

## ANÁLISIS MODAL DE AULAS UNIVERSITARIAS

**Sebastián P. Ferreyra<sup>a</sup>, Gabriel A. Cravero<sup>a</sup>, Mario D. Flores<sup>a</sup>, Leopoldo Budde<sup>a</sup>,**

**Hugo C. Longoni<sup>a</sup>, Oscar A. Ramos<sup>a,b</sup> y Fabian C. Tommasini<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>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: sferreyra@scdt.frc.utn.edu.ar,

<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra/>

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

**Palabras clave:** modos propios, respuesta impulsiva de aulas, onda estacionaria, tiempo de reverberación.

Resumen. Una característica acústica común de las aulas universitarias en la República Argentina es el elevado valor de tiempo de reverberación, aún cuando son pequeños recintos. Esto se debe a la utilización de materiales constructivos con bajos valores de coeficientes de absorción sonora. El campo sonoro en estos recintos utilizados para el proceso de enseñanza-aprendizaje presenta significativas coloraciones espectrales, debido a la existencia de ondas estacionarias producidas por interferencias constructivas y destructivas de ondas. La identificación y estudio de los modos propios de vibración resulta relevante para el análisis y diseño de dichos recintos. En este trabajo, se presentan los resultados de análisis modal del campo sonoro medido en ocho aulas de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina. Las mediciones de los modos de resonancia se realizaron para tres criterios diferentes: modos totales, modos particulares y promedio modal. Además, se comparan los valores medidos con los recomendados en la bibliografía internacional de parámetros acústicos de aulas.

## 1 INTRODUCCIÓN

Una característica acústica común de las aulas universitarias en la República Argentina (RA) es el elevado valor de tiempo de reverberación ( $T > 2,50$  s –sin ocupación–), aún en pequeños recintos con volúmenes menores a  $100 \text{ m}^3$  (Ercoli et al, 1998; Cravero et al, 2011). Esto se debe a la utilización de materiales constructivos con bajos valores de coeficientes de absorción sonora,  $\alpha$ .

La interacción entre las ondas sonoras incidentes y reflejadas en un recinto produce interferencias constructivas y destructivas dando lugar a ondas estacionarias ó modos propios de vibración (MPV). Cada modo de resonancia va asociado a una frecuencia denominada propia ó normal, y está caracterizado por el nivel de presión sonora que es función del espacio (Morse, 1948). Los modos aumentan con el volumen del recinto y con el cubo de la frecuencia, de manera que las irregularidades de la respuesta del recinto son notorias en bajas frecuencias, por debajo de la frecuencia de corte ó Schröeder (Schröeder, 1996). Cuando existe una alta densidad modal en un espectro angosto de frecuencia la energía sonora se concentra, originando un sonido característico a cada recinto denominado coloración. La identificación y estudio de los MPV resulta relevante para el análisis y diseño acústico de aulas, con el fin de optimizar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

El recinto puede ser modelado como un sistema lineal invariante en el tiempo (SLIT), en el cual en función de las características de la señal y de su contenido informativo, requiere diferentes tratamientos tanto de geometría, volumen y otros parámetros. Así, la palabra hablada requiere un máximo de claridad ó definición y la música condiciones de difusividad, reverberación y riqueza tonal que son función no solo de la fuente y del recinto sino también del oyente (Fuchs y Lara Saenz, 1993).



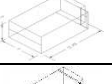
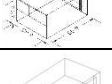
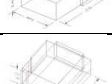


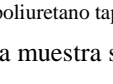
La respuesta impulsiva de un recinto (RIR) engloba la característica de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor en el dominio del tiempo y es equivalente a la función de transferencia (FT) en el dominio de la frecuencia. La RIR es diferente para cada ubicación de la combinación fuente-receptor y varía según la geometría y materiales, entre otros factores (Ferreyra y Ramos, 2007). La RIR se compone del sonido directo, las reflexiones tempranas y las reflexiones tardías. El sonido directo es el primero que escucha el oyente, seguido por las reflexiones tempranas, cuyas direcciones son cruciales para la localización de la fuente sonora. Después de 60 a 100 ms (dependiendo del recinto), comienzan las reflexiones tardías caracterizadas por una mayor densidad temporal. Estas se asemejan a un proceso aleatorio cuyas direcciones son irrelevantes para la localización pero esenciales para definir la impresión espacial, la inteligibilidad de la palabra y la distancia a la fuente sonora (Ferreyra y Ramos, 2008).

El objetivo de este trabajo experimental es realizar el análisis modal del campo sonoro medido en 8 aulas de la Facultad Regional Córdoba (FRC), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), RA. Las mediciones de los MPV se realizaron para 3 criterios diferentes: modos totales (MT), modos particulares (MP) y promedio modal (PM) (Ferreyra et al, 2012). Por otra parte, se comparan los valores medidos con los recomendados en la bibliografía internacional de parámetros acústicos de aulas (PAA).

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2, se presentan las aulas seleccionadas; en la sección 3, se describe la metodología de medición utilizada y se presentan resultados de parámetros acústicos de aulas; en la sección 4, se presenta el análisis modal de los recintos; y en la sección 5, la discusión y conclusiones de este trabajo.

## 2 AULAS

El criterio de selección de aulas consideró características acústicas arquitectónicas (geometría, dimensiones, coeficiente de absorción sonora, capacidad, entre otros), y el entorno próximo. Se seleccionó una muestra de 8 aulas representativa en términos de dimensiones y características constructivas, sobre un total de 78, ver Tabla 1. Las mismas se encuentran distribuidas en 3 edificios de la FRC, UTN.

Nº	Recinto	Volumen [ m <sup>3</sup> ]	Superficie Cubierta [ m <sup>2</sup> ]	Esquema del Recinto	Capacidad [nº de bancos/butacas]	Frecuencia Schröder [Hz]
1	Aula 608 Edificio "Ing. Soro", FRC UTN	179,46	49,30		35 <sup>+</sup>	205,73
2	Aula 015 Edificio "Central", FRC UTN	194,25	70,00		54 <sup>+</sup>	180,77
3	Aula 225 Edificio "Central", FRC UTN	240,45	80,15		98 <sup>+</sup>	117,71
4	Aula 011 Edificio "Malvinas", FRC UTN	93,45	31,15		20 <sup>+</sup>	226,16
5	Aula 708 Edificio "Ing. Soro", FRC UTN	318,82	93,22		117 <sup>+</sup>	162,43
6	Aula 154 Edificio "Central", FRC UTN	143,32	49,00		51 <sup>+</sup>	148,67
7	Aula Magna "Marie Curie" Edificio "Central", FRC UTN	712,70	186,08		168 <sup>++</sup>	73,09
8	Aula/SUM Edificio "Central", FRC UTN	215,60	74,09		60 <sup>++</sup>	91,88

(+): banco de madera fenólico; (++): butacas con base y respaldo de espuma de poliuretano tapizadas.

Tabla 1: Características acústicas arquitectónicas de la muestra seleccionada, medidas en metros.

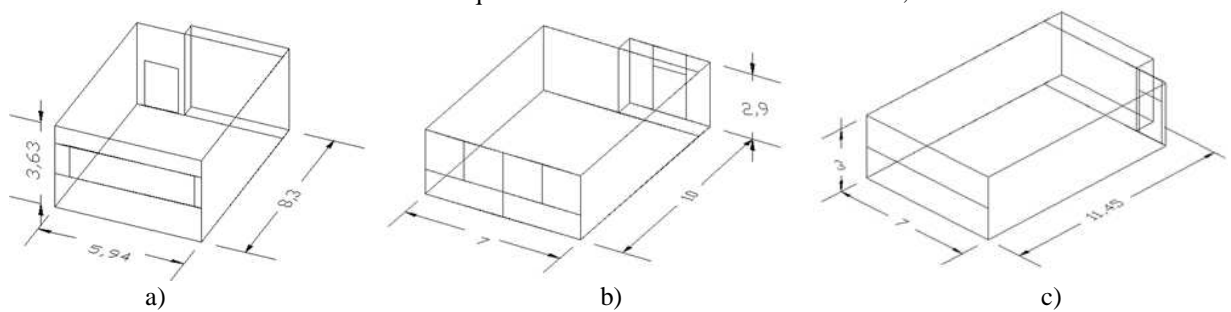


Figura 1: Modelos computacionales a) Aula 608; b) Aula 015; c) Aula 225.

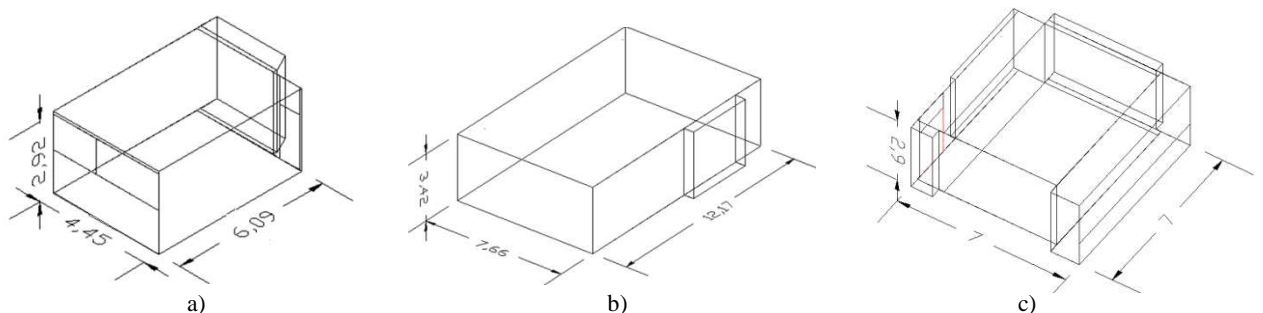


Figura 2: Modelos computacionales a) Aula 011; b) Aula 708; c) Aula 154.

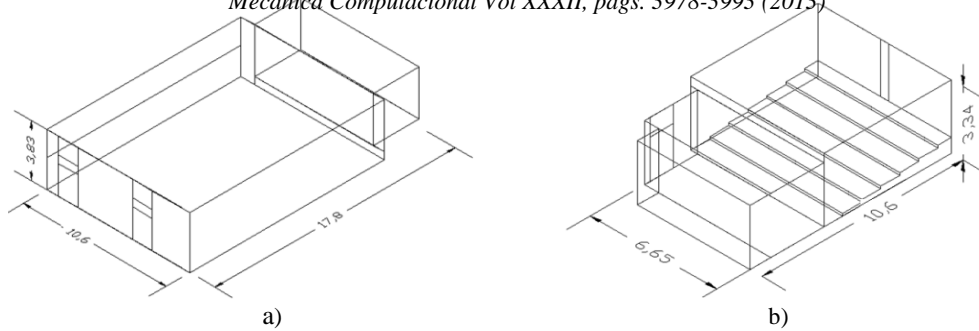


Figura 3: Modelos computacionales a) Aula magna “Mari Curie”; b) Aula/SUM.

