

EVALUACIÓN OBJETIVA DEL ESPECTRO DEL RUIDO DE FONDO EN AULAS UNIVERSITARIAS

Hugo C. Longoni^a, Sebastián P. Ferreyra^a, Gabriel A. Cravero^a, Mario D. Flores^a, Oscar A. Ramos^{a,b} y Fabian C. Tommasini^a

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada al CONICET Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López esq. Av. Cruz Roja Argentina. CP 5016ZAA, Córdoba, Rep. Argentina, e-mail: hugolongoni@hotmail.com, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra/>*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, CP: C1033AAJ, CABA, Rep. Argentina, <http://www.conicet.gob.ar>*

Palabras Clave: ruido de fondo, perfiles NC y RC, contaminación sonora, acústica de recintos.

Resumen. Un importante factor a considerar en el estudio del proceso enseñanza-aprendizaje basado en la comunicación oral es el campo sonoro. Elevados valores de nivel de ruido de fondo o tiempo de reverberación en un aula interfieren la comunicación oral generando así una barrera acústica al proceso de aprendizaje. En nuestro país, por lo general, las aulas y pequeños auditorios destinados a dicho proceso han sido construidos sin considerar criterios acústicos. Por otro lado, la norma IRAM 4070 recomienda valores límites del espectro del ruido de fondo para un recinto según la actividad que en él se desarrolle y establece métodos de evaluación mediante un único valor numérico que permite calificar a los ruidos de fondo como aceptables. Del mismo modo, la norma NBR 10152 establece los niveles de ruido compatibles con el confort acústico en diversos ambientes. En este trabajo, se presentan los resultados de la evaluación objetiva del espectro del ruido de fondo medido en aulas de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina, siguiendo los criterios de las normas mencionadas.

1. INTRODUCCION

Un importante factor a considerar en el estudio del proceso enseñanza-aprendizaje, basado en la comunicación oral, es el campo sonoro. Elevados valores de nivel de ruido de fondo o tiempo de reverberación en un aula interfieren la comunicación oral, generando así una barrera acústica al proceso de aprendizaje. En nuestro país, por lo general, las aulas y pequeños auditorios, destinados a dicho proceso, han sido construidos sin considerar criterios acústicos (Ercoli et al., 1998).

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de Investigación y Desarrollo PID UTN Nro 1658: Estudio de características principales de campos sonoros en aulas y auditorios (2012-2014). El objetivo general de este proyecto es estudiar y evaluar las características acústicas del campo sonoro de aulas y pequeños auditorios utilizados en el nivel universitario, mediante métodos objetivos y subjetivos. Dichos recintos pertenecen a la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional (FRC UTN).

En el marco del proyecto mencionado, Cravero et al. (2013) encontraron que las aulas evaluadas de la FRC UTN presentan elevados valores de tiempo de reverberación (T_{60}), lo cual evidencia la falta de un criterio acústico durante la etapa de diseño. En algunos casos el T_{60} medido toma valores elevados, llegando a triplicar lo recomendado por normas específicas. Esto último resulta en un campo sonoro inapropiado para el proceso de enseñanza-aprendizaje. Otro análisis, realizado en el marco del mismo proyecto por Ferreyra et al. (2013), reveló la presencia de significativas coloraciones espectrales en el rango de baja frecuencia (por debajo de 500 Hz), debido a la existencia de ondas estacionarias o modos propios de vibración.

Muszkat et al. (2011) realizaron la medición y evaluación de niveles de ruido de fondo en una sala universitaria de clases provista de 16 computadoras, utilizando el criterio RC para la evaluación, evidenciando que el ruido evaluado no cumple con las recomendaciones del criterio RC para la actividad desarrollada en el recinto.

Actualmente, en la República Argentina, la Norma IRAM 4070 establece métodos de evaluación del espectro de ruido mediante un único valor numérico, por su contraste con una de las familias de curvas denominadas perfiles NC y RC, permitiendo calificar a los ruidos de fondo como aceptables. También recomienda valores límites del espectro del ruido de fondo para un recinto según la actividad que en él se desarrolle. Por otra parte, la Norma NBR 10152 (Brasil) establece los niveles de ruido compatibles con el confort acústico en diversos ambientes.

Las frecuencias más importantes para la comprensión de la palabra hablada están en el rango que va desde 100 Hz hasta los 5000 Hz (Raphael et al., 2007). La máxima contribución al nivel de la voz se sitúa en la zona de frecuencias medias, entre las bandas de octava de 250 Hz y 1000 Hz. En cambio, la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra está situada entre las bandas de octava de 1000 Hz y 4000 Hz (Isbert, 1998).

En este trabajo, se presentan los resultados de la evaluación objetiva del espectro del ruido de fondo medido en 7 aulas de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina, siguiendo los criterios de la norma IRAM 4070. También se compara los valores NC asignados a las aulas con lo recomendado por la norma NBR 10152.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la muestra de aulas estudiada; en la sección 3 se presentan los perfiles de ruido de fondo recomendados por las normas IRAM 4070 y NBR 10152; en la sección 4 se presentan las mediciones realizadas en forma tabular y en forma gráfica; en la sección 5 se presenta el resultado de la evaluación del espectro de ruido de fondo medido en las aulas bajo estudio, conforme a lo recomendado por las normas mencionadas; por último, en la sección 6 se presentan las conclusiones.



Figura 1: Aula FRC-1.



Figura 2: Aula FRC-3.

2. AULAS

El criterio de selección de las aulas consideró características acústicas arquitectónicas y el entorno próximo. Se seleccionó una muestra de 7 aulas representativa respecto a dimensiones y características constructivas, sobre un total de 78. Las mismas se encuentran distribuidas en 4 edificios de la FRC, UTN.

2.1. Aula 11

De base rectangular y volumen de $93,45 \text{ m}^3$, ubicada en el edificio Malvinas, planta baja, posee muros longitudinales de $7,00 \text{ m}$, transversales de $4,45 \text{ m}$ y la altura es de $3,00 \text{ m}$. Las paredes están construidas con ladrillo macizo de barro cocido de $0,30 \text{ m}$ de espesor, con revoque cementicio de 2 cm de espesor. Posee una puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo, está construido con losa de hormigón, cubierto con un cielorraso de placas de yeso de 9 mm de espesor.

2.2. Aula 154

De base rectangular con un volumen de $143,32 \text{ m}^3$, ubicada en el primer piso del edificio Central, posee muros longitudinales de $7,00 \text{ m}$, transversales de $7,00 \text{ m}$ y una altura media de $2,90 \text{ m}$. Las paredes están construidas con ladrillo hueco revocado pintado con látex, puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo, presenta losa de hormigón armado revocado. Posee además un cielorraso de paneles rígidos de lana de vidrio de 20 mm de espesor, a una distancia de 1 m respecto de la losa.

