

## **CONTROL DE RUIDO EN LÍNEAS DE GAS DE ALTA PRESIÓN A TRAVÉS DE RECUBRIMIENTO ACÚSTICO EN UNA PLANTA DE SÍNTESIS DE METANOL EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO**

*VICTORIA H. RASTELLI<sup>2</sup>, VICTOR RASTELLI<sup>1</sup>, NILA MONTBRUN<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica. Caracas, Venezuela.

<sup>2</sup> Gerencia de proyectos de Control de ruido RPRM & ASOCIADOS C.A. Email: rastelli@usb.ve nmontbru@usb.ve, vhrastelli.rprmasociados@gmail.com

Recibido: abril 2014

Recibido en forma final revisado: diciembre 2014

### **RESUMEN**

Uno de los problemas ambientales y ocupacionales derivados de plantas petroquímicas son los elevados niveles de ruido en áreas operativas. El ruido generado por el flujo en las líneas, causado por la alta velocidad y turbulencia puede afectar el desempeño de los trabajadores en estas áreas. Accesorios como válvulas, codos, eyectores y placas orificio generan altos niveles de intensidad sonora. Este tipo de plantas posee regulaciones estrictas de seguridad por problemas de acumulación de gases, altas presiones y temperaturas, disponen de poco espacio para medidas de control de ruido, por esto, la solución para reducir los niveles de ruido, es el recubrimiento acústico de las líneas identificadas, tomando en cuenta las frecuencias críticas y el comportamiento acústico de los materiales disponibles en el mercado. Dependiendo de las frecuencias críticas que presentó cada sección de tubería, se seleccionó el material que coincide sus mayores valores de pérdida de transmisión (TL) con ellas. Un problema común en estas instalaciones es el enmascaramiento acústico, fenómeno evidente cuando varias fuentes de ruido separadas en pequeñas distancias, emiten sonidos cuya intensidad difiere en menos de 10 dB. Esto dificulta la identificación de las fuentes de menor intensidad sonora cercanas a las más ruidosas. Este artículo presenta resultados de estudios realizados a una planta de síntesis de metanol en Venezuela, se evidencia el enmascaramiento acústico y se contrastan los resultados obtenidos en las diferentes etapas del proceso, los cuales se comparan con los niveles estimados teóricamente.

*Palabras clave:* control, ruido, ocupacional, flujo en líneas, recubrimiento acústico.

### **NOISE CONTROL ON HIGH PRESSURE GAS PIPES THROUGH ACOUSTICAL LAGGING IN METHANOL PLANT. PERFORMANCE EVALUATION**

#### **ABSTRACT**

High Noise Levels are one of the environmental and occupational problems arising from petrochemical plants. Noise generated by the gas flow in pipes is caused by the high velocity and turbulence. Accessories such as valves, elbows, ejectors and restrictions can reach noise levels, capable of affecting the performance and health of workers in these areas. Petrochemical plants have strict safety regulations; they operate at high pressure and temperatures and have little space to spare. The solution to control noise levels is covering the surface of pipes according to critical frequencies and availability of materials on place. The choice of lagging material was done according to critical frequencies at each section of the line, to match higher values of acoustic Transmission loss (TL) with critical frequencies. Sound masking was considered, since it is a common phenomenon in these cases where there are several noise sources, some very close to each other, and with noise intensity fluctuation in more than 10 decibels. This makes difficult the perception of a lower noise source when it is close to another source with higher noise intensity. This paper presents results of two studies performed at a methanol synthesis plant in Venezuela, which shows the behavior of acoustic lagging in gas lines at different stages in the areas of compression, synthesis and reformation in the methanol plant. Results are compared with theoretically estimated levels.

*Keywords:* noise, control, occupational, flow in pipes, acoustic coating, noise lagging.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales y ocupacionales derivados del crecimiento en áreas de producción de refinerías y plantas petroquímicas es el aumento de los niveles de ruido en éstas. Los efectos nocivos de la exposición al ruido en la industria y en las comunidades son acumulativos, no reversibles y su estudio ha cobrado gran importancia en el tiempo.

La contaminación sónica es uno de los agentes más dañinos en la salud de los trabajadores industriales. Según los expertos, la existencia de ruido y vibración evidencia mal funcionamiento o baja amortiguación, ya que una fracción de la energía en equipos se disipa de esta forma. Más de 35 millones de trabajadores en Europa están expuestos a excesivos niveles de ruido, sólo en Polonia se contabilizan 5 millones y se estima que 650 mil trabajadores están expuestos a riesgos de pérdida auditiva. Estadísticamente en industrias con más de 10 trabajadores (1999), se ha mostrado que el 15% de los puestos de trabajo tienen problemas de ruido y 20% de los trabajadores están expuestos a niveles dañinos de ruido (Monazzam *et al.*, 2011).