### 3 MEDICIÓN DE PARAMETROS ACÚSTICOS DE AULAS

#### 3.1 Metodología de medición

Las mediciones de RIR se efectuaron siguiendo las recomendaciones que brinda la norma IRAM 4109-2 (compatible con ISO 3382-2). Éstas se realizaron sin presencia de alumnos (sala vacía), utilizando un sistema de medición optimizado para tal fin (Ferreira et al, 2009) el cual se detalla en Tabla 2.

Descripción	Marca, modelo
Micrófonos de medición	Brüel & Kjær, type 4133 y 4134
Placa de adquisición de sonido	Presonus, Audio box 44VSL
Fuente sonora omnidireccional (dodecaedro)	Cintra, FSO D-12
Sistema de gestión de altavoces	dBx, Drive Rack PA+
Pre-amplificador para micrófono, 200V	Brüel & Kjær, type 2804
Amplificador de audio	Samson, Servo 300
Software de acústica de salas	Brüel & Kjær, 7841
Distanciómetro Laser	Leica, D5
Auriculares	Senheiser, HD280 PRO
PC Notebook	Bangho, Intel i3 Duo/RAM 4 GB

Tabla 2: Sistema electroacústico utilizado para la medición de RIR.

Se registraron un total de 13 respuestas impulsivas por recinto correspondientes a 7 posiciones de micrófono y 3 posiciones de fuente. En las Figuras 4 a 10 se presentan las configuraciones de medición de los pares fuente-receptor (FSO<sub>i</sub>-M<sub>i</sub>) para cada recinto.

Las curvas de decrecimiento fueron obtenidas mediante la integración inversa del cuadrado de la respuesta impulsiva del recinto (método de la respuesta impulsiva integrada, Schroeder, 1965) mediante la técnica de deconvolución de señales determinísticas. Como señal de excitación se utilizó un barrido de frecuencia de variación exponencial, debido a las ventajas que esta presenta (Farina, 2000).

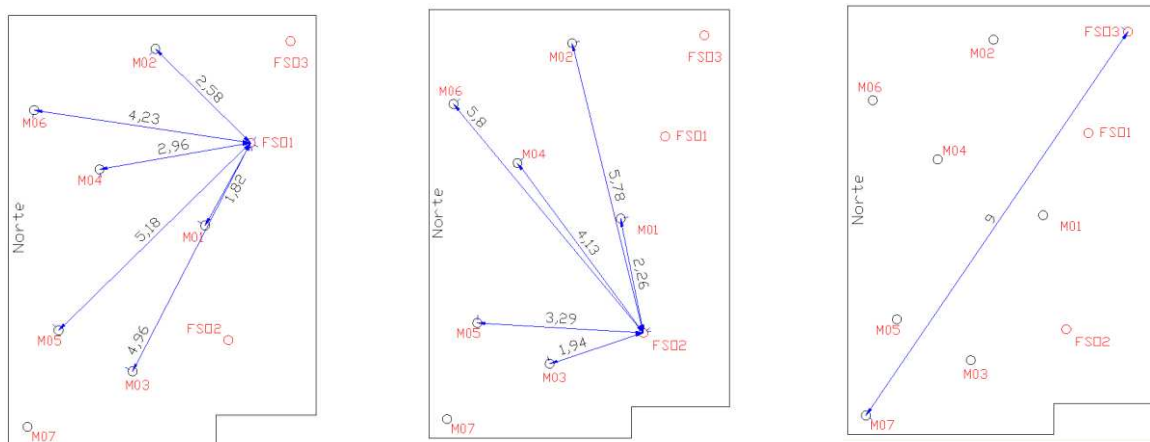


Figura 4: configuraciones de medición, Aula 608

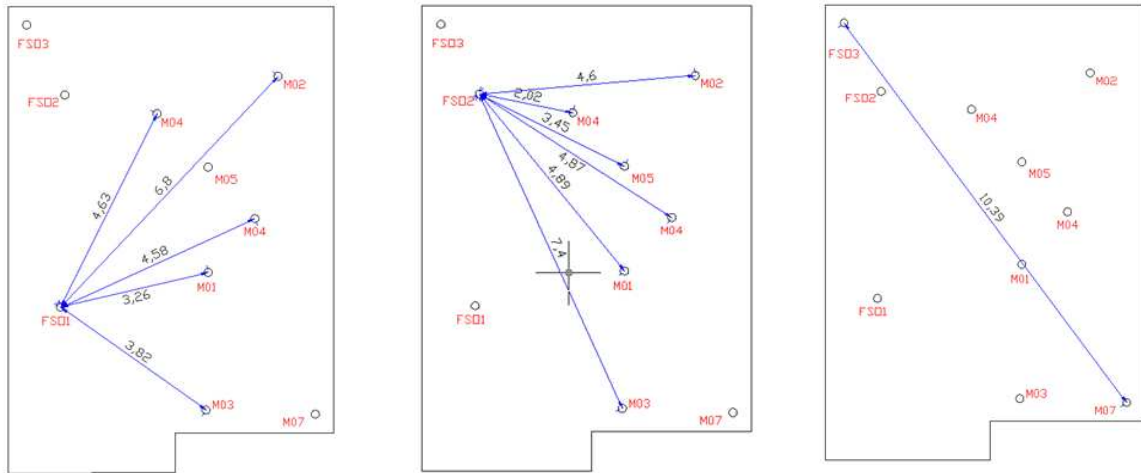


Figura 5: configuraciones de medición, Aula 015.

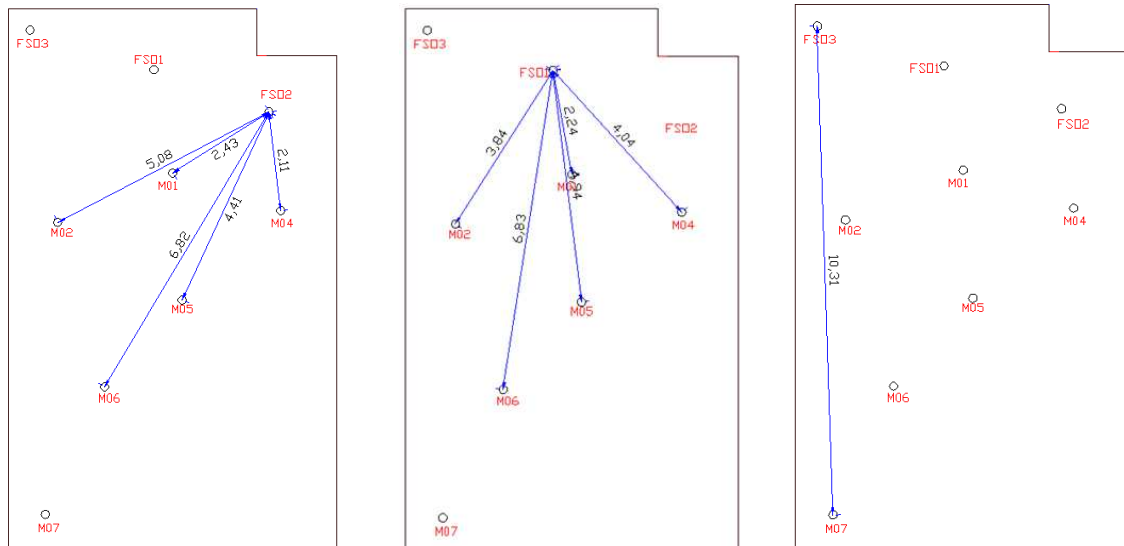


Figura 6: configuraciones de medición, Aula 225.

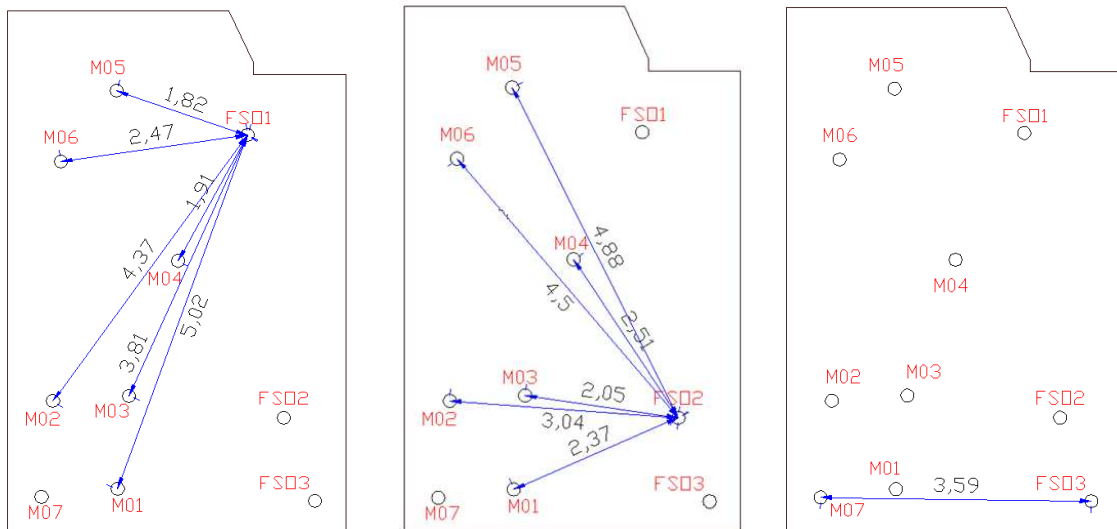


Figura 7: configuraciones de medición, Aula 011.

