó considerablemente el sistema de control de ruido instalado, de manera que las condiciones para realizar las mediciones dejaron de ser representativas.

Finalmente, solo se conservó del sistema de control de ruido instalado, la puerta trasera con la celosía de salida de aire y la celosía de entrada de aire.

Análisis de Costos

Al momento de aprobarse este proyecto FONDEI, se contemplaron gastos en ítems generales, relacionados casi exclusivamente con la fabricación de estructuras y materiales a usar. Estos ítems se desglosaron en lo siguiente:

Materiales para el tratamiento acústico. Tratamiento acústico para el piso del motor incluyendo placas removibles. Control de aberturas existentes con celosías metálicas. Material absorbente de ruido para el compartimiento de motor y tratamiento al interior del bus. Este conjunto de tratamientos, incluyendo la instalación de las estructuras, se estimó que tendría un costo de US\$1.030, es decir \$600.000 en moneda nacional (año 2001).

Movilización. Dinero destinado a los traslados al lugar destinado para la implementación del sistema. Se estimó en \$90.000.

Baterías. Se cubren los gastos para compra de baterías requeridas por los equipos. Se estimó en \$10.000.

A modo de resumen, se tiene que:

Item	Costo
Materiales para el tratamiento acústico	\$ 600.000
Movilización	\$ 90.000
Baterías	\$ 10.000
Total	\$ 700.000

Tabla 7.1 – Detalle montos aprobados. (Fuente: Elaboración propia).

Considerando los valores de la tabla 7.1, el total solicitado al Fondo fue de \$700.000. Este monto se entregará en tres cuotas: 25% al comenzar los trabajos, 25% al presentar el informe de avance, y el 50% restante al finalizar el trabajo y presentar el informe final. Debido a que el sistema de pago establecido entrega la mayor parte de los recursos al final del proyecto, fue necesario acudir a una institución financiera para poder obtener los fondos necesarios que permitan desarrollar el proyecto y cumplir con los objetivos establecidos.

Al comienzo de este proyecto se determinó que los costos para llevar a cabo un trabajo de esta envergadura se extendían más allá de lo propuesto en la tabla 7.1. Para esto, se reestructuró la distribución de los costos en 4 bloques mayores, los que se detallan a continuación:

Estudios preliminares. Corresponde a la adquisición de elementos para las mediciones de diagnóstico acústico y mecánico. En este ítem se incluyen: micrófonos electret, cables y conexiones; estructura de hojalata para la medición de velocidad de flujo; elementos para fabricar un manómetro tipo U; insumos varios para realizar las mediciones.

Sistema de control de ruido. Corresponde a la fabricación, compra e instalación de elementos necesarios para el sistema de control de ruido. En este ítem se incluyen: fabricación del semiencierro del compartimiento del motor, puerta trasera de acceso al motor, instalación completa del sistema de control de ruido y mano de obra adicional; fabricación de celosías acústicas; compra del silenciador Mercedes-Benz original y fabricación de estructuras de soporte para los dos silenciadores; compra de electro-ventilador, cables y elementos adicionales; reubicación de baterías, estructura de soporte, cables y conectores.

Verificación de la eficiencia del diseño. Corresponde a la adquisición de elementos para mediciones acústicas y mecánicas. En este ítem se incluyen: compra de materiales y fabricación de ductos de ensayo para la medición de celosías acústicas; compra de elementos para la medición de los silenciadores Mercedes-Benz y Nelson.

Gastos adicionales. Corresponde a pagos efectuados por la detención completa del bus en días de recorrido, horas extras trabajadas por el chofer del bus y gastos en traslados. Además, incluye la compra de combustible para el bus, indumentaria de trabajo, baterías para los equipos de medición, colaciones, etc.

DISTRIBUCIÓN DE COSTOS	
Ítem	Valor
Estudios preliminares	
Diagnósticos acústico y mecánico.	\$ 70.000
Sistema de control de ruido	
Semiencierro compartimiento de motor y puerta trasera	\$ 400.000
Celosías.	\$ 150.000
Silenciador.	\$ 80.000
Extractor.	\$ 45.000
Reubicación baterías.	\$ 35.000
Verificación de la eficiencia del diseño	
Diagnóstico acústico y mecánico.	---
Mediciones en laboratorio.	\$ 75.000
Gastos adicionales	
Traslados.	\$ 60.000
Petróleo bus en estudio.	\$ 10.000
Detención del Bus.	\$ 50.000
H/H Chofer.	\$ 10.000
Varios.	
Indumentaria de trabajo, colaciones, etc.	\$ 50.000
Total	\$ 1.035.000

Tabla 7.2 – Detalle montos utilizados para las distintas etapas del trabajo. (Fuente: Elaboración propia).

La suma de los costos de cada ítem, presentados en la tabla 7.2, muestra que el valor total del proyecto asciende a \$1.035.000, en donde \$710.000 corresponden al sistema de control de ruido propiamente tal, \$145.000 a mediciones para los estudios preliminares y la verificación de la eficiencia del diseño, y \$180.000 a gastos adicionales.