En las industrias, el funcionamiento de compresores, turbinas, y bombas representa una de las principales fuentes de ruido. Por ello es necesario la toma de acciones técnicas o de ingeniería de control de ruido (Golmohammadi *et al.*, 2010). En líneas de gran diámetro, la energía de alta frecuencia puede producir ruido excesivo y vibración, además de fallas en la instrumentación y en la tubería misma, entre otras consecuencias (Price y Smith, 1999). En los procesos industriales existen diversas fuentes de ruido, tales como el generado en las válvulas y accesorios en tuberías de líquido o gas, la alta velocidad del fluido interno es su principal causa. Sin embargo los tres mecanismos básicos para la generación del ruido en las válvulas es la vibración mecánica (fluctuaciones de presión y partes móviles), el ruido hidrodinámico (líquidos circulando a través de la válvula) y el ruido aerodinámico (turbulencia convertida en sonido) Pernía D. (1999).

Actualmente, con la expansión de las áreas de producción en algunas plantas y teniendo presente la regulación nacional vigente, relativa al control de ruido ambiental y ocupacional, muchas empresas han aumentado sus niveles de ruido promedio ambiental y ocupacional y están tomando medidas para reducirlos en las áreas de operación.

La planta de metanol en estudio, contempló una ampliación de más del doble de su capacidad nominal de producción de toneladas métricas de metanol grado AA, a través de

la instalación de una planta de expansión en un terreno de 2,26 hectáreas adyacente a la planta original de metanol existente (Caura, 2006).



*Figura 1. Fotografía de la planta de metanol y su respectivo proyecto de expansión*

Los procesos que realiza la planta de metanol tienen como objetivo reaccionar el gas natural con el vapor de agua y catalizadores para sintetizar el producto. Sus sub - procesos son los siguientes:

- Desulfurización del gas natural: evita la contaminación de catalizadores y mejora la calidad del producto final.
- Reformación del gas natural con vapor: el gas desulfurado y saturado con agua es mezclado con vapor a media presión en condiciones de alta temperatura.
- Compresión del gas reformado: a la presión requerida en compresores centrífugos de tres etapas.
- Síntesis del metanol (gas reformado y comprimido): la mezcla precalentada, es unida al catalizador de cobre – zinc, se obtiene metanol a partir del dióxido de carbono y el hidrógeno.
- Destilación del metanol crudo para remover impurezas: se purifica para producir metanol grado AA en un sistema de columnas estabilizadoras y de refinación.

La generación de ruido que origina problemas de seguridad industrial ocurre generalmente por encima de 500 Hz, pero puede existir también en frecuencias menores a este valor. Las obstrucciones dentro de las líneas, pueden ser causa de la generación de vórtices o flujos turbulentos. Para su control, pueden colocarse dispositivos que ayuden a propiciar un flujo interno de régimen laminar (“flow splitters”), colocar material absorbente acústico, utilizar silenciadores acústicos o incrementar el espesor de la tubería a través de la colocación de recubrimientos acústicos externos (Price y

Smith, 1999).

Los recubrimientos acústicos externos pueden ser de dos tipos: un primer tipo donde se agrega material de absorción acústica directamente sobre la tubería o un segundo tipo, donde se incorpora un material que añade amortiguación al sistema para atenuar las vibraciones mecánicas, el cual luego es recubierto por un material metálico externo. La efectividad del segundo tipo de recubrimiento dependerá de las propiedades del material amortiguador y de la hoja metálica externa. Este recubrimiento acústico es empleado generalmente cuando los niveles de ruido son excesivos y la vibración no es un problema (Price y Smith, 1999). La escogencia del material de recubrimiento es importante, ya que el este debe ser adecuado a las frecuencias en las cuales el ruido es más intenso. Comúnmente las frecuencias bajas requerirán generalmente materiales más gruesos para la capa externa del recubrimiento acústico (Price y Smith, 1999).

Las acciones de control de ruido deben comenzar por determinar la o las frecuencias dominantes de cada fuente de ruido y determinar las características de la absorción interna y del material aislante externo, el cual puede ser de acero u otro metal de densidad adecuada. (Golmohammadi *et al.*, 2010).

Una de las fuentes de ruido industrial más significativas en plantas petroquímicas es la liberación de gas, llamada venteo. Otra fuente es el ruido del flujo dentro de líneas y las descargas de los sistemas de alivio. Los dispositivos que mejor atenúan el ruido de los venteos son los silenciadores de multi cámaras de expansión. (Monazzam *et al.*, 2011). Sin embargo, cuando la operación de la industria, el espacio o el tipo de flujo permitan la instalación de silenciadores, la reducción del ruido en las válvulas o en las tuberías puede realizarse disminuyendo la velocidad del flujo en la estrangulación, disipando la energía acústica a través de materiales absorbentes o aumentando del espesor de pared en la tubería aguas abajo (Pernía D., 1999).

## METODOLOGÍA EMPLEADA

Durante el mes de julio de 2010, fue realizada una medición de ruido de línea base en los equipos que según el personal de planta, representaban las fuentes de ruido críticas. En esta auditoría, se determinó el espectro de ruido crítico que sería tomado como modelo para el cálculo del recubrimiento acústico.

Posteriormente, durante el mes de agosto del mismo año, se realizó un proyecto más extenso de medición y cálculo

de control de ruido, en el cual se realizaron mediciones de ruido adicionales en otras secciones de la planta (Síntesis, Compresión y Reformación). En estas secciones se identificaron otras fuentes de ruido y tramos de tubería que debían ser recubiertas. Durante el segundo estudio, se constató que a pesar de existir otras fuentes de ruido importantes en otras áreas, el espectro crítico siguió siendo el determinado en la línea base.