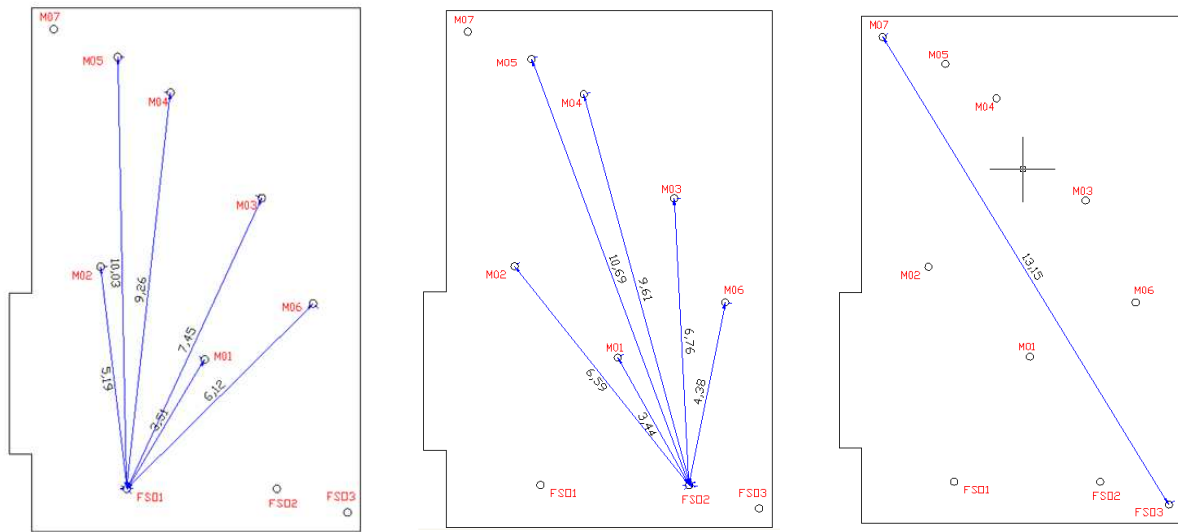


Figura 8: configuraciones de medición, Aula 708.

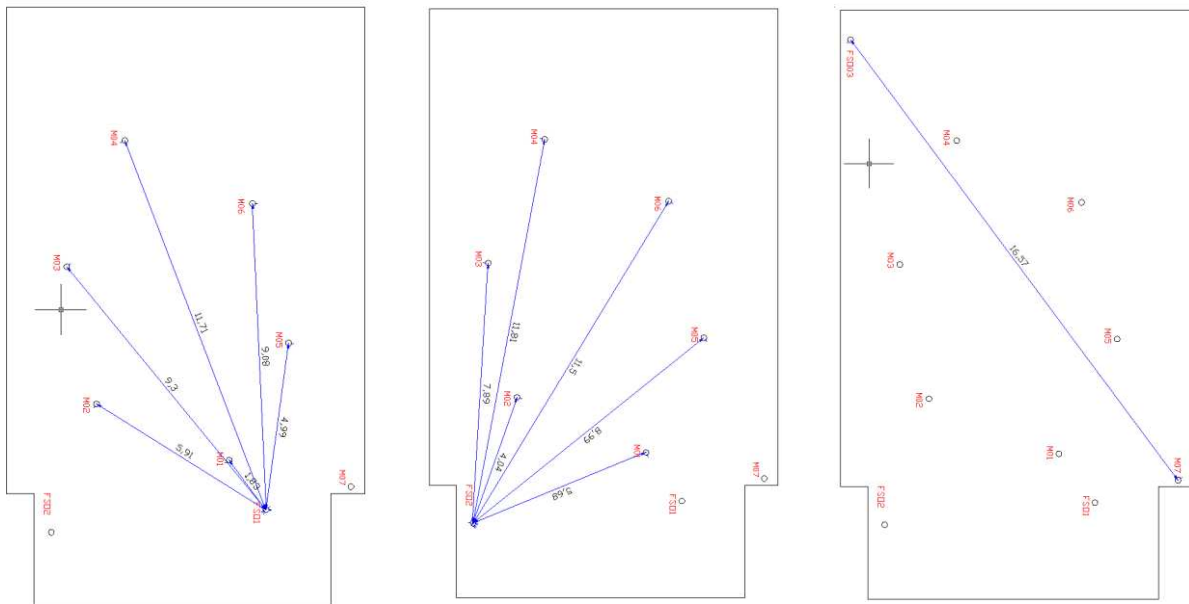


Figura 9: configuraciones de medición, Aula Magna "Marie Courie".

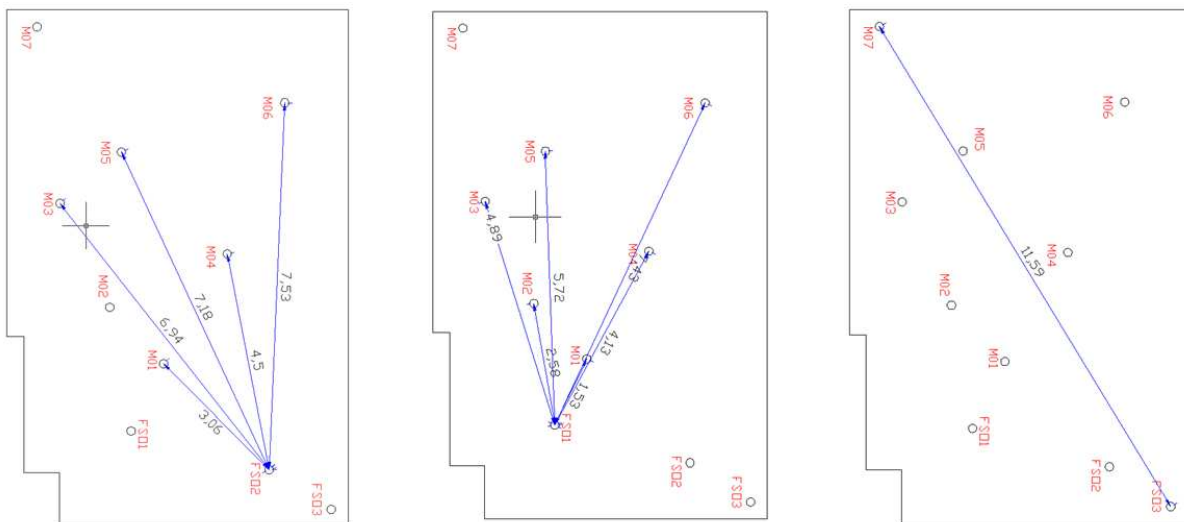


Figura 10: coordenadas de medición, Aula/SUM.



### 3.2 Comparación de valores medidos y recomendados de algunos PAA

En Tablas 3, 4 y 5 se presentan los resultados de las mediciones de tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), claridad ( $C_{50}$ ) y centro de tiempo ( $t_s$ ) de aulas seleccionadas. Los resultados expresan el valor medio (lineal y por banda de octava), de 12 combinaciones espaciales de fuente-receptor por recinto según lo establecido en la norma IRAM 4109-2. En la Tabla 6, se presentan los valores recomendados de dichos parámetros según la bibliografía internacional.

$T_{30}$ [s]	Bandas de Frecuencia por Octava [Hz]										Lineal
	Nº	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2,432	1,764	2,576	2,797	2,350	2,073	1,748	1,482	1,099	0,671	1,899
2	1,882	2,056	2,038	1,981	1,851	1,674	1,518	1,221	0,957	0,690	1,587
3	0,636	0,808	1,205	1,354	0,615	0,609	0,793	0,913	0,796	0,601	0,833
4	3,350	2,682	2,027	1,038	0,597	0,529	0,518	0,480	0,411	0,319	1,195
5	2,029	2,404	2,692	3,329	2,863	2,424	1,991	1,551	1,090	0,652	2,103
6	2,200	0,976	0,972	0,961	0,717	0,502	0,503	0,470	0,361	0,257	0,792
7	1,908	1,719	1,471	1,017	0,741	0,601	0,596	0,619	0,498	0,351	0,952
8	0,557	0,418	0,373	0,344	0,395	0,458	0,631	0,593	0,466	0,315	0,455

Tabla 3: valores medios de tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) medidos para 12 combinaciones de fuente-receptor.

$C_{50}$ [dB]	Bandas de Frecuencia por Octava [Hz]										Lineal
	Nº	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	-3,22	-1,42	-1,06	-2,26	-2,40	-1,58	-2,65	0,03	2,79	7,68	1,33
2	1,32	0,06	0,41	-0,48	0,67	-1,79	-2,18	0,12	1,95	4,85	0,72
3	5,45	0,87	-0,33	1,32	6,32	8,14	3,59	4,32	4,98	8,13	4,63
4	-3,07	-4,33	-10,15	2,52	4,61	7,55	5,04	7,33	8,47	11,79	7,23
5	0,21	-4,08	-2,80	-5,57	-4,54	-4,59	-2,56	-0,55	1,93	7,89	-0,02
6	0,90	2,40	2,74	4,59	8,50	8,60	4,68	9,08	10,42	15,58	9,14
7	-0,89	-0,01	1,41	5,89	7,46	8,72	5,91	6,71	8,77	15,67	8,43
8	8,42	4,48	13,61	12,14	10,11	11,61	7,55	12,72	14,32	18,30	14,28

Tabla 4: valores medios de claridad ( $C_{50}$ ) medidos para 12 combinaciones de fuente-receptor.

$t_s$ [ms]	Bandas de Frecuencia por Octava [Hz]										Lineal
	Nº	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	197,4	136,1	107,1	160,4	142,0	128,3	127,6	89,5	48,2	22,6	115,9
2	248,6	149,9	128,0	114,7	88,0	107,7	103,0	75,3	54,8	37,2	110,7
3	324,0	101,2	87,7	71,0	26,0	22,4	42,9	38,4	34,2	20,8	76,9
4	208,3	206,1	188,1	56,1	31,9	26,3	34,8	24,7	20,2	15,1	81,1
5	143,2	159,2	141,2	227,4	209,1	174,3	130,6	95,0	55,1	26,7	136,2
6	123,6	79,0	64,8	40,0	21,4	22,0	32,6	16,3	15,1	11,3	42,9
7	203,7	100,9	77,4	33,4	20,6	20,4	29,5	25,1	16,7	12,0	54,0
8	102,4	44,9	27,6	15,3	14,0	14,8	23,0	8,9	7,5	4,2	26,3

Tabla 5: valores medios de centro de tiempo ( $t_s$ ) medido para 12 combinaciones de fuente-receptor.