El monto total sobrepasa en gran medida a los \$700.000 asignados por FONDEI, y tiene su explicación en gastos no contemplados con anterioridad. Estos gastos se originan en el reemplazo de elementos en deficiente estado como el silenciador Mercedes Benz y sus soportes antivibratorios, la compra del electro-ventilador para el sistema de extracción de aire, y mediciones acústicas y mecánicas realizadas en laboratorio, además de la necesaria detención del bus para el proceso de instalación del sistema de control de ruido, entre otros.

Si bien, estos gastos produjeron un aumento del costo total, se consiguió que los trabajos realizados se hicieran con precios considerablemente menores a los valores reales de mercado.

De no mediar esto, el valor final del proyecto pudo haberse elevado a más del doble del costo final.

Conclusiones.

En relación a la efectividad acústica del sistema de control de ruido, la primera conclusión, y tal vez la más importante, es que este método de control implementado en el bus en estudio logra el cumplimiento del límite máximo de la norma (a 30 meses de la entrada en vigencia) para la posición de *escape* en buses que actualmente se encuentran en circulación. Esto se debe exclusivamente a la instalación del segundo silenciador de escape, conectado en serie con el original, y no tiene relación con los demás tratamientos, de modo que la implementación de este tratamiento en otros buses de motor trasero lograría el mismo efecto, tomando en cuenta además, que las emisiones de ruido en el escape del bus estudiado exceden en 1,1dB las emisiones promedio de los buses en recorrido.

Si se evalúan las diferencias entre los niveles de emisión del bus en todos los puntos de medición para ambos ensayos, con los límites máximos establecidos, se concluye que con la implementación del sistema de control de ruido sólo se logra cumplir los límites de *escape* y *motor* del ensayo estacionario. El exceso de 2,1dBA en el nivel de emisión de ruido exterior, respecto del límite establecido, se compensa con el hecho de que las emisiones de ruido del bus en estudio para este punto, exceden en 1,9dBA al promedio de emisiones para buses en recorrido. En consecuencia, y considerando el análisis presentado en el capítulo 6.4 del trabajo de tesis, al menos el 50% de los buses actualmente en recorrido, con el sistema de control de ruido implementado, podrían cumplir con los límites establecidos para todos los puntos exteriores de ambos ensayos.

En resumen, se generan las siguientes conclusiones:

- A partir del diagnóstico acústico, se establece que las emisiones de ruido del bus en estudio son mayores que los promedios de emisión de buses actualmente en recorrido y nuevos, para los puntos *escape* (ensayo estacionario) y exterior (ensayo dinámico). Esto crea un escenario crítico para la implementación de un método de control de ruido, en términos de la máxima eficiencia requerida.
- A partir de la verificación de la efectividad acústica del diseño según la norma, se establece que:
 - El sistema de control de ruido diseñado e implementado sólo considera tratamientos acústicos para mitigar las emisiones de ruido desde el compartimiento de motor hacia el exterior.
 - Sólo mediante la implementación del tratamiento acústico en el escape de gases del bus, se logra cumplir el límite más exigente de la norma para la emisión de ruido en dicho punto.
 - El bus en estudio con el método de control instalado, cumple con los límites iniciales de la norma (límites máximos + 3dB) en todos los puntos exteriores para ambos ensayos.
 - Un bus nuevo de motor trasero con el método de control instalado, cumple con los límites máximos de la norma en todos los puntos exteriores para ambos ensayos.
 - Es factible incorporar tratamientos adicionales al diseño del sistema de control de ruido, de modo que se logre cumplir los límites máximos de la norma en los puntos *interior* para ambos ensayos.

- Las emisiones de ruido provenientes de la salida del escape de gases del bus no influyen mayormente en las emisiones de ruido provenientes del motor, y son estas últimas las que tienen relación con el nivel exterior registrado en el ensayo dinámico. Por lo tanto, un tratamiento a la salida del escape de gases sólo tiene el beneficio de lograr el cumplimiento de la norma en dicho punto.
- El funcionamiento del electro-ventilador registró un aumento máximo de 1,6dBA, medidos en el punto más cercano a su ubicación (punto *motor*), por lo que su aplicación no afecta la efectividad del sistema de control de ruido instalado.

A partir del análisis de funcionamiento mecánico del bus con el sistema de control de ruido instalado, se concluye que existe una incompatibilidad del diseño con las variables mecánicas establecidas durante la etapa de diagnóstico. Sin embargo, se han podido determinar las causas del problema, a partir de las cuales se establecen mejoras al diseño. Estos antecedentes están incluidos en el trabajo de tesis en mención.

A partir del análisis de costos de este proyecto se puede concluir que su implementación en un plano comercial elevaría sus costos totales al doble o más del valor final presentado. Por otra parte, los fondos dispuestos para la realización de este trabajo fueron insuficientes, ya que no se pudo financiar una etapa de seguimiento y mejoras al prototipo, lo cual es fundamental en un proyecto de esta envergadura.

Bibliografía.

- [1] MTT. *Reglamento de los servicios nacionales de transporte público 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 Encarrozamento 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.