2.3. Aula 225

De base rectangular y con un volumen de $240,45 \text{ m}^3$, ubicada en el segundo piso del Edificio Central, posee muros longitudinales de $11,45 \text{ m}$, transversales de $7,00 \text{ m}$ y una altura de $3,00 \text{ m}$. Las paredes están construidas con ladrillo hueco revocado y terminado con pintura látex. Posee una puerta placa de madera tipo doble hoja y ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo es de chapa de acero galvanizada y posee un cielorraso de placa rígida de lana de vidrio de 20 mm de espesor, a una distancia de 1 m respecto de la chapa.



Figura 3: Aula FRC-6.



Figura 4: Aula FRC-6.



Figura 5: Aula FRC-6.



Figura 6: Aula FRC-6.

2.4. Aula 405

De base rectangular, tipo monoambiente y $561,02 \text{ m}^3$ de volumen, ubicada en la planta baja del Edificio Inchaurreondo, posee muros longitudinales de 16,06 m y transversales de 11,35 m de longitud, altura de 3,11 m. Está construido con: ladrillo block de hormigón revocado y con pintura látex; ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor y cortina de un paño con forma de nido. El techo, está construido con losa de hormigón y ladrillo. El mismo presenta un cielorraso de placa yeso de 12,5 mm de espesor.

2.5. Aula 608

De base rectangular y con un volumen de $175,73 \text{ m}^3$, localizada en la planta baja del edificio Ingeniero Soro, presenta muros longitudinales de 8,30 m, transversales de 5,94 m y una altura media de 3,64 m. Las paredes están construidas con diversos materiales, siendo una de las transversales de hormigón y el resto de tabique doble de placa roca yeso (12,5 mm espesor c/u rellena con fieltro liviano de lana de vidrio 50 mm de espesor). Presenta ventanas con aberturas de carpintería de aluminio y paños de vidrio de 4 mm de espesor. El techo, está construido con vigas de hormigón premoldeado.



Figura 7: Aula FRC-7.

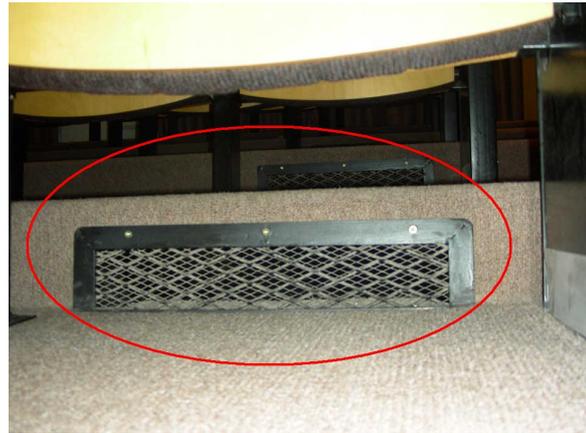


Figura 8: Aula FRC-7.



Figura 9: Aula FRC-7.



Figura 10: Aula FRC-7.

2.6. Aula Magna

De base rectangular, tipo monoambiente y $712,70 \text{ m}^3$ de volumen, ubicada en el primer piso del Edificio Central, posee muros longitudinales de $17,44 \text{ m}$ y transversales de $10,67 \text{ m}$ de longitud, altura media de $3,83 \text{ m}$. Está construido con: ladrillo hueco revocado pintado con látex, puertas placa de carpintería metálica con vidrio, ventanas con carpintería de aluminio y placas de yeso. Posee además un cortinado de simple hoja, doble plegamiento. El techo, está construido con vigas de hormigón revocado y el piso esta cubierto con un bajo alfombra de espuma de poliuretano de 10 mm y sobre éste una alfombra de 4 mm del tipo buclé.

2.7. SUM

De base rectangular, tipo monoambiente y $211,88 \text{ m}^3$ de volumen, ubicada en el primer piso del Edificio Central, posee muros longitudinales de $10,63 \text{ m}$ y transversales de $6,97 \text{ m}$ de longitud, altura de $2,91 \text{ m}$. Está construido con: tabique doble Durlock con cámara interior de 70 mm , con placa de madera MDF enchapado de 19 mm de espesor; ventanas de carpintería de aluminio con paños de vidrio de 4 mm de espesor, y cortina doble de tela sintética. El techo, está construido con losa de hormigón y ladrillo. El mismo presenta un cielorraso de placa Durlock modelo Xsound de $12,5 \text{ mm}$ de espesor, con perforación cuadrada.

2.8. Sistemas de Ventilación y Aire Acondicionado

| Código | Aula | Ventilación Forzada | Aire Acondicionado | Detalle |
|--------|-------|---------------------|--------------------|--|
| FRC-1 | 11 | NO | SI | Aire acondicionado Split GE, Residencial, 1000w frío, 2000w calor. |
| FRC-2 | 154 | SI | SI | 4 Ventiladores de techo de 3 aspas, y un aire acondicionado idem aula FRC-1. |
| FRC-3 | 225 | SI | NO | 4 Ventiladores de techo de 3 aspas. 2 aberturas calefacción central. |
| FRC-4 | 405 | NO | SI | 2 Aire acondicionado Split Carrier, Light Comercial, Frío/Calor, Trifásico, Compresor 10A/67A, Ventilador 1/4HP. |
| FRC-5 | 608 | SI | NO | 4 Ventiladores de techo de 3 aspas. |
| FRC-6 | Magna | NO | SI | 2 Aire acondicionado idem aula FRC-4. |
| FRC-7 | SUM | NO | SI | Sistema de aire acondicionado para conductos. |

Tabla 1: Detalle de sistemas de ventilación y aire acondicionado.

En la Tabla 1 se presenta una descripción detallada de los sistemas de ventilación y aire acondicionado con los que cuentan las aulas bajo estudio.

En la Figura 1 se presenta una imagen de la unidad interior del sistema de aire acondicionado instalado en el aula FRC-1. El aula FRC-2 cuenta con un equipo de similares características.

En la Figura 2 se presenta una imagen donde se puede apreciar 3 de los 4 ventiladores de techo instalados en el aula FRC-3. El aula FRC-5 cuenta con 4 ventiladores de techo de similares características.

En las Figuras 3 a 5 se muestran en detalle las unidades interiores de los dos equipos de aire acondicionado instalados en el aula FRC-6. En la Figura 6 se muestran las unidades exteriores correspondientes. El aula FRC-4 se encuentra equipada con dos equipos idénticos a los del aula FRC-6.