Una vez seleccionado el material, las especificaciones y las longitudes o tramos de líneas de alto nivel de ruido para el recubrimiento acústico, se calcularon los espectros finales teóricos de los equipos representativos, hasta llegar al criterio acústico determinado para la atenuación. Posteriormente en el año 2011, una vez instalado el recubrimiento acústico recomendado, fue realizado un proyecto de seguimiento en el cual se calculó la eficiencia acústica de las medidas de control de ruido implementadas, se identificaron nuevas fuentes de ruido, previamente enmascaradas por las fuentes de ruido atenuadas y fueron calculadas medidas adicionales de control de ruido en las áreas de síntesis, compresión y reformación.

## RESULTADOS OBTENIDOS

El área que generaba los mayores niveles de ruido en el estudio de línea base, era el eyector J – 1501 y las válvulas de gas adyacentes PV – 1403 y PV – 1211. Los niveles de ruido fueron medidos utilizando un sonómetro integrador Quest con Filtro de Banda Octava. Los resultados de la medición de línea base en estos equipos, se muestran en la tabla 1.

Se aprecia que en estos equipos, las frecuencias críticas para el control de ruido son las altas, entre 1 y 8 kHz. Esto puede observarse en la tabla 1 y en la figura 2.

**Tabla 1.** Lecturas a 2.5 m. Fecha: Julio 14 2010. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2010

Puntos	Punto 1 (Eyector)	Punto 2 (Válvula PV – 1403)	Punto 3 (Válvula PV – 1211)
<b>L<sub>eq</sub> (dBA)</b>	111,2	111,9	104,3
<b>Frecuencias en Hz, lecturas lineales en dB</b>			
63	88,9	88,7	83,7
125	85,4	84,4	81,9
250	80,4	80,0	78,8
500	82,9	83,3	85,2
1000	96,6	95,9	96,0
2000	103,5	104,0	99,5
4000	108,0	108,4	97,5
8000	101,5	102,0	88,4

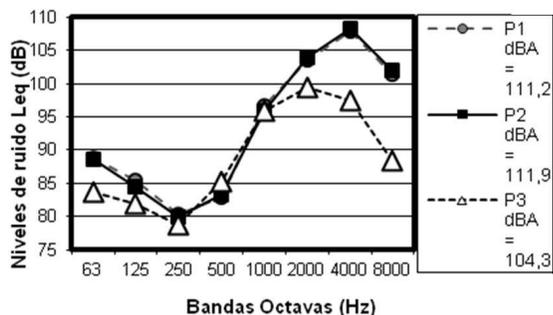


Figura 2. Lecturas de línea base de ruido en Ejector (P1) y válvulas (P2) y (P3)

Para el control de ruido de estas fuentes y principales líneas asociadas, se seleccionó un criterio de reducción de ruido de final de  $L_{eq} = 85$  dBA a un metro de estas válvulas. El nivel de ruido medido a 2,5 m, se transforma a 1 m de distancia, modelando la fuente como una fuente lineal transmitiéndose a través de una tubería (decaimiento lineal del ruido). Esto se modela a través de la ecuación 1:

$$\Delta L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{D}{D_o}\right) \quad (1)$$

Se tomó como punto de partida el espectro crítico de ruido (Válvula PV – 1403) y se aplicó la conversión de ruido por distancia a través de la ec. 1. A partir del espectro crítico de ruido se realizaron los cálculos del recubrimiento acústico de líneas. El espectro crítico de ruido controlar se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Espectro de ruido crítico seleccionado (1 m de distancia). Fecha: Julio 2010. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2010

Punto	Punto 2 (Válvula PV – 1403)
$L_{eq}$ en dBA	115,3
<b>Bandas Octavas (Frecuencias Hz, lecturas en dB)</b>	
63	92,7
125	88,4
250	84,0
500	87,3
1000	99,9
2000	108,0
4000	112,4
8000	106,0

Se trabajó con la curva de pérdidas por transmisión (TL) de paredes simples, las curvas típicas de los materiales muestran tres tipos de zonas, siendo las más importantes la zona gobernada por la ley de masa y la zona de

coincidencia. El objetivo es hacer coincidir las frecuencias críticas del espectro seleccionado con la zona de la ley de masa que ofrezca mayores valores de TL para atenuar estas frecuencias y alejar la zona de coincidencia acústica de las frecuencias críticas. La curva TL del acero de 2,5 mm de espesor, se muestra en la figura 3.