Valores óptimos	Bandas de Frecuencia por Octava [Hz]							Lineal	Referencia
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
PAA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$T_{30}$ [s] ( $V < 283 \text{ m}^3$ )	-	-	0,6	0,6	0,6	-	-	0,6	ANSI S12.60
$T_{30}$ [s] ( $283 \text{ m}^3 < V < 566 \text{ m}^3$ )	-	-	0,7	0,7	0,7	-	-	0,7	ANSI S12.60
$T_{30}$ [s] ( $V < 300 \text{ m}^3$ )	-	-	0,7	0,7	0,7	-	-	0,7	Kudsen & Harris, 1964
$T_{30}$ [s] ( $V < 300 \text{ m}^3$ )	-	-	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	-	-	0,4-0,5	Bradley J.S., 1986
$C_{50}$ [dB]	-	-	4,0-8,0	4,0-8,0	4,0-8,0	-	-	4,0-8,0	Nilsson E., 2010
$C_{50}$ [dB]	-	-	-	6,0-8,0	-	-	-	6,0-8,0	Bradley J.S., 1986
$t_s$ [ms]	-	-	-	48,8	-	-	-	48,8	Bradley J.S., 1986

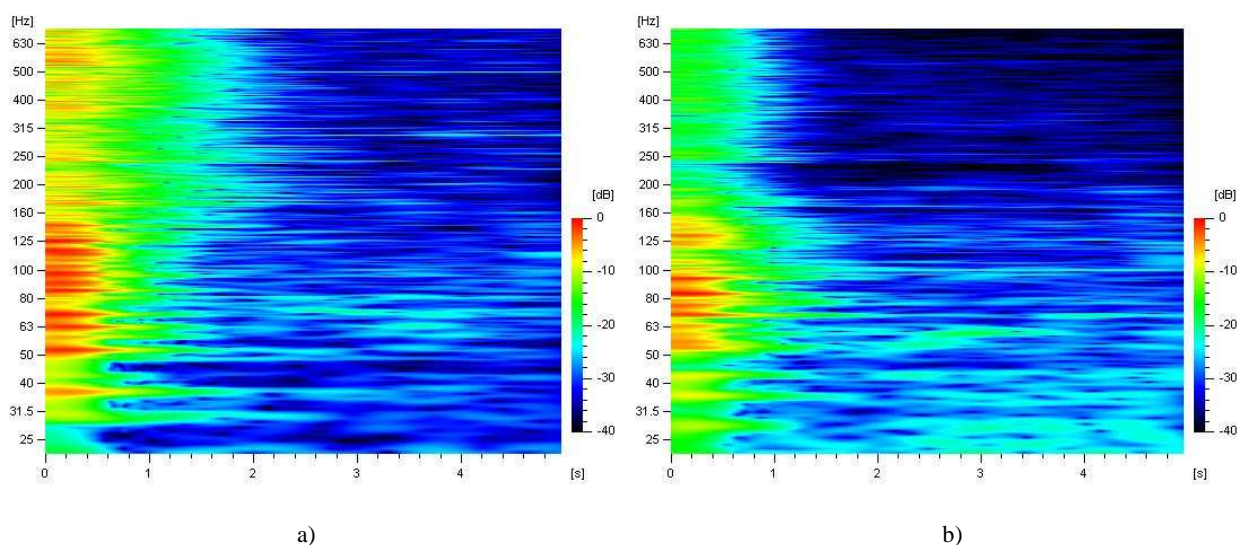
Tabla 6: valores recomendados de PAA según bibliografía internacional.

#### 4 ANÁLISIS MODAL

El análisis modal se realizó mediante espectrogramas bidimensionales (gráficos Energía (escala cromática) - Tiempo (eje abscisas) - Frecuencia (eje ordenadas), ETF) de las RIR aplicando el algoritmo de transformada de Fourier (FFT), para 3 criterios diferentes (Ferreyra et al, 2012):

- Modos totales, MT: considera excitar todos los modos propios con motivo de identificarlos, caracterizando así la respuesta modal del recinto.
- Modos particulares, MP: considera excitar los modos propios para una combinación de posiciones en particular de la fuente y el receptor, con motivo de analizar su efecto en la función de transferencia del recinto.
- Promedio modal, PM: propone caracterizar el campo sonoro en un recinto a partir del promedio de un conjunto de curvas de decrecimiento energéticas.

##### 4.1 Resultados - Criterio Modos Totales





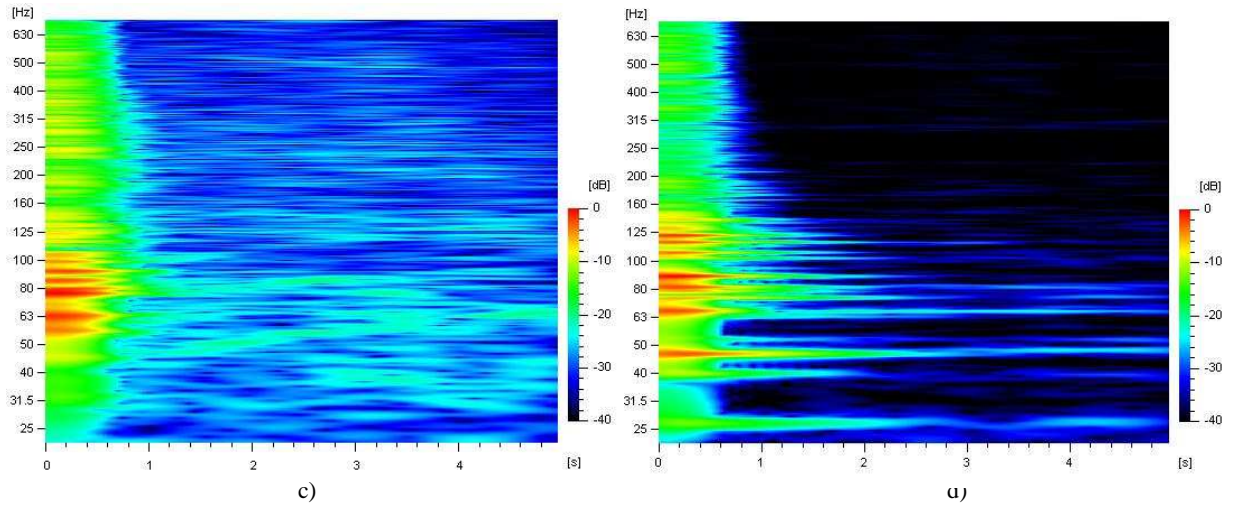


Figura 11: Análisis ETF a) Aula 608; b) Aula 015; c) Aula 225; d) Aula 011.

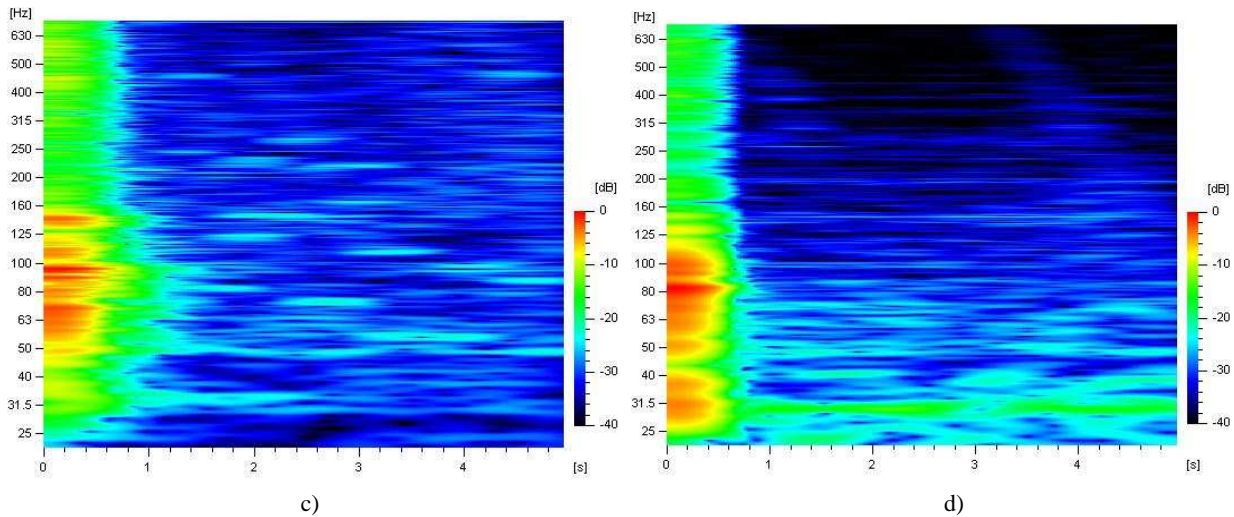
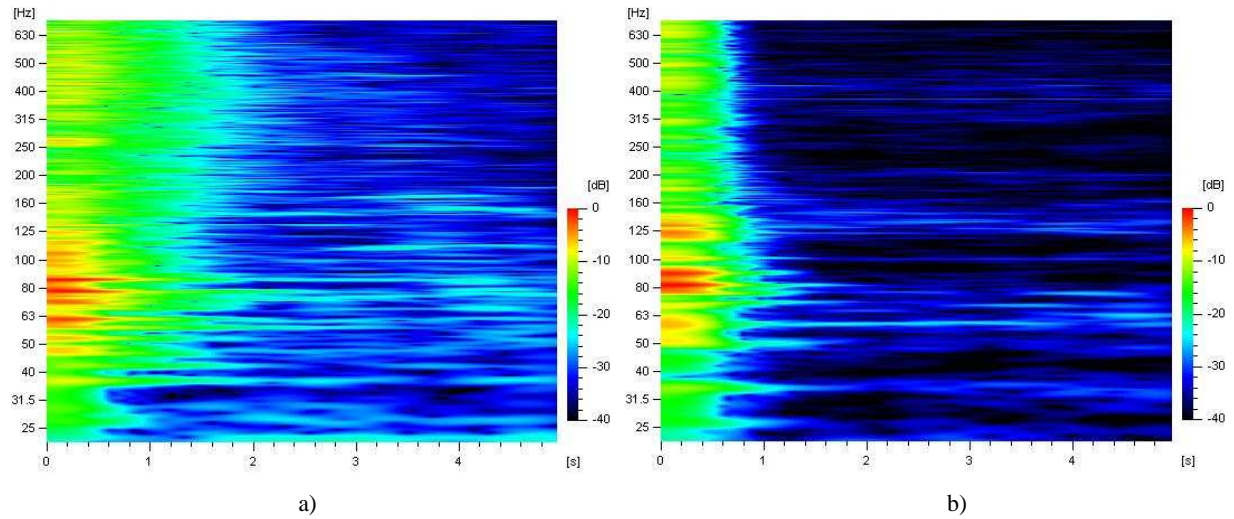
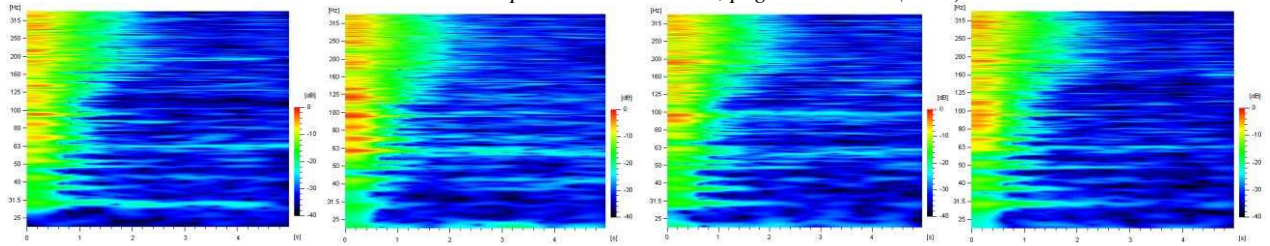