En las Figuras 7 y 8 se muestra la unidad interior del equipo de aire acondicionado para conductos instalado en el aula FRC-7. En la Figura 9 se muestra la unidad exterior del mismo. La unidad interior se encuentra instalada debajo del último de los siete escalones que se pueden apreciar del lado izquierdo de la Figura 10. Los escalones del aula FRC-7 están compuestos de (de arriba hacia abajo): alfombra tipo bucle de 6 mm, ISOLAN de 10 mm, dos placas de fenólico de 25,4 mm cada una y panel rígido de lana de vidrio de 50 mm ACUSTIVER P.

3. PERFILES DE RUIDO DE FONDO RECOMENDADOS

En la Tabla 2 se muestran los valores límites de perfiles NC y RC, recomendados según norma IRAM 4070 y norma NBR 10152.

La norma IRAM 4070 da métodos de evaluación del espectro de ruido mediante un único valor numérico, por su contraste con los perfiles NC y RC. En la Tabla 2, los valores NC y

| NORMA | Criterio NC recomendado | Criterio RC recomendado |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| IRAM 4070 | 25 - 30 | 25 - 30 (N) |
| NBR 10152 | 35 - 45 | No especifica. |

Tabla 2: Valores límites de ruido aceptables en ambientes desocupados.

| Código | Nivel de presión sonora por banda de octava [dB] | | | | | | | | Leq [dB] | Leq [dBA] |
|--------|--|------|------|------|------|------|------|------|----------|-----------|
| | Frecuencias centrales de octava [Hz] | | | | | | | | | |
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| FRC-1 | 55,9 | 44,9 | 38,6 | 33,8 | 31,2 | 29,9 | 26,4 | 15,7 | 65,2 | 38,8 |
| FRC-2 | 47,5 | 44,3 | 43,3 | 40,7 | 32,6 | 28,9 | 24,1 | 15,6 | 60,7 | 42,4 |
| FRC-3 | 59,5 | 56,6 | 49,6 | 41,5 | 38,3 | 34,5 | 26,9 | 20,8 | 71,0 | 48,8 |
| FRC-4 | 61,6 | 57,2 | 48,7 | 44,5 | 42,1 | 39,3 | 31,2 | 19,4 | 71,5 | 47,7 |
| FRC-5 | 48,5 | 45,1 | 40,3 | 33,5 | 30,6 | 28,1 | 21,4 | 16,5 | 63,2 | 40,6 |
| FRC-6 | 46,8 | 43,5 | 36,6 | 35,4 | 28,8 | 26,5 | 21,9 | 16,3 | 61,8 | 36,9 |
| FRC-7 | 52,3 | 45,8 | 36,6 | 30,3 | 24,9 | 23,6 | 16,9 | 13,5 | 66,4 | 40,8 |

Tabla 3: Espectro de ruido de fondo medido con sistemas de ventilación y aire acondicionado apagados.

RC según norma IRAM 4070 corresponden a lo que la misma recomienda como aceptable para aulas y salas de lectura.

La norma NBR 10152 establece los niveles de ruido compatibles con el confort acústico en ambientes diversos. En la Tabla 2, los valores NC según norma NBR 10152 corresponden a lo que la misma recomienda para aulas y laboratorios en el entorno escolar. El valor inferior del rango representa el nivel sonoro máximo para cumplir la condición de confort acústico. El valor superior del rango representa el nivel sonoro máximo que se considera aceptable.

4. MEDICIONES

4.1. Criterios de medición

Se midieron 3 puntos en cada aula con los sistemas de ventilación y aire acondicionado apagados. Luego se midió, en los mismos puntos, con los sistemas de ventilación y aire acondicionado encendidos.

Los factores considerados para la elección de los puntos fueron la ubicación de los alumnos y profesor al momento del dictado de clases y la distribución de manera de representar la mayor

| Código | Nivel de presión sonora por banda de octava [dB] | | | | | | | | | Leq [dB] | Leq [dBA] |
|--------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|-----------|
| | Frecuencias centrales de octava [Hz] | | | | | | | | | | |
| | 16 | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | | |
| FRC-1 | 56,8 | 62,7 | 57,6 | 48,9 | 48,0 | 46,0 | 43,0 | 37,8 | 38,8 | 66,4 | 49,1 |
| FRC-2 | 55,9 | 58,3 | 50,1 | 52,1 | 51,8 | 48,3 | 45,7 | 38,8 | 31,1 | 62,7 | 50,3 |
| FRC-3 | 64,1 | 65,4 | 61,0 | 58,3 | 54,2 | 48,7 | 48,3 | 45,5 | 40,2 | 69,4 | 53,4 |
| FRC-4 | 68,7 | 60,3 | 61,6 | 59,6 | 57,1 | 53,2 | 52,5 | 47,1 | 39,2 | 69,8 | 56,2 |
| FRC-5 | 60,9 | 56,5 | 51,2 | 50,1 | 50,3 | 49,6 | 48,4 | 45,5 | 40,1 | 65,0 | 59,0 |
| FRC-6 | 59,3 | 53,0 | 54,6 | 54,1 | 52,1 | 47,4 | 48,4 | 43,0 | 35,2 | 63,6 | 52,4 |
| FRC-7 | 64,3 | 60,8 | 55,4 | 47,0 | 39,6 | 34,9 | 31,7 | 28,5 | 21,1 | 67,4 | 41,0 |

Tabla 4: Espectro de ruido de fondo medido con sistemas de ventilación y aire acondicionado encendidos.

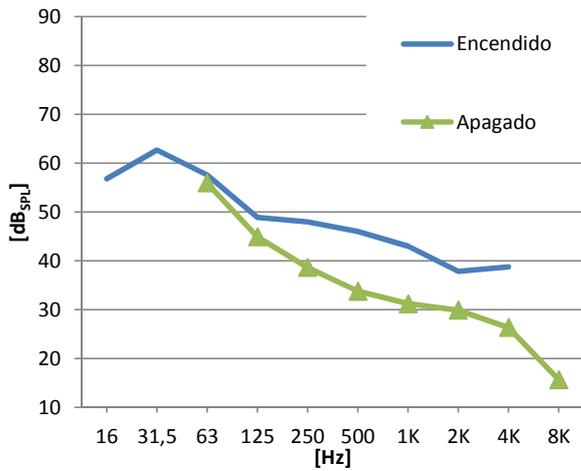


Figura 11: Aula FRC-1.