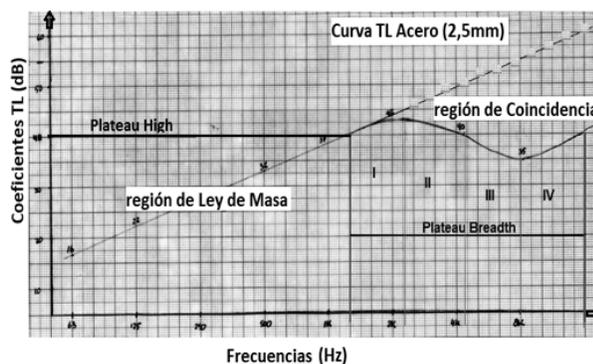


Figura 3. Curva TL típica. Acero 2,5 mm

Entre los materiales que fueron probados acústicamente para recubrir estas líneas, se encontraban el aluminio (calibre 6 y calibre 10), acero Galvanizado (calibres 24, 22 y 20) y acero inoxidable (calibres 18 y 16). Para cada opción se trazó la curva TL del material y se calculó el espectro de ruido final restando por cada banda, el nivel  $L_{eq}^{Original} - TL_{banda}$ . Los resultados de los materiales utilizados, se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Materiales pre seleccionados para el recubrimiento y resultados esperados. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2010

Opción	Material	$L_{eq}$ orig a 1 m	$L_{eq}$ final a 1 m
1	2" de fibra de vidrio con Aluminio Cal. 6 (2,286 PSF)	115,3	90,1
2	2" de fibra de vidrio con Aluminio Cal. 10 (1,438 PSF)		87,1
3	2" de fibra de vidrio con Acero Galv Cal. 24 (1,15 PSF)		79,7
4	2" de fibra de vidrio con Acero Galv Cal. 22 (1,4 PSF)		77,9
5	2" de fibra de vidrio con Acero Galv Cal. 20 (1,66 PSF)		76,7

Para cumplir el criterio de reducción de ruido establecido, fue seleccionado para el recubrimiento de las líneas, el acero galvanizado o inoxidable calibre 24 o calibre 22 y

2 pulgadas (50 mm) de relleno interno con fibra de vidrio o lana mineral de densidad 3,5 Lb/ft<sup>3</sup> (56 Kg/m<sup>3</sup>). Como se observa, el aluminio no es el material idóneo para atenuar el ruido, en este caso particular, ya que su zona de coincidencia (bajos coeficientes de TL), se encuentra en las frecuencias críticas que se desean atenuar (1 kHz a 8 kHz), curiosamente el aluminio cal 6, atenúa aún menos que el aluminio cal 10 (que es más liviano), por la forma de su curva de TL. Es por esto que no siempre el material más pesado, será el mejor en acústica.

Para el caso de los aceros, la forma de la curva TL favoreció la atenuación de las frecuencias críticas y por ello los espectros finales teóricos, evidenciaron grandes atenuaciones de ruido, esto se aprecia en la figura 4.

El aluminio (en cualquier calibre) no se recomienda, pues su región de coincidencia (bajos TL), no favorece a las frecuencias críticas para la atenuación. Teóricamente los espectros de ruido finales esperados con cualquiera de las dos opciones seleccionadas, versus los espectros finales utilizando aluminios, se muestran en la figura 5.

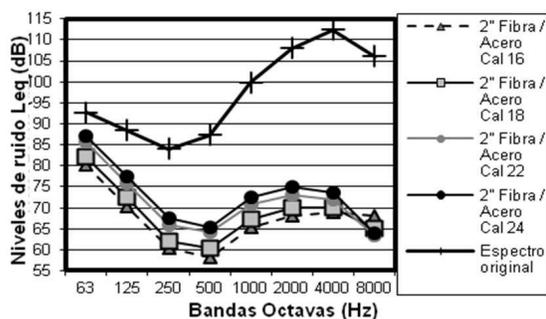


Figura 4. Espectro original y espectros teóricos finales con recubrimientos de acero

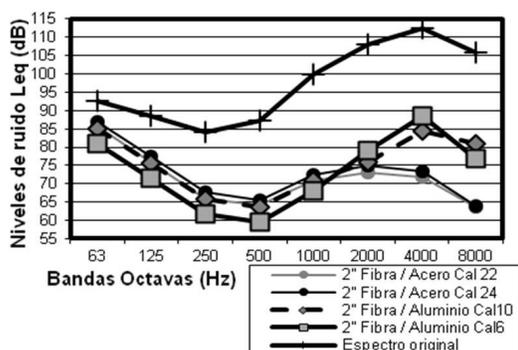


Figura 5. Espectro original y teóricos finales con recubrimientos de acero (Cal 22 y Cal 24) y de Aluminio (Cal 6 y Cal 10)

Lecturas adicionales de niveles de ruido  $L_{eq}$ , fueron realizadas posteriormente al estudio de línea base, para determinar otras fuentes de ruido importantes dentro del área de síntesis y reformación del metanol, obteniéndose en determinados puntos los niveles de ruido de la tabla 4.

Tabla 4. Lecturas de ruido adicionales (2,5 m de la fuente). Fecha: Agosto 19 y 20, 2010. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2010

Equipo medido	$L_{eq}$ en (dBA)
Válvula FV – 1408	112,2
Válvula PV – 1122 - 2	100,3
Mixer MX – 1201 (a 1 m)	103,2
1er nivel reformador (a 1 m)	99,3

Como la lectura de ruido y el espectro crítico siguió siendo el de diseño, se recomendó la instalación del recubrimiento acústico de acero galvanizado o inoxidable con las especificaciones mencionadas anteriormente.