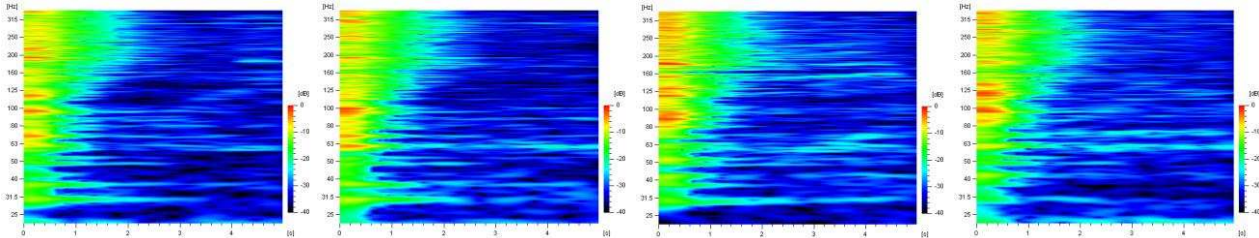
Figura 12: Análisis ETF: a) Aula 708; b) Aula 154; c) Aula magna “Mari Curie”; d) Aula/SUM.

## 4.2 Resultados - Criterio Modos Particulares

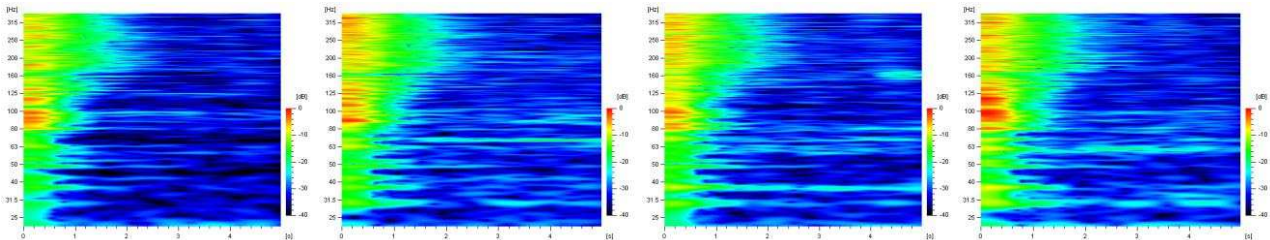




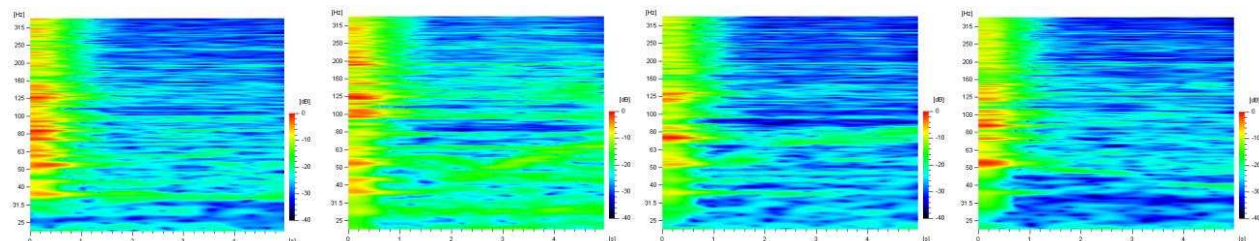
a) b) c) d)  
 Figura 13: Análisis ETF Aula 608: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>



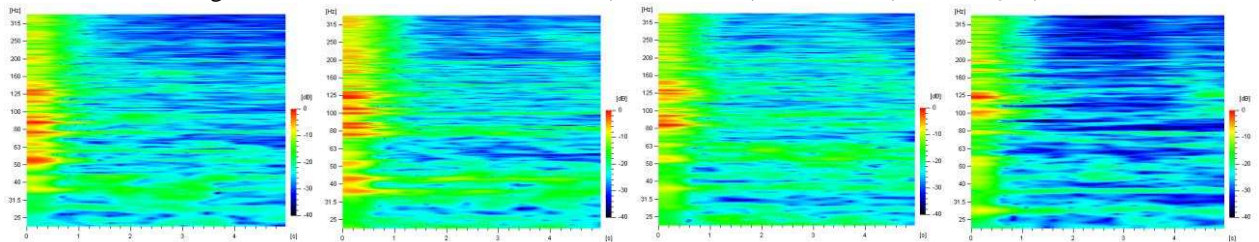
a) b) c) d)  
 Figura 14: Análisis de ETF Aula 608: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>



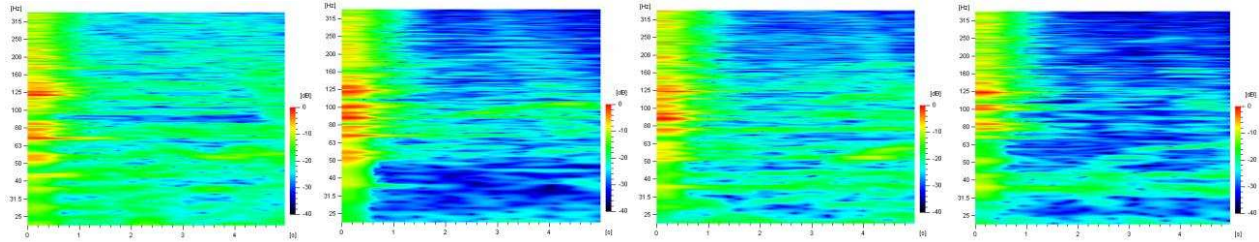
a) b) c) d)  
 Figura 15: Análisis ETF Aula 608: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>



a) b) c) d)  
 Figura 16: Análisis de ETF Aula 015: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>



a) b) c) d)  
 Figura 17: Análisis ETF Aula 015: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>



a) b) c) d)  
 Figura 18: Análisis de ETF Aula 015: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>



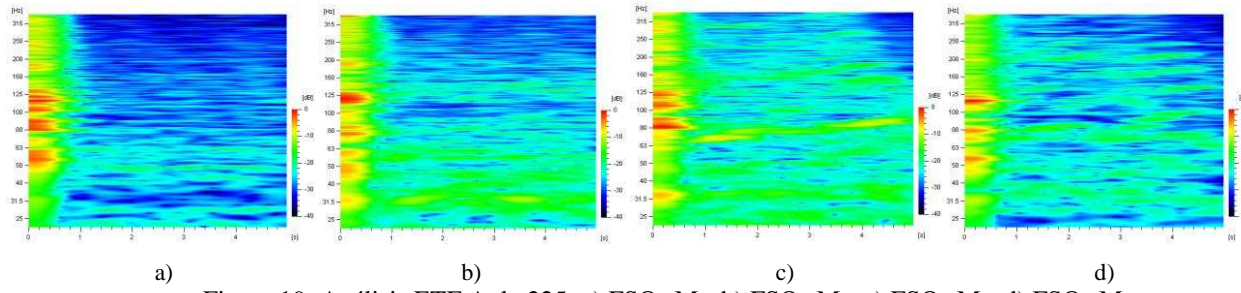


Figura 19: Análisis ETF Aula 225: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>

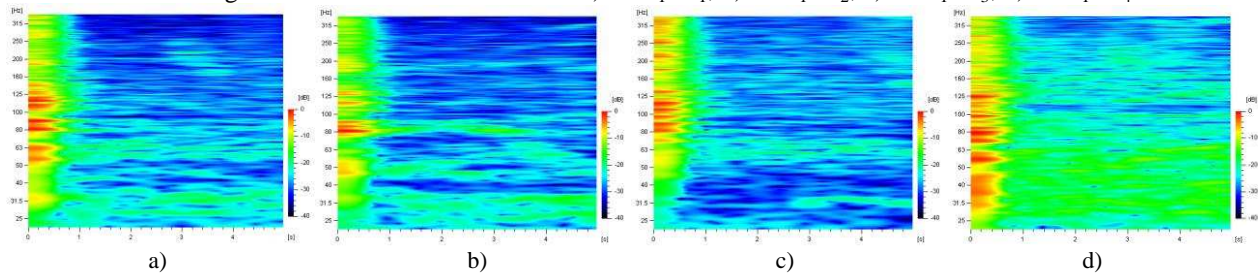


Figura 20: Análisis de ETF Aula 225: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>

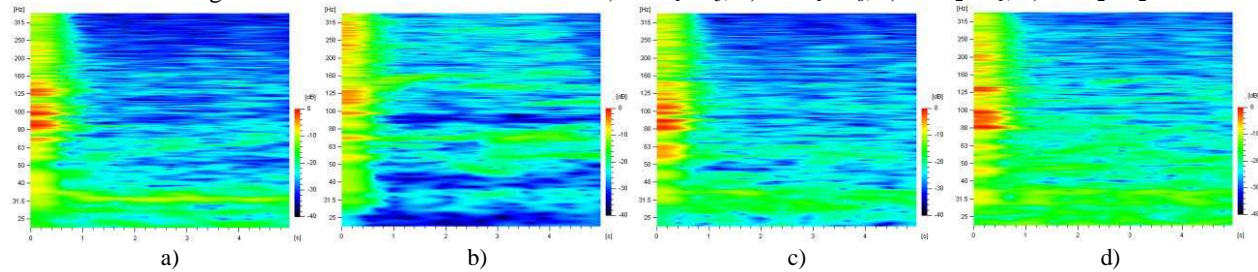


Figura 21: Análisis de ETF Aula 225: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>