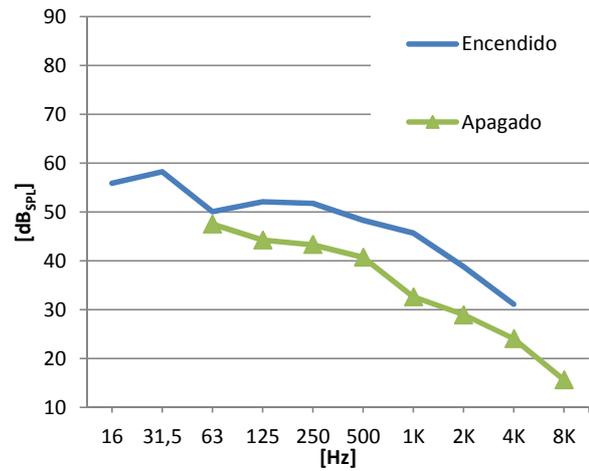


Figura 12: Aula FRC-2.

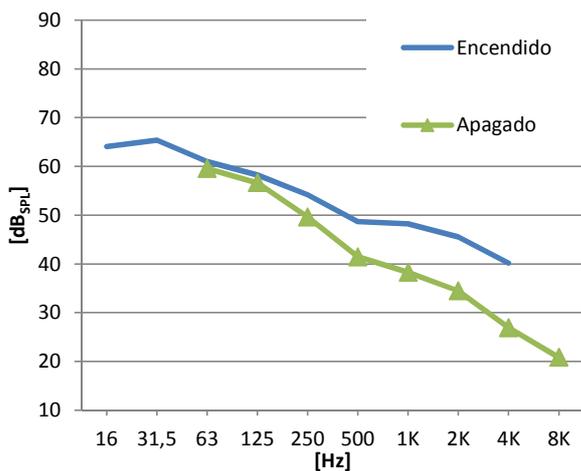


Figura 13: Aula FRC-3.

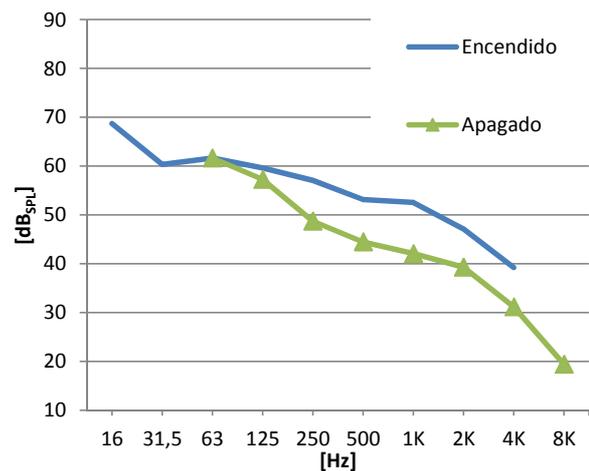


Figura 14: Aula FRC-4.

parte de la superficie de cada aula. En todos los casos se tomó la precaución de mantener una distancia mínima de 1 m entre cualquier posición del micrófono y las fuentes de ruido, tales como ventiladores o equipos de aire acondicionado.

En cada posición se midieron los espectros de ruido en bandas de octava y los niveles sonoros continuos equivalentes lineales y ponderados A. Se empleó la respuesta temporal lenta y el tiempo de integración de cada medición fue de 3 minutos.

Las mediciones se realizaron con un medidor de nivel sonoro Clase 2 marca Rion, modelo NL-31. Las mediciones fueron realizadas con trípode, y en todos los casos la altura del micrófono fue de 1,30 m con respecto del piso.

Las condiciones de medición de cada aula fueron las mismas en todos los casos: aula desocupada, ventanas, cortinas y puerta cerradas y luces encendidas.

Para la evaluación del espectro de ruido de fondo de cada aula, se realizó el promediado de las mediciones realizadas en cada uno de los 3 puntos de medición. El promediado se realizó por banda de octava.

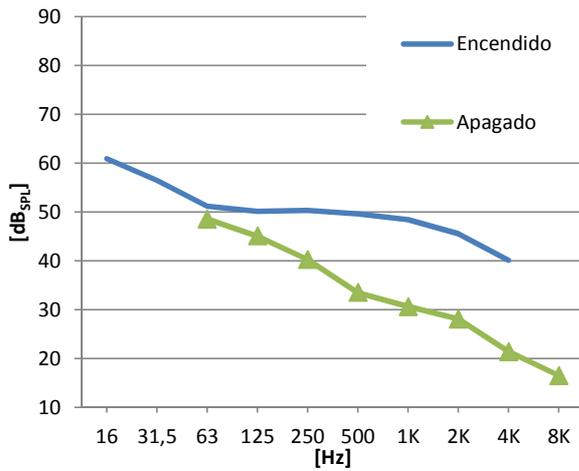


Figura 15: Aula FRC-5.

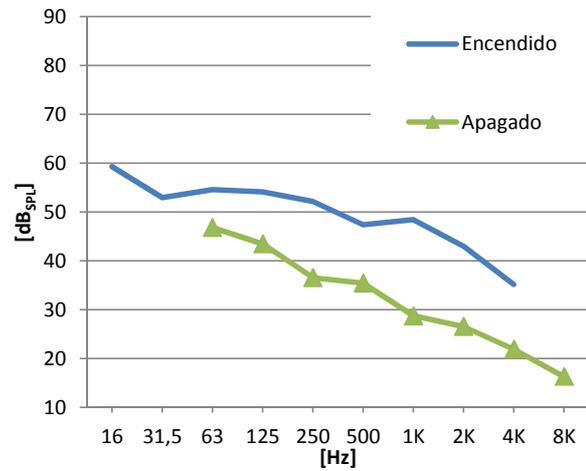


Figura 16: Aula FRC-6.

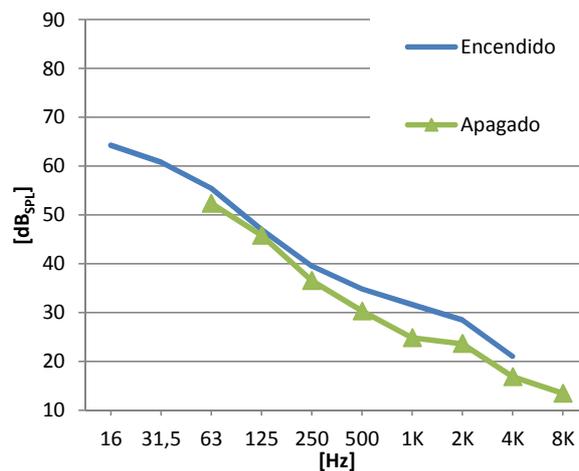


Figura 17: Aula FRC-7.