Una vez instalado el recubrimiento de las líneas críticas recomendadas, se realizó en agosto de 2011, un segundo proyecto de control de ruido en nuevas líneas que previamente se encontraban enmascaradas. Dentro de este proyecto, se tomaron lecturas de ruido en los puntos previamente cubiertos por el recubrimiento acústico, obteniéndose los resultados de atenuación de ruido que muestra la tabla 5.

Tabla 5. Lecturas de ruido en equipos y líneas ya cubiertas con lagging acústico (1 m de la fuente). Fecha: Agosto 23, 24 y 25, 2011. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2011.

Punto	$L_{eq}$ 1 (dBA) Ag. 2010	$L_{eq}$ 2 (dBA) Ag. 2011	Atenuación ( $L_{eq}$ 1 - $L_{eq}$ 2)	$L_{eq}$ 2 / $L_{eq}$ 1	% de ruido original
J - 1501	114,0	96,3	17,7	0,017	1,70
PV - 1403	111,9	97	14,9	0,032	3,24
FV - 1408	112,2	98,6	13,6	0,044	4,37
PV - 1122 - 2	100,3	93,6	6,7	0,214	21,38
V - 1651	94,0	89,8	4,2	0,380	38,02
MX - 1201	103,2	92,0	11,2	0,076	7,59
FV - 1211	102,9	89,2	13,7	0,043	4,27
V - 1202	102,2	97,1	5,1	0,309	30,90

Con la incorporación del recubrimiento acústico en las líneas seleccionadas, se evidencia que en el mejor de los casos, el ruido se redujo en 98,3% (17,7 decibeles) y en el caso menos favorable, el ruido se redujo en 61,9% (4,2 decibeles).

La reducción de ruido fue importante, sin embargo no fue en muchos casos de mayor magnitud, ya que en este segundo proyecto, se evidenció que las fuentes mayores que fueron previamente controladas, superaban en más de 10 dB a las nuevas, las cuales se encontraban previamente enmascaradas. Se aprecia en la tabla 5 que las fuentes controladas presentaban en 2011, un nivel de ruido máximo de 98,6 dBA, mientras que anteriormente presentaban un nivel de ruido máximo de 114 dBA (15,4 dB mayor).

En la figura 6, se muestra el espectro crítico original de diseño del primer proyecto, el espectro teórico esperado con la colocación del recubrimiento y el espectro real obtenido, el cual evidencia la aparición de fuentes de ruido secundarias previamente enmascaradas acústicamente.

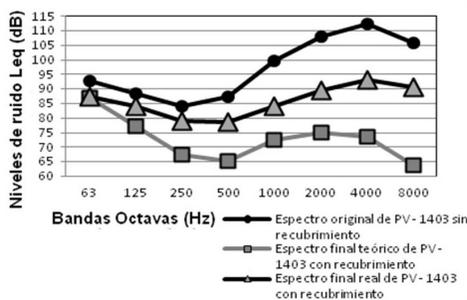


Figura 6. Espectro original, espectro teórico final y espectro final obtenido (Acero Cal 24)

En el segundo proyecto realizado en el año 2011, el objetivo se amplió, incluyendo el control de ruido en cuatro zonas específicas de la planta de expansión, las cuales son las siguientes:

- Zona I: área del eyector J – 1501 y líneas asociadas con la válvula PSV – 1402.
- Zona II: área de alta presión de gas cerca de V – 1202, PV – 1209 y PV – 1122.
- Zona III: línea de gas de la brida del horno reformador hasta el primer nivel de las escaleras.
- Zona IV: líneas y accesorios asociados al área de compresión, compresores K – 1301 y K – 1101.

Se apreció que para estas cuatro zonas seleccionadas, los espectros de ruido característicos cambian en forma y en frecuencias críticas, por ende por zona se seleccionó un espectro crítico para dimensionar el nuevo recubrimiento

acústico de las líneas.

La zona I o zona de síntesis cercana al eyector, presenta frecuencias críticas en el orden de las altas frecuencias (de 1 kHz a 8 kHz), debido al flujo a través de las líneas y una componente en frecuencias bajas (63 Hz) causada por la operación de ventiladores y el ruido generado por la vibración de las propias tuberías.

La Zona II o zona de reformación a alta presión tiene como componentes críticas las frecuencias medias y altas desde 500 Hz hasta 4 kHz (ruido característico de flujo en tuberías) y una componente en baja frecuencia de 63 Hz la cual tiene su explicación en un grupo de bombas recíprocas que funcionaban muy cerca de estas fuentes (cuyas frecuencias típicas son las bajas). La zona III o la tubería del horno reformador presenta frecuencias críticas altas de 1 kHz a 4 kHz, característico del flujo en tuberías, mientras que la zona IV o zona de compresores muestra frecuencias críticas en el rango de frecuencias bajas (63 Hz) característico de la operación de compresores y en el rango de frecuencias altas (de 2 kHz a 8 kHz), propio del flujo en tuberías. Estos resultados se aprecian en las figuras 7, 8, 9 y 10.