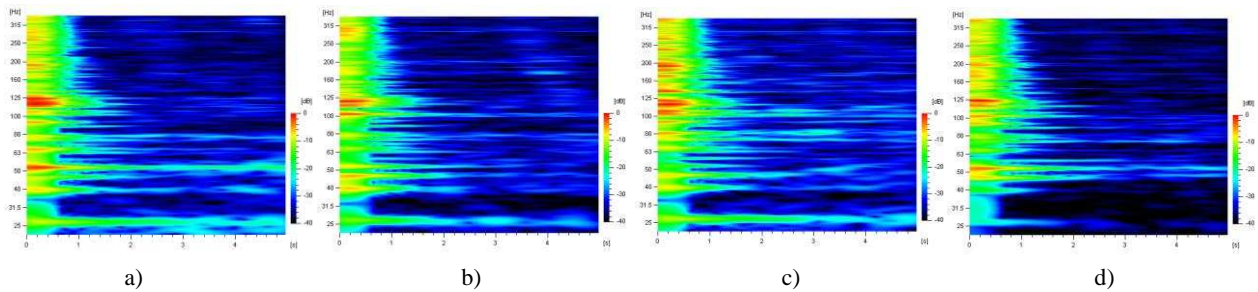


Figura 22: Análisis de ETF Aula 011: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>

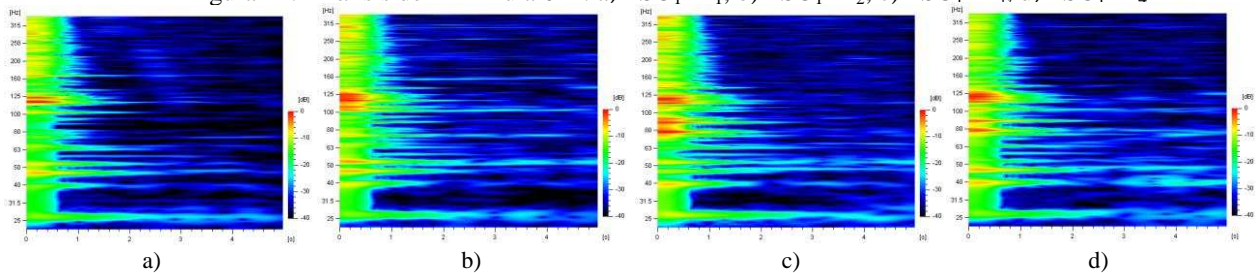


Figura 23: Análisis de ETF Aula 011: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>

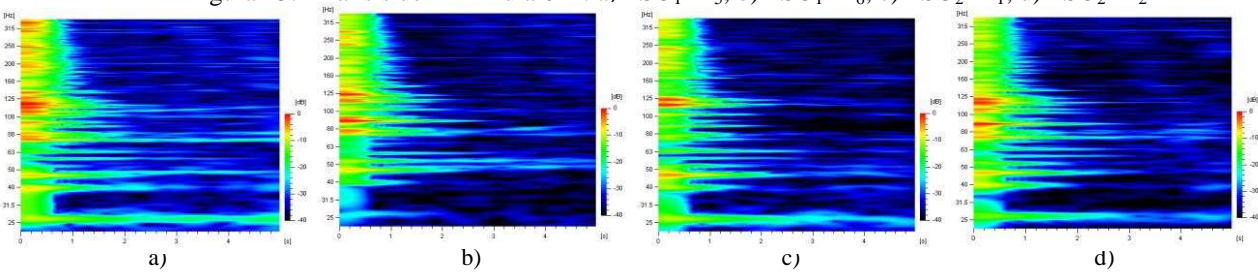


Figura 24: Análisis de ETF Aula 011: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>



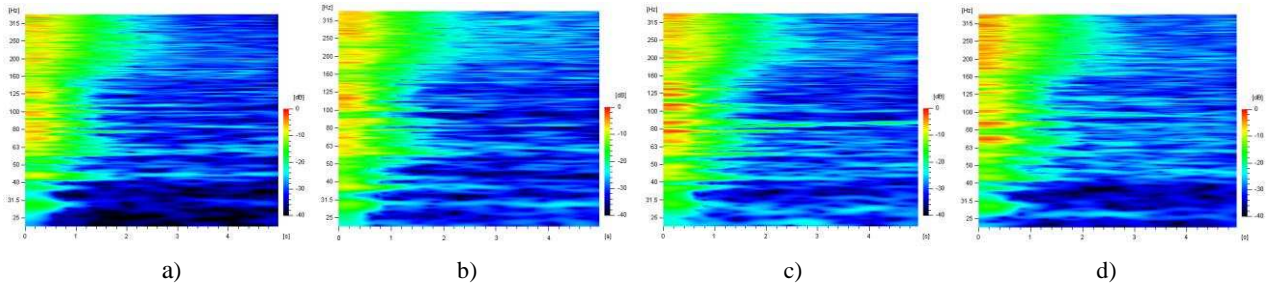


Figura 25: Análisis de ETF Aula 708: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>

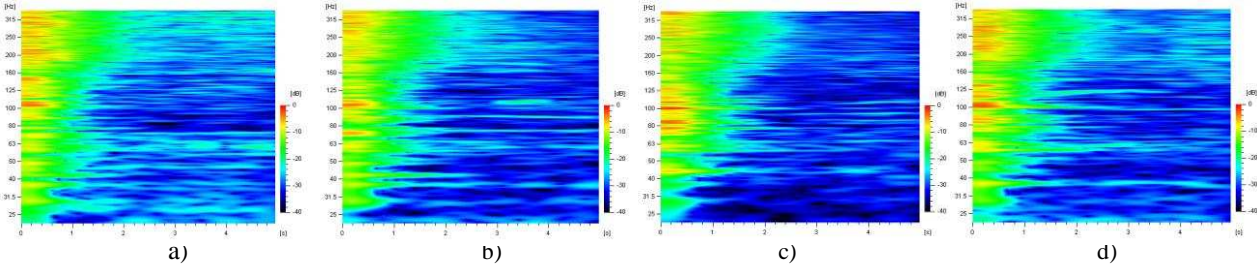


Figura 26: Análisis de ETF Aula 708: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>

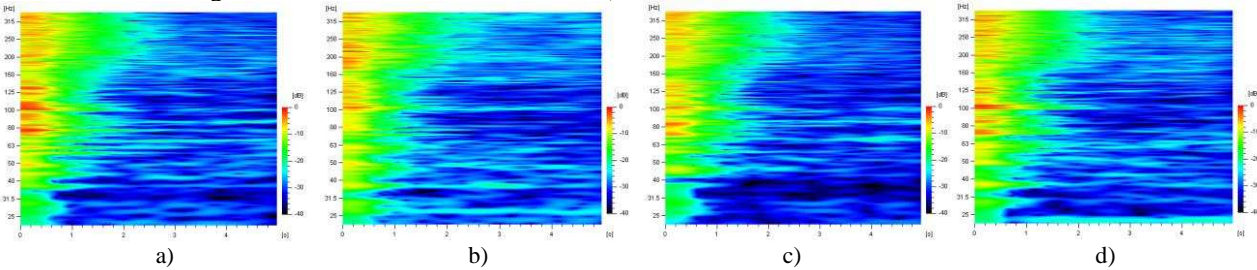


Figura 27: Análisis ETF Aula 708: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>

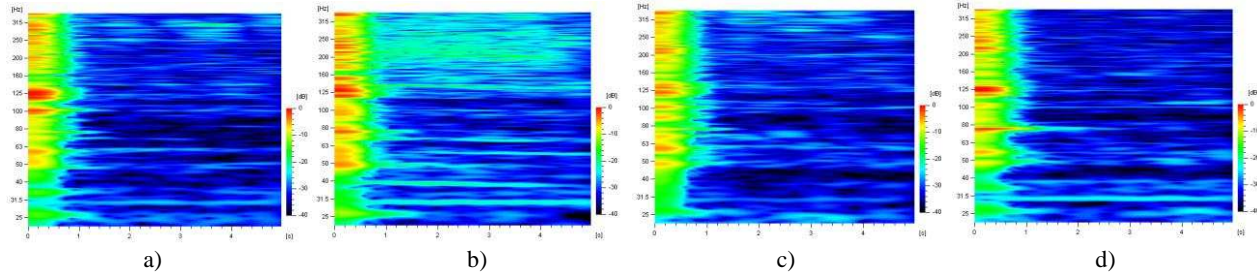


Figura 28: Análisis ETF Aula 154: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>

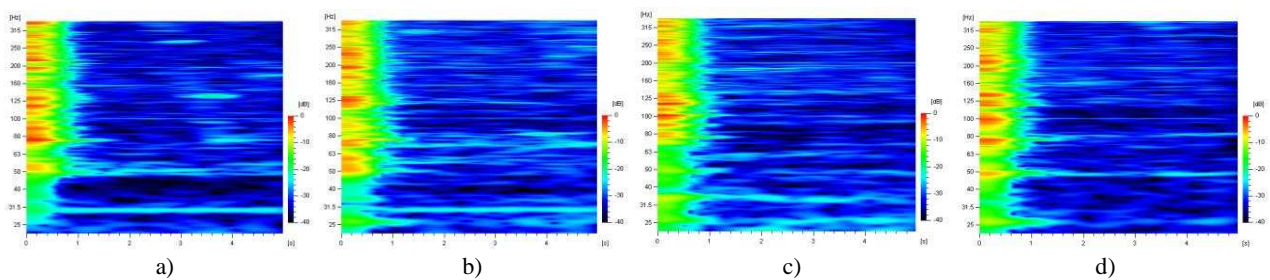


Figura 29: Análisis ETF Aula 154: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>

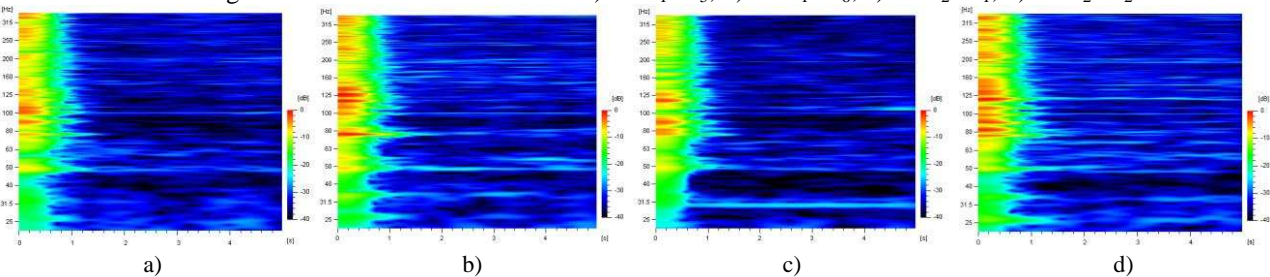


Figura 30: Análisis ETF Aula 154: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>