4.2. Valores de ruido de fondo medidos

En Tabla 3 y Tabla 4 se presentan los valores de ruido de fondo medidos en una muestra de 7 aulas de la FRC, UTN.

Los valores de la Tabla 3 corresponden a la condición de aula cerrada y sin ocupación, con los sistemas de ventilación y aire acondicionado apagados. Los valores de la Tabla 4 corresponden a la condición de aula cerrada y sin ocupación, con los sistemas de ventilación y aire acondicionado encendidos y trabajando a la máxima potencia.

4.3. Variación del espectro de ruido de fondo producida por los sistemas de ventilación y aire acondicionado

En las Figuras 11 a 17 se presentan en forma gráfica los espectros de ruido de fondo medidos en cada una de las aulas bajo estudio, en la condición de sistemas de ventilación y aire acondicionado encendidos y apagados.

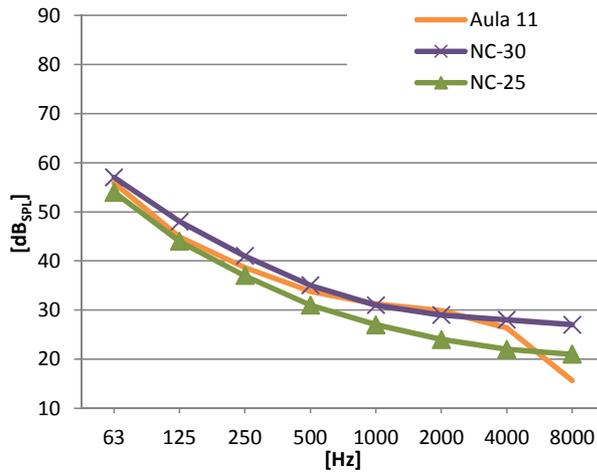


Figura 18: Perfil NC del aula FRC-1.

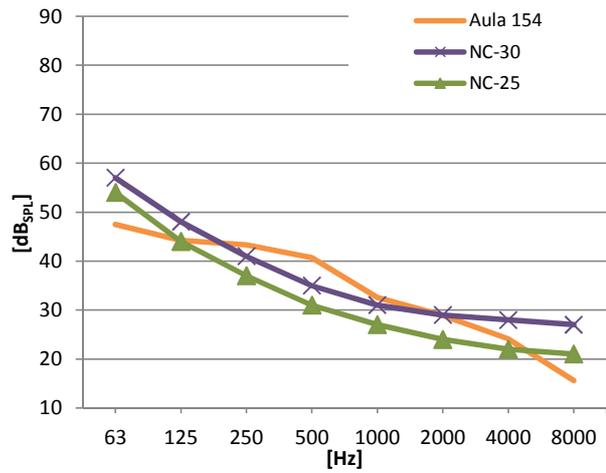


Figura 19: Perfil NC del aula FRC-2.

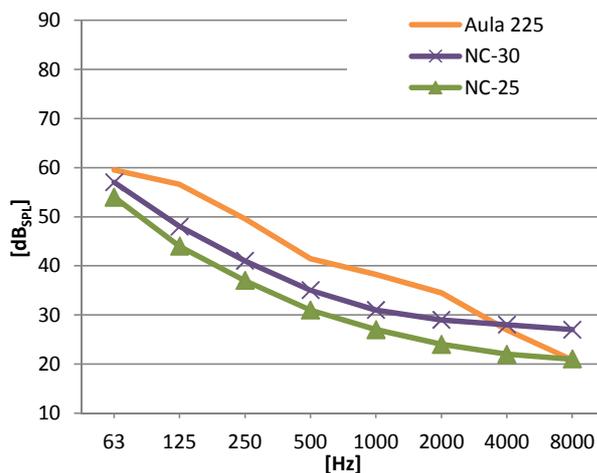


Figura 20: Perfil NC del aula FRC-3.

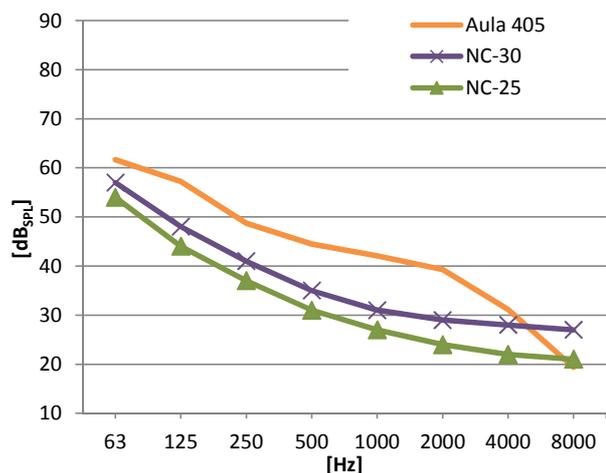


Figura 21: Perfil NC del aula FRC-4.

Se observa que los equipos de aire acondicionado de las aulas FRC-1, FRC-2, FRC-4 y FRC-6 afectan significativamente al espectro de ruido de fondo entre las bandas de octava centradas en 125 Hz y 4000 Hz. Además, en el aula FRC-6, este efecto comienza a notarse a partir de la banda de octava centrada en 63 Hz.

El aula FRC-7 cuenta con un sistema de aire acondicionado central que fue instalado con un proyecto acústico previo, logrando que el funcionamiento de dicho sistema no afecte al ruido de fondo del recinto.

En las aulas FRC-3 y FRC-5 el funcionamiento de los ventiladores de techo de 3 aspas también afecta significativamente al espectro de ruido de fondo entre las bandas de octava centradas en 125 Hz y 4000 Hz. Cuando se realizaron las mediciones en las aulas mencionadas, se observó que los ventiladores producían ruido debido a la fricción de sus partes mecánicas además del ruido producido por el flujo de aire.

El espectro de ruido producido por los sistemas de ventilación y aire acondicionado de las aulas FRC-1 a FRC-6 interfiere notablemente en el rango de frecuencias más importantes para

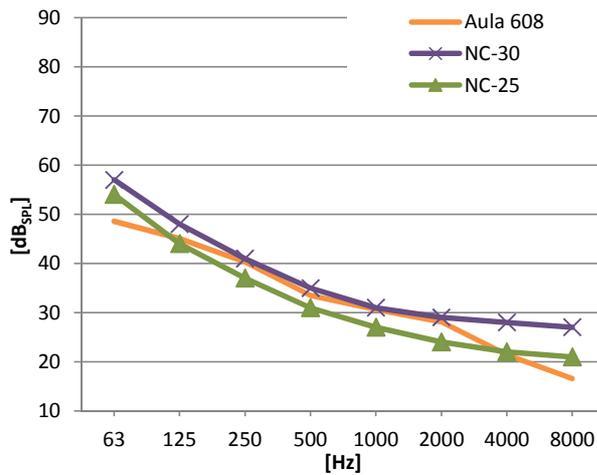


Figura 22: Perfil NC del aula FRC-5.