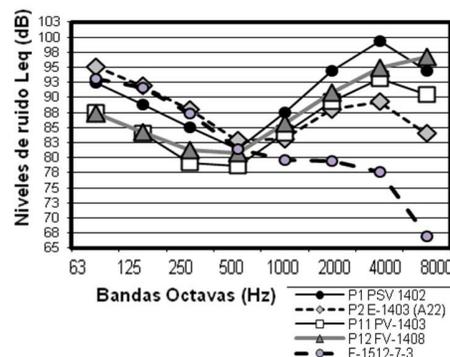


Figura 7. Espectros originales de equipos en la zona I (síntesis)

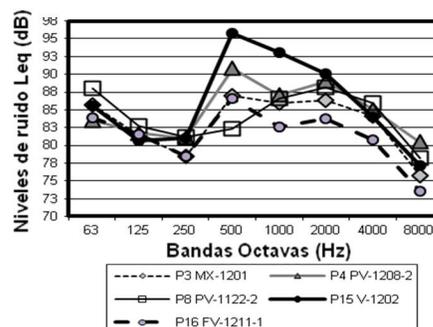


Figura 8. Espectros originales de equipos en la zona II (Reformación, alta presión)

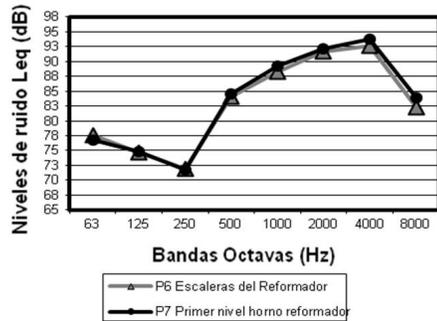


Figura 9. Espectros originales de equipos en la zona III (Horno Reformador)

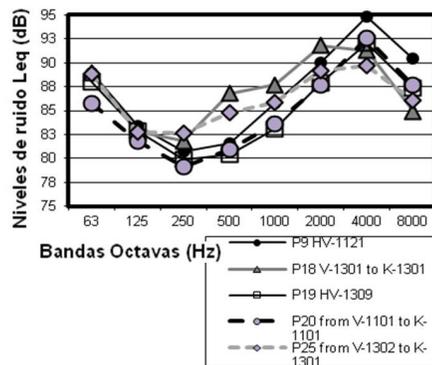


Figura 10. Espectros originales de equipos en la zona IV (Compresión)

Para cada zona, se seleccionó uno o dos espectros críticos de ruido sobre el cual se realizaron los cálculos de recubrimiento acústico, los espectros seleccionados por zona se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Espectros de ruido críticos seleccionados por áreas

Punto	(I) P1 PSV – 1402	(II) P4 PV –1208 –2	(II) P15 V – 1202	(III) P7 1er piso reform.	(IV) P9 HV – 1121	(IV) P18 v –1301 to K –1301
<b>L<sub>eq</sub> en dBA</b>	102,5	96,0	97,1	98,0	98,5	96,4
<b>(Frecuencias en Hz, lecturas lineales en dB)</b>						
63	92,5	83,5	85,6	76,8	88,9	<b>88,9</b>
125	88,8	81,7	80,7	74,9	83,4	82,8
250	85,0	81,0	81,1	71,8	80,7	81,8
500	81,5	90,8	<b>95,8</b>	84,5	81,6	86,8
1000	87,5	<b>87,1</b>	<b>93,0</b>	<b>89,3</b>	85,8	87,7
2000	<b>94,4</b>	<b>89,0</b>	<b>90,1</b>	<b>92,1</b>	<b>90,0</b>	<b>91,8</b>
4000	<b>99,4</b>	<b>85,1</b>	84,0	<b>93,8</b>	<b>94,8</b>	<b>91,3</b>
8000	<b>94,5</b>	80,5	77,1	83,9	<b>90,5</b>	84,9

En esta etapa del proyecto se realizaron cálculos para el recubrimiento acústico con diferentes aceros (calibres 20, 22 y 24) y aluminios (calibres 6 y 10). El interior del recubrimiento, entre la tubería y la hoja externa del lagging, también se recomendó hacer con fibra de vidrio o lana mineral de 2” de espesor.

Los resultados de los cálculos con las diferentes opciones por zona, se muestran a continuación en las tablas 7, 8, 9 y 10.

Tabla 7. Materiales preseleccionados para recubrimiento acústico de tuberías (zona I)

Opción	Material	L <sub>eq</sub> original a 1 m	L <sub>eq</sub> final a 1 m
1	2” de fibra de vidrio con Al. Cal. 6 (2,286 PSF)	102,4	77,2
2	2” de fibra de vidrio con Al. Cal. 10 (1,438 PSF)		74,8
3	2” de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 24 (1,15 PSF)		69,3
4	2” de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 22 (1,4 PSF)		67,7
5	2” de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 20 (1,66 PSF)		66,2

Tabla 8. Materiales preseleccionados para recubrimiento acústico de tuberías (zona II)

Opción	Material	L <sub>eq</sub> original a 1 m	L <sub>eq</sub> final a 1 m
1	2” de fibra de vidrio con Al. Cal. 6 (2,286 PSF)	97,5	68,8
2	2” de fibra de vidrio con Al. Cal. 10 (1,438 PSF)		71,0
3	2” de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 24 (1,15 PSF)		72,4
4	2” de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 22 (1,4 PSF)		71,2
5	2” de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 20 (1,66 PSF)		69,4