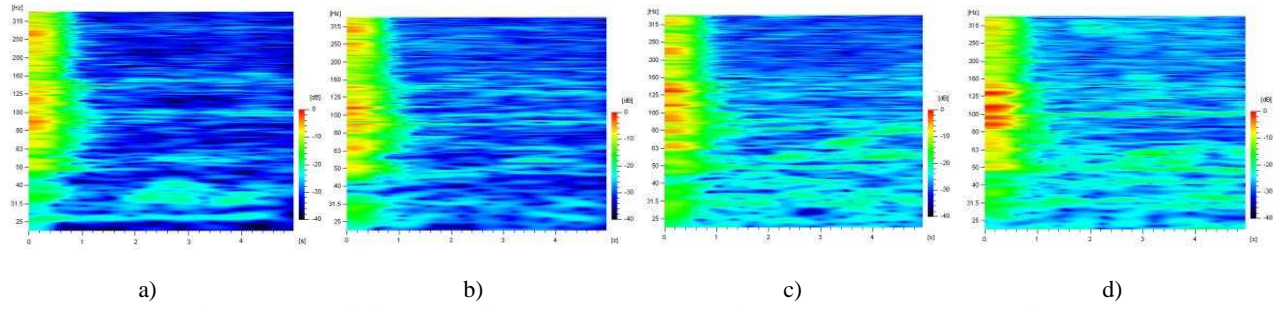


Figura 31: Análisis ETF Aula Magna: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>

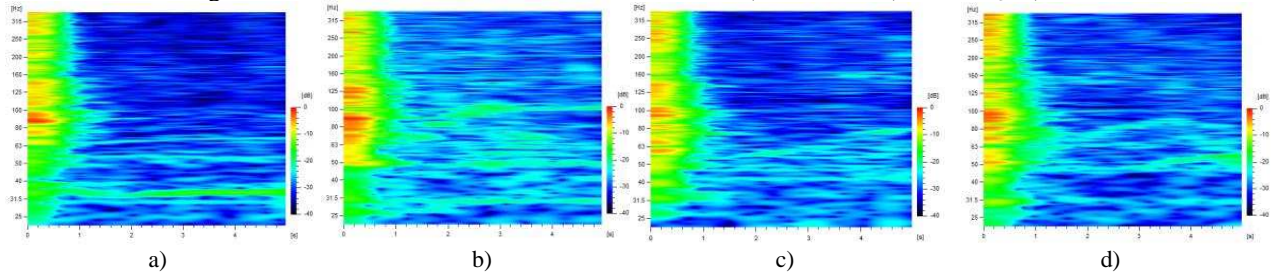


Figura 32: Análisis ETF Aula Magna: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>

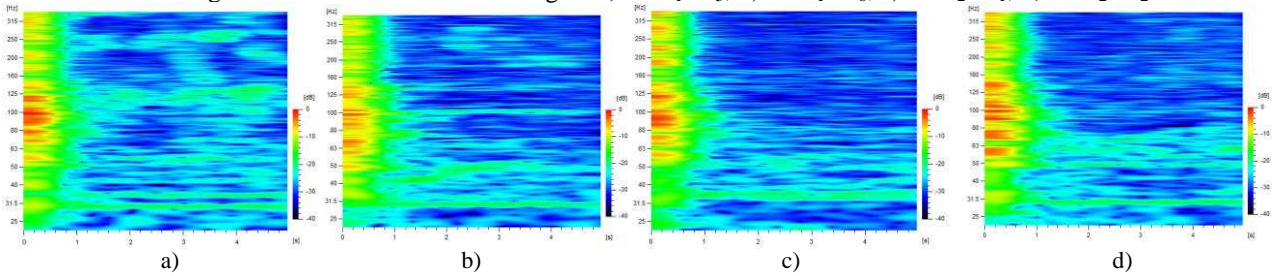


Figura 33: Análisis ETF Aula Magna: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>

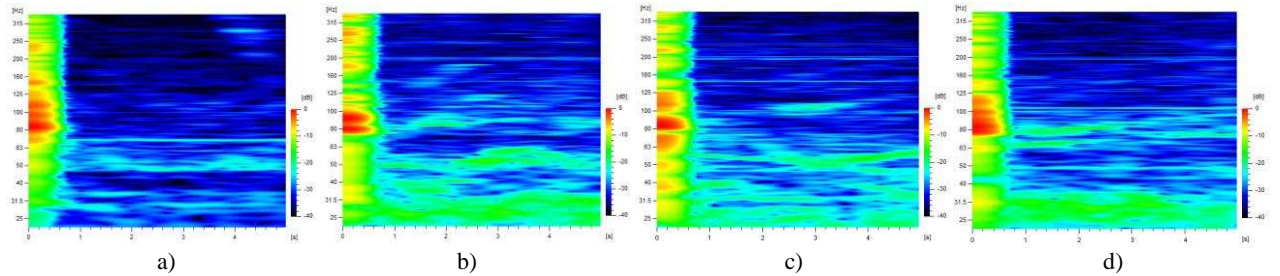


Figura 34: Análisis ETF Aula/SUM: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>; c) FSO<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>; d) FSO<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>

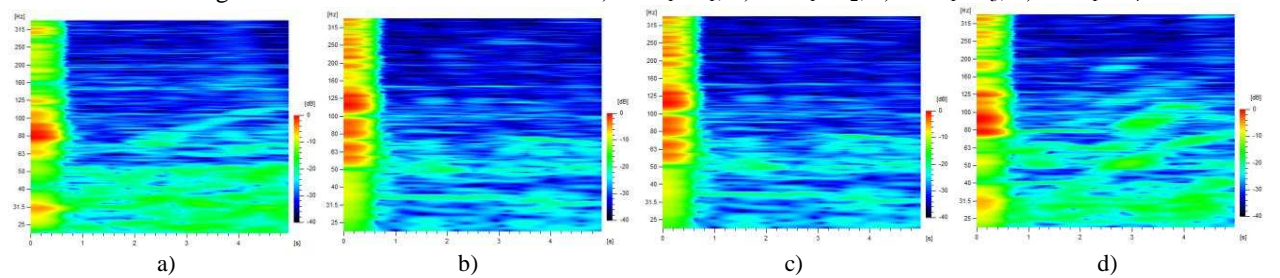


Figura 35: Análisis ETF Aula/SUM: a) FSO<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>; b) FSO<sub>1</sub>-M<sub>6</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>

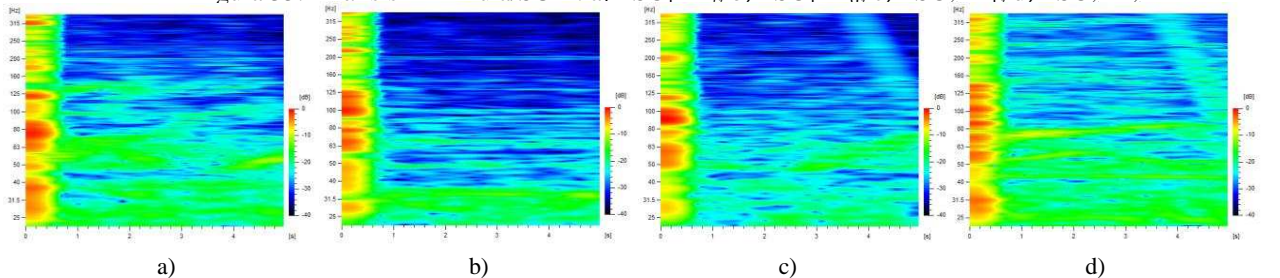
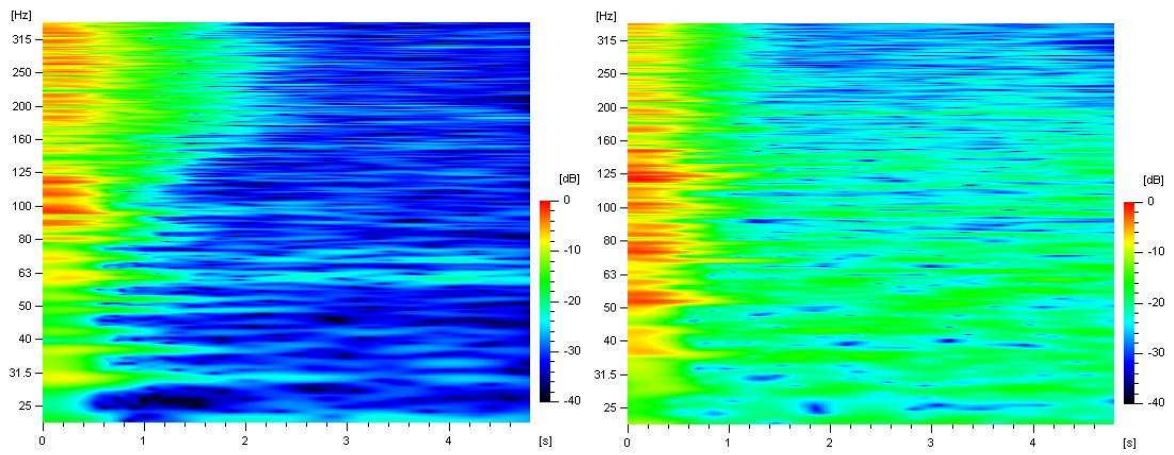


Figura 36: Análisis ETF Aula/SUM: a) FSO<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>; b) FSO<sub>2</sub>-M<sub>4</sub>; c) FSO<sub>2</sub>-M<sub>5</sub>; d) FSO<sub>2</sub>-M<sub>6</sub>