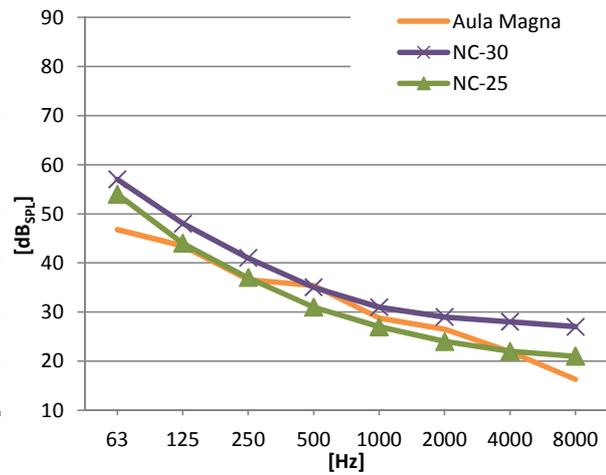


Figura 23: Perfil NC del aula FRC-6.

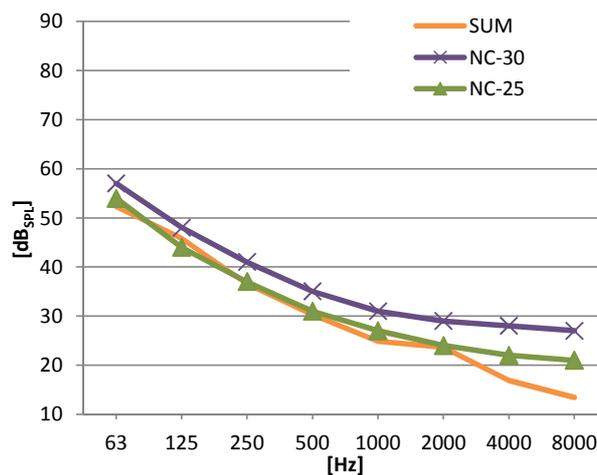


Figura 24: Perfil NC del aula FRC-7.

la comprensión de la palabra hablada, entre las bandas de octava centradas en 125 Hz y 4000 Hz.

5. EVALUACION DEL ESPECTRO DEL RUIDO DE FONDO

5.1. Perfiles NC

Según lo establecido en la norma IRAM 4070, se obtuvo por mediciones de nivel sonoro equivalente lineal, el espectro en bandas de octavas (desde 63 Hz hasta 8000 Hz) del ruido de fondo en las aulas bajo consideración, incluyendo todos los ruidos provenientes del exterior y excluyendo los ruidos originados por la actividad en el interior del recinto y los ruidos externos atípicos.

Para asignar el valor NC, se comparó el gráfico de cada espectro con la familia de curvas NC normalizadas que se presentan en la norma en forma gráfica y en una tabla. Para cada banda de octava del espectro de ruido de cada aula, se obtuvo un valor NC por interpolación lineal entre

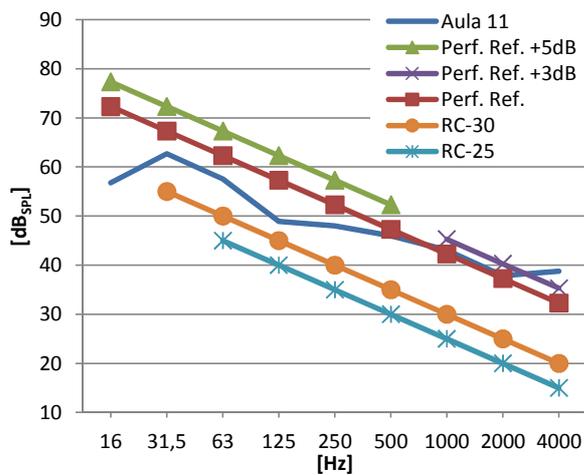


Figura 25: Perfil RC del aula FRC-1.

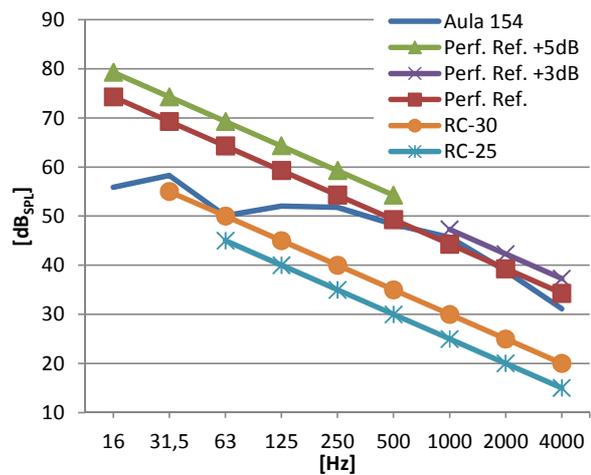


Figura 26: Perfil RC del aula FRC-2.

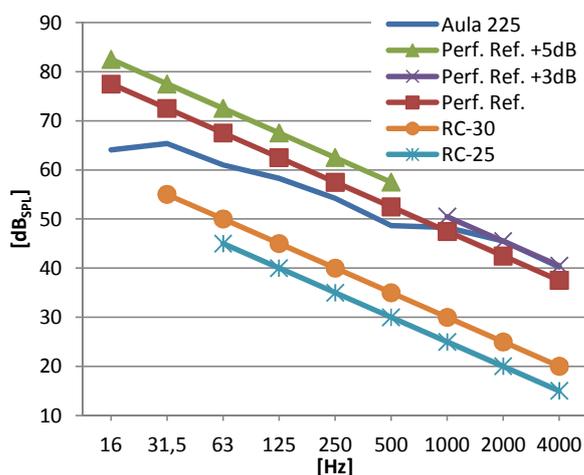


Figura 27: Perfil RC del aula FRC-3.