**Tabla 9.** Materiales preseleccionados para recubrimiento acústico de tuberías (zona III)

Opción	Material	$L_{eq}$ original a 1 m	$L_{eq}$ final a 1 m
1	2" de fibra de vidrio con Al. Cal. 6 (2,286 PSF)	98,0	71,9
2	2" de fibra de vidrio con Al. Cal. 10 (1,438 PSF)		69,3
3	2" de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 24 (1,15 PSF)		66,1
4	2" de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 22 (1,4 PSF)		64,5
5	2" de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 20 (1,66 PSF)		63,0

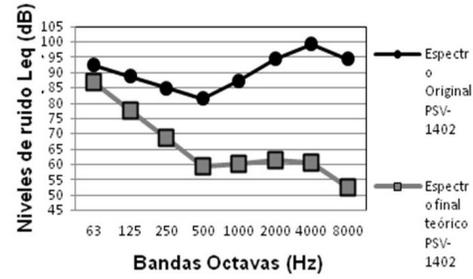
**Tabla 10.** Materiales preseleccionados para recubrimiento acústico de tuberías (zona VI)

Opción	Material	$L_{eq}$ original a 1 m	$L_{eq}$ final a 1 m
1	2" de fibra de vidrio con Al. Cal. 6 (2,286 PSF)	98,1	72,7
2	2" de fibra de vidrio con Al. Cal. 10 (1,438 PSF)		70,5
3	2" de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 24 (1,15 PSF)		65,7
4	2" de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 22 (1,4 PSF)		64,1
5	2" de fibra de vidrio con Ac. Galv Cal. 20 (1,66 PSF)		62,6

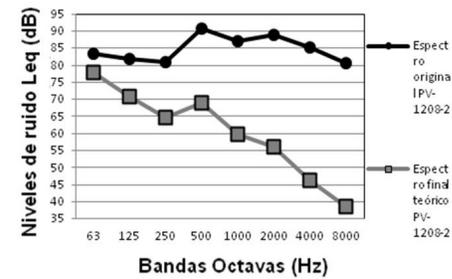
Se recomendaron las siguientes acciones de control de ruido para cada zona:

- Material de absorción interno entre tubería y recubrimiento metálico externo: fibra de vidrio o lana mineral de 2" de espesor mínimo (densidad mínima 3.5 lb/ft<sup>3</sup>).
- Recubrimiento metálico externo de acero galvanizado calibre 24, con peso mínimo 1.156 lb/ft<sup>2</sup>, para las zonas II, III y IV y recubrimiento metálico externo de acero galvanizado calibre 22, con peso mínimo 1.406 lb/ft<sup>2</sup>, para la zona I. Estos recubrimientos no deben tener conexión mecánica con la línea original.

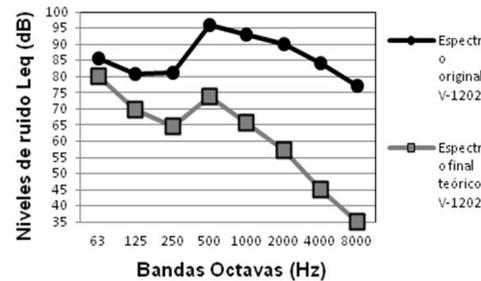
A continuación se muestra en las figuras 11 a 16, para cada espectro crítico seleccionado por área, el espectro de ruido original y el espectro teórico esperado, a través de la colocación del recubrimiento acústico calculado.



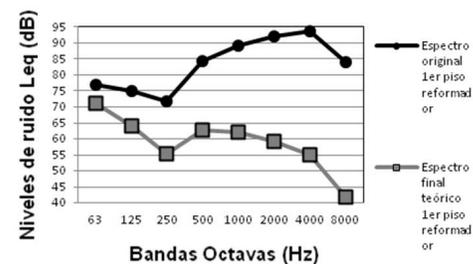
**Figura 11.** Espectro crítico original y final teórico (Zona I)



**Figura 12.** Espectro crítico original y final teórico PV-1208-2 (Zona II)



**Figura 13.** Espectro crítico original y final teórico V-1202 (Zona II)



**Figura 14.** Espectro crítico original y final teórico (Zona III)

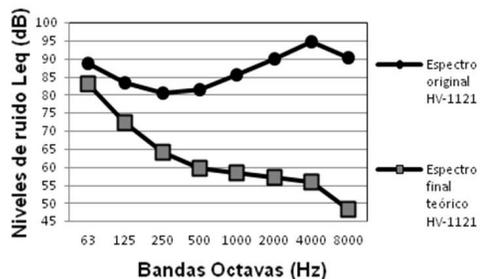


Figura 15. Espectro crítico original y final teórico HV-1121 (Zona IV)

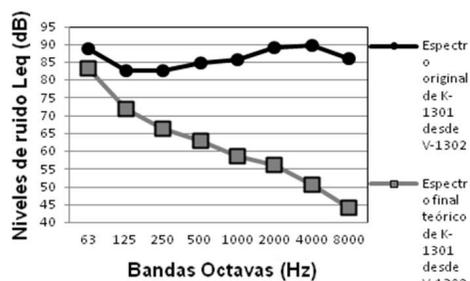


Figura 16. Espectro crítico original y final teórico de V-1302 a K-1301 (Zona IV)

## ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

- El ruido que genera el flujo a través de tuberías es generalmente más intenso a frecuencias altas, por lo cual el recubrimiento acústico o “lagging” es uno de los métodos más eficientes para su control. Durante el estudio de las zonas de ruido más intensas de la planta, las frecuencias críticas de control de ruido fueron 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz.
- Para el control de las tuberías seleccionadas en el primer estudio, el material que ofrecía mejor atenuación vs calibre o peso por unidad de longitud, fue el acero galvanizado calibre 24, con un recubrimiento interno de 2” de fibra de vidrio.
- Para el control del ruido en las tuberías, los aceros proporcionaban mejores atenuaciones en las frecuencias críticas de los espectros originales, no sucediendo esto con los aluminios, los cuales a pesar de tener mayor calibre, ofrecían menores niveles teóricos finales.
- Una vez instalado el recubrimiento acústico en las tuberías seleccionadas en el primer estudio, se lograron importantes reducciones de ruido, hasta de 98,3% (17,7 decibeles) y en el caso menos favorable, reducciones de 61,9% (4,2 decibeles). Estos resultados evidencian la eficiencia del método de control de ruido utilizado.
- Se evidenció el fenómeno de enmascaramiento acústico, al tener múltiples fuentes de ruido cercanas,

con niveles de ruido cuyas intensidades variaban en más de 10 decibeles. Por ello las reducciones de ruido reales del primer estudio, a pesar de ser importantes, fueron menores en magnitud que las estimadas teóricamente.

- Al realizar el segundo estudio de control de ruido, se separó la planta en cuatro secciones diferentes, evidenciándose que el ruido originado por el flujo en tuberías, presentaba frecuencias críticas altas (de 1 kHz a 8 kHz), y las componentes de ruido en bajas frecuencias eran generadas por la operación de ventiladores, bombas recíprocas, compresores o vibración en tuberías (63 Hz).
- Sin tomar en cuenta el fenómeno de enmascaramiento acústico, se estiman teóricamente reducciones adicionales de ruido de 34,7 dBA en la Zona I, 25,1 dBA en la Zona II, 31,9 dBA en la Zona III y 32,4 dBA en la Zona IV.
- La percepción de los trabajadores en las áreas intervenidas, ha sido muy satisfactoria, especialmente en el área del eyector y las válvulas de gas. Para el estudio de diagnóstico ocupacional realizado en diciembre de 2012, se prevé replicar este proyecto en la planta I, que no había sido intervenida para control de ruido.

## REFERENCIAS

- CAURA (2006). Resumen Ejecutivo del Estudio de Impacto Ambiental y Sociocultural Proyecto de Expansión Planta Metanol de Oriente, Complejo Industrial Petroquímico y petrolero General José Antonio Anzoátegui. Ingeniería Caura, Página web: <http://www.pequiven.com/pequiven/pdf/proyecto.pdf>.
- GOLMOHAMMADI, R., MONAZZAM, M., NOUROLLAHI, M., NEZAFAT, A., MO-MEN BELLAH FARD, S. Evaluation of Noise Propagation Characteristics of Compressors in Tehran Oil Refinery Center and Presenting Control Methods. Journal of Research in Health Sciences, North America, 10, Jun. 2010. Disponible en: <http://jrhs.umsha.ac.ir/index.php/JRHS/article/view/233>. Fecha de consulta: 29 Enero. 2014.
- MONAZZAM, M., GOLMOHAMMADI, R., NOUROLLAHI, M., MOMEN BELLAH FARD, S. Assessment and Control Design for Steam Vent Noise in an Oil Refinery. Journal of Research in Health Sciences, North America, 11, Jun. 2011. Disponible en: <http://jrhs.umsha.ac.ir/index.php/JRHS/article/view/209>. Fecha de consulta: 29 Enero. 2014.

PERNÍA D. (1999). Análisis de Ruido en Válvulas de Control Industrial. Universidad de Los Andes, Consejo de Estudios de Post-grado, Postgrado en Automatización e instrumentación, facultad de ingeniería.

PRICE S. M., SMITH D. R., (1999). Sources & Remedies of High Frequency Piping Vibration & Noise, 28th Turbomachinery Symposium, The Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, Houston, TX, September 1999.

RASTELLI V., RASTELI MONTBRUN V. H. (2010). Informe final: Noise control concept engineering for ejector

and gas valves in Metanol Expansion Plant, Jose Petrochemical Complex, Anzoátegui, Venezuela. Elaborado para Mitsubishi Heavy Industries, RPRM & ASOCIADOS C.A, Página web: [www.rprmasociados.com](http://www.rprmasociados.com).

RASTELLI V., RASTELI MONTBRUN V. H. (2011). Informe final: Noise control concept engineering for gas lines Metanol Expansion Plant, Jose Petrochemical Complex, Anzoátegui, Venezuela. Elaborado para Mitsubishi Heavy Industries, RPRM & ASOCIADOS C.A, Página web: [www.rprmasociados.com](http://www.rprmasociados.com).