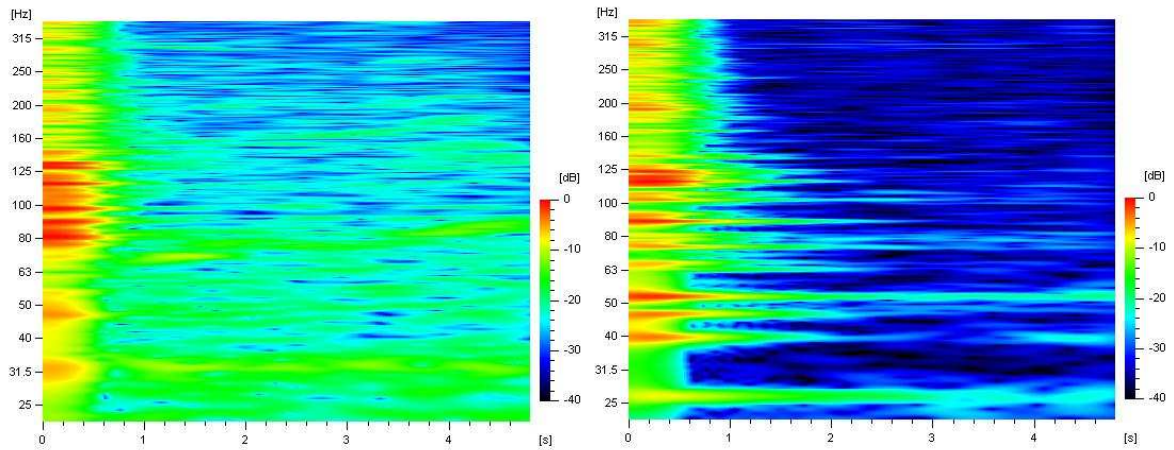


### 4.3 Resultados - Criterio Promedio Modal



a)

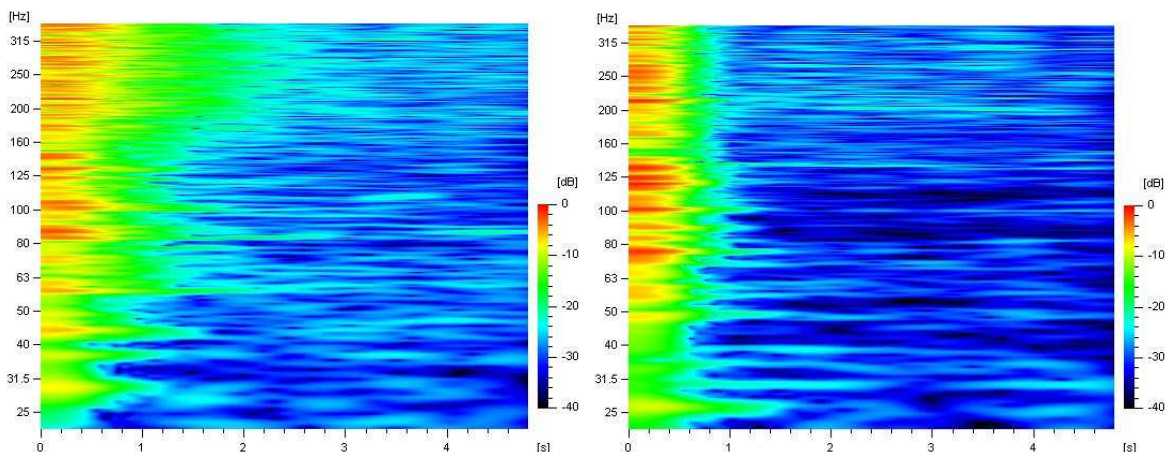
b)



c)

d)

Figura 37: Análisis ETF a) Aula 608; b) Aula 015; c) Aula 225; d) Aula 011



a)

b)



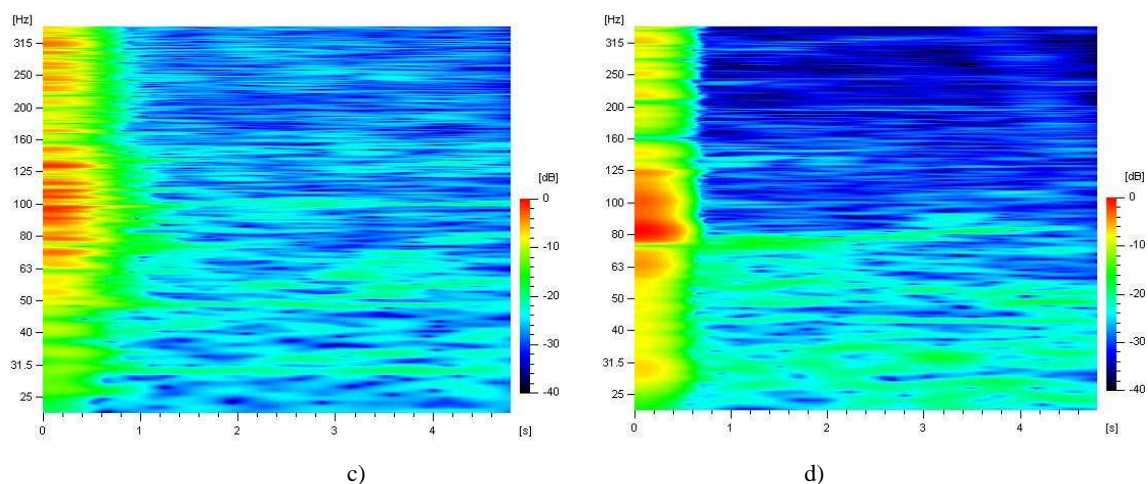


Figura 38: Análisis ETC: a) Aula 708; b) Aula 154; c) Aula magna “Mari Curie”; d) Aula/SUM.

## 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El campo sonoro en 7 de los 8 recintos evaluados utilizados para el proceso de enseñanza-aprendizaje de la FRC UTN, presenta significativas coloraciones espectrales debido a la existencia de ondas estacionarias ó modos propios de vibración producida por interferencias constructivas y destructivas de ondas. El Aula/SUM, es el único recinto que presenta una adecuada respuesta en bajas frecuencias por haber sido diseñado y construido recientemente, priorizando requerimientos acústicos, lumínicos y térmicos.

El análisis de ETF aplicando el criterio modos totales (MT), evidencia la existencia de marcadas coloraciones para el espectro contenido entre 20 y 160 Hz en casi todos los recintos estudiados, prolongando el tiempo de reverberación en bajas frecuencias por encima de los 2,00 s en general y superando los 3,00 s para el caso particular del Aula 011.

Por otra parte, el análisis de ETF realizado por los tres criterios (MT, MP y PM), evidencia la ausencia de pautas de diseño acústico de recintos que contemple la distribución en frecuencia de los MPV, debido al marcado solapamiento de los MPV en espectros angostos de frecuencia, con excepción del Aula/SUM.

Los resultados obtenidos aplicando el criterio promedio modal (PM), evidencian la gran variabilidad de la distribución de los MPV en la frecuencia para las aulas estudiadas, las cuales se clasifican como recintos pequeños, de geometría rectangular y con volúmenes en general inferiores a 300 m<sup>3</sup>.

El estudio y efecto de los MPV en aulas es un tema de actual interés por diferentes investigadores. Las normas internacionales sobre diseño acústico de aulas, como ANSI S12.60:2012, no especifican recomendaciones sobre la correcta distribución de los MPV, considerando únicamente el tiempo de reverberación en frecuencias medias y el nivel de ruido de fondo.

## 6 AGRADECIMEINTOS

A la Secretaria 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.

## 7 REFERENCIAS

ANSI S12.60:2002, Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools.

- Bradley J.S., Speech intelligibility studies in classrooms. *Journal Acoustical Society of America*, 80 (3) 846-854, 1986
- Cravero G A., Ferreyra S P., Ramos O A., Tommasini F., Araneda M., Base de Datos de Mediciones de Respuestas Impulsivas de Recintos con Diferentes Características Acústicas. *Mecánica Computacional*, Vol. XXX, págs. 3125-3143. Actas del 19<sup>no</sup> Congreso sobre métodos numéricos y sus aplicaciones ENIEF 2011. Rosario. Argentina. 1 al 4 de noviembre de 2011.
- Ercoli L, Azzurro A. Case study: the acoustical characteristics of typical argentinean classrooms. *Build Acoust* 2001; 8(4):301–10.
- Farina, A., Simultaneous measurements of impulse response and distortion with a swept-sine technique. Proc. 108<sup>th</sup> Convention of Audio Engineering Society, Paris, Francia, 2000
- Ferreyra, Sebastián P.; Cravero, Gabriel A.; Ramos, Oscar A. (2012); Tommasini F., Araneda M.. “Identificación y análisis de modos propios de recintos a partir de sus respuestas impulsivas”. *Mecánica Computacional*, Vol. XXXI, pp. 3969-3989. Actas del 10<sup>mo</sup> Congreso sobre Mecanica Computacional MECOM 2012. Ciudad de Salta, República Argentina. Del 13 al 16 de noviembre de 2012.
- Ferreyra S.P., Esquinas P.B., Orecchia I., Elías J.M. “Diseño y construcción de una cadena de instrumentación electroacústica para la medición de la respuesta al impulso de recintos según norma ISO 3382. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVIII, págs. 63-72. Actas del 18<sup>vo</sup> Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF 2009, ciudad de Tandil, Argentina del 3 al 6 de Noviembre de 2009.
- Ferreyra S.P. y Ramos O.A., Análisis espacial de parámetros acústicos de recintos a partir de MRIR y BRIR. Actas del VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008. Buenos Aires, República Argentina. Del 5 al 7 de Noviembre de 2008.
- Ferreyra, S. P. y Ramos, O. A. Análisis físico-acústico-espacial de respuestas impulsivas de un recinto con alta dispersión sonora obtenidas por métodos indirectos. *Mecánica Computacional*, 26, pp 3-14, ISSN: 1666-6070. Procedimientos del 26<sup>to</sup> Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2007), Córdoba, Argentina, 2-5 de Octubre, 2007
- Fuchs G.L. y Lara Saenz A., Bases de diseño y control acústico del hábitat. Dirección General de Publicaciones de la Universidad Nacional de Córdoba. ISBN N: 950-33-0057-6. Córdoba. Argentina. 1993.
- ISO 3382-2:2008, Acoustics—Measurements of room acoustics parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. 2008.
- IRAM 4109-2:2011 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2 – Tiempo de reverberación de recintos comunes.
- Kudsen C.O. & Harris C.M., *Acoustical designing in architecture*, ASA, 1964.
- Morse P. M., *Vibration and sound*”, 2<sup>nd</sup> Edition. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1948.
- Nilsson E., Room acoustics measures for classrooms, Proc. *Internoise 2010*, 13-16 de june, Lisbon, Portugal.
- Schröder M., The Schroeder frequency revisited. *Journal Acoustical Society of America*, 99 (5) pp. 3240, 1996
- Schröder M., New method of measuring reverberation time, *Journal Acoustical Society of America*, 37:409-412, 1965