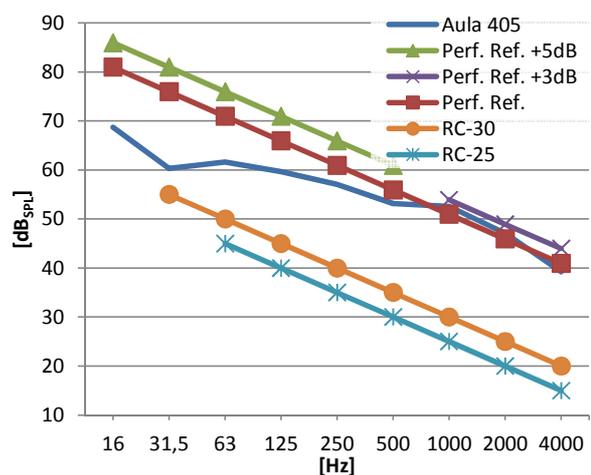


Figura 28: Perfil RC del aula FRC-4.

las dos curvas NC normalizadas más próximas. Finalmente se asignó a cada espectro el mayor valor NC obtenido entre sus bandas de octavas. Estos valores se muestran en la Tabla 5.

En las Figuras 18 a 24 se presentan los espectros de ruido de fondo medidos en las aulas bajo estudio en la condición de sistemas de ventilación y aire acondicionado apagados. En cada una de las figuras mencionadas, se presenta el espectro de ruido de fondo medido en el aula junto con los perfiles NC 25 y NC 30 a fines de comparación, ya que los mencionados en último término son los que no deben superarse para cumplir con los criterios de la norma IRAM 4070.

5.2. Perfiles RC

Según lo establecido en la norma IRAM 4070, se obtuvo por mediciones de nivel sonoro equivalente lineal, el espectro en bandas de octavas (desde 16 Hz hasta 4000 Hz) del ruido originado por los sistemas de ventilación y aire acondicionado (calefacción y/o refrigeración) en las aulas bajo consideración, incluyendo todos los ruidos provenientes del exterior.

El criterio RC incluye dos descriptores. El primer descriptor está determinado por un núme-

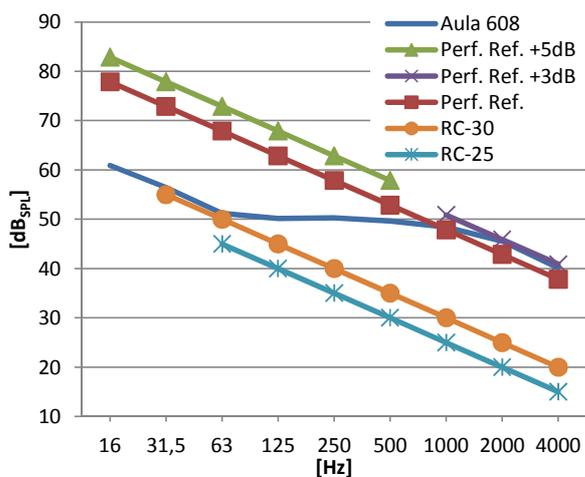


Figura 29: Perfil RC del aula FRC-5.

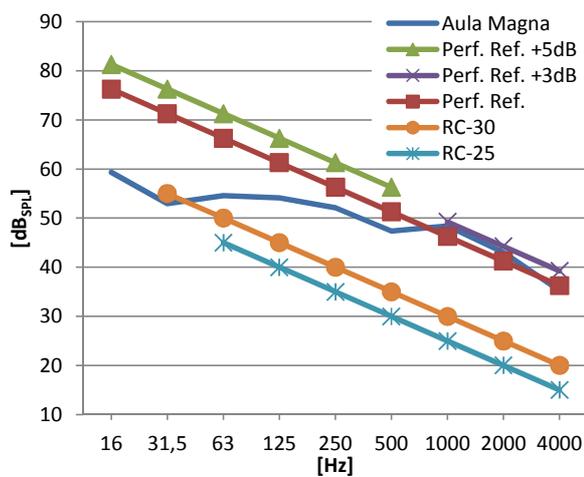


Figura 30: Perfil RC del aula FRC-6.

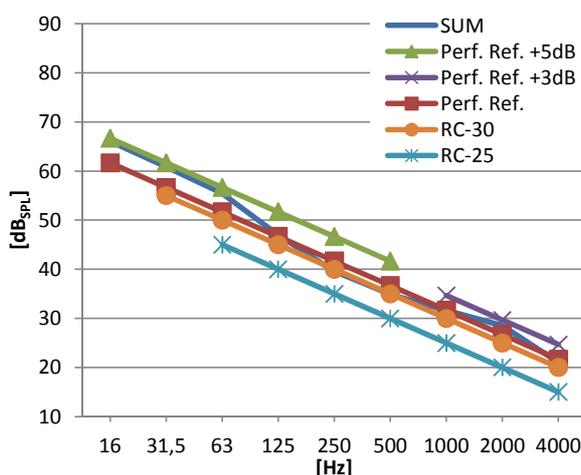


Figura 31: Perfil RC del aula FRC-7.

ro que representa el nivel del espectro de interferencia de la palabra (SIL), obtenido como el promedio aritmético de los niveles de ruido en las octavas de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz. Este es el valor RC asignado al espectro.

El segundo descriptor consiste en una letra que indica subjetivamente la calidad del sonido. Para determinar la calidad subjetiva del espectro de ruido medido, se traza una recta con una pendiente de -5 dB por octava en el rango de frecuencias desde 16 Hz hasta 4000 Hz, pasando por 1000 Hz en el valor RC asignado al espectro. Esta última se denomina perfil de referencia y sirve para evaluar la calidad del sonido en todo el espectro. Se traza una línea paralela 5 dB por encima del perfil de referencia entre 16 Hz y 500 Hz y luego una segunda línea, 3 dB por encima del perfil de referencia entre 1000 Hz y 4000 Hz. El rango establecido entre ambas líneas y el perfil de referencia, representa el máximo desvío permitido respecto del último para obtener la calificación de neutral (N). El espectro de ruido recibe la calificación de Rumble (R) (Ruido de baja frecuencia) cuando el nivel en sus bandas de octavas centradas en 500 Hz e inferiores exceden en más de 5 dB la curva de referencia en por lo menos un punto de ese

rango. El espectro de ruido recibe la calificación de Hiss (H) (Siseo o ruido de alta frecuencia) cuando el nivel en sus bandas de octavas centradas en 1000 Hz y superiores, exceden en más de 3 dB el perfil de referencia en por lo menos un punto de ese rango. Finalmente, el espectro de ruido recibe la calificación (RV), Vibraciones perceptibles, acústicamente inducidas, cuando el nivel en alguna de las bandas de octavas centradas en 16 Hz y 31,5 Hz es mayor que 65 dB o el nivel en la banda de octava centrada en 63 Hz es mayor que 70 dB.

En las Figuras 25 a 31 se presentan los espectros de ruido de fondo medidos en las aulas bajo estudio en la condición de sistemas de ventilación y aire acondicionado encendidos. En cada una de las figuras mencionadas, se presenta el espectro de ruido de fondo del aula, el perfil de referencia y las líneas auxiliares, junto con los perfiles RC 25 y RC 30 a fines de comparación, ya que los mencionados en último término son los que no deben superarse para cumplir con los criterios de la norma IRAM 4070.

5.3. Resultado de la evaluación del espectro de ruido de fondo en las aulas

En la Tabla 5 se presentan los valores NC y RC asignados a los espectros de ruido de fondo medidos en cada una de las aulas bajo estudio y el resultado de la evaluación según lo recomendado por la norma IRAM 4070 y la norma NBR 10152.

| Código | CRITERIO | | | IRAM 4070 | | NBR 10152 |
|--------|----------|------|-------|-----------|-----------|-----------|
| | NC | RC | | NC | RC | NC |
| FRC-1 | 30,9 | 42,3 | H | NO CUMPLE | NO CUMPLE | CUMPLE |
| FRC-2 | 35,7 | 44,3 | N | NO CUMPLE | NO CUMPLE | ACEPTABLE |
| FRC-3 | 40,8 | 47,5 | H, RV | NO CUMPLE | NO CUMPLE | ACEPTABLE |
| FRC-4 | 41,5 | 50,9 | RV | NO CUMPLE | NO CUMPLE | ACEPTABLE |
| FRC-5 | 29,5 | 47,9 | N | CUMPLE | NO CUMPLE | CUMPLE |
| FRC-6 | 30,4 | 46,3 | N | NO CUMPLE | NO CUMPLE | CUMPLE |
| FRC-7 | 27,3 | 31,7 | N | CUMPLE | NO CUMPLE | CUMPLE |

Tabla 5: Valores NC y RC asignados a los espectros de ruido de fondo y resultado de la evaluación.

En la condición de sistemas de ventilación y aire acondicionado apagados, 2 aulas de la muestra (FRC-5 y 7) cumplen con los criterios de la norma IRAM 4070. Por otro lado, 4 aulas de la muestra (FRC-1, 5, 6 y 7) cumplen con los criterios de la norma NBR 10152 mientras que las aulas restantes (FRC-2, 3 y 4) presentan un espectro de ruido de fondo aceptable según los criterios de la misma.

En la condición de sistemas de ventilación y aire acondicionado encendidos, ninguna de las aulas de la muestra cumple con los criterios de la norma IRAM 4070.

6. CONCLUSIONES

Solamente 2 aulas de la muestra (28,6 %) cumplen con los criterios de la norma IRAM 4070 en cuanto a los perfiles NC, aulas FRC-5 (NC 29,5) y FRC-7 (NC 27,3). De las aulas restantes, la FRC-1 (NC 30,9), FRC-2 (NC 35,7) y FRC-6 (30,4) podrían considerarse aceptables, pero la norma no menciona tal posibilidad.

Por otro lado, 4 de las aulas de la muestra (57,2 %) cumplen con los criterios de la norma NBR 10152 para el confort acústico en aulas. Estas aulas son la FRC-1, 5, 6 y 7. No obstante, las aulas restantes de la muestra cumplen con lo que la norma considera aceptable para la finalidad de los recintos bajo estudio. Se puede decir que, en cuanto a los recintos destinados a la actividad

de enseñanza-aprendizaje, la norma NBR 10152 recomienda un espectro de ruido de fondo con niveles de presión sonora mayores a los recomendados por la norma IRAM 4070.

Ninguno de los recintos bajo estudio cumple con los criterios de la norma IRAM 4070 en cuanto a los perfiles RC. Sin embargo, el aula FRC-7 (RC 31,7 N) podría considerarse aceptable, pero la norma no menciona tal posibilidad.

El funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado split tipo residencial (aulas FRC-1 y FRC-2) y tipo light comercial (aulas FRC-4 y FRC-6) afectan significativamente al espectro de ruido de fondo entre las bandas de octava centradas en 125 Hz y 4000 Hz. Además, en el aula FRC-6, este efecto comienza a notarse a partir de la banda de octava centrada en 63 Hz.

El funcionamiento de los ventiladores de techo de 3 aspas de las aulas FRC-3 y FRC-5 afecta significativamente al espectro de ruido de fondo entre las bandas de octava centradas en 125 Hz y 4000 Hz. Esto se debe al ruido emitido por la fricción de sus partes mecánicas, además del ruido producido por el flujo de aire.

El espectro de ruido producido por los sistemas de ventilación y aire acondicionado de las aulas FRC-1 a FRC-6 interfiere notablemente en el rango de frecuencias más importantes para la comprensión de la palabra hablada, entre las bandas de octava centradas en 125 Hz y 4000 Hz. El sistema de aire acondicionado para conductos instalado en el aula FRC-7 demostró ser el más apropiado para ser aplicado a recintos destinados a la actividad de enseñanza-aprendizaje.

7. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional. Al Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada al CONICET, de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

- Cravero G.A., Ferreyra S.P., Flores M.D., Budde L., Longoni H.C., Ramos O.A., y Tommasini F.C. Medición y simulación de tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos de aulas. *Mecánica Computacional*, XXXII:2889–2900, 2013.
- Ercoli L., Azzurro A., Méndez A., y Stornini A. Caracterización sonora de aulas: Un estudio de los principales parámetros acústicos en aulas argentinas. parte 1: Diagnóstico. Informe Técnico, Grupo Análisis de Sistemas Mecánicos, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, 1998.
- Ferreyra S.P., Cravero G.A., Flores M.D., Budde L., Longoni H.C., Ramos O.A., y Tommasini F.C. Análisis modal de aulas universitarias. *Mecánica Computacional*, XXXII:3978–3993, 2013.
- Isbert A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Politecnos Series. UPC, 1998. ISBN 9788483012529.
- Muszkat A., Fernández J., y Kogan P. Mediciones de ruido en aula universitaria equipada con computadoras. *Reunión Regional de Acústica*, 2011.
- Norma IRAM 4070. Ruidos. procedimiento para su evaluación utilizando los perfiles nc y rc. 2008.
- Norma NBR 10152. Niveles de ruido para confort acústico. 1987.
- Raphael L., Borden G., y Harris K. *Speech Science Primer: Physiology, Acoustics, and Perception of Speech*. Communication sciences. Lippincott Williams & Wilkins, 2007. ISBN 9780781771177.