

Primer Parcial Instrumentos y Mediciones Acústicas

UNTREF

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE TRES DE FEBRERO**

Jonathan D. Freidkes

Ingeniería de sonido – Universidad Nacional de Tres de Febrero
Tema 2.

Profesor: Alejandro Bidondo

Adscriptos: Leonardo Funes – Esteban Lombera

14 al 16 de Octubre de 2017.

Índice

ÍNDICE	1
LABORATORIO DE MEDICIÓN	2
LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO	2
PROCESO DE DISEÑO Y CÁLCULO	3
ÁREA EQUIVALENTE DE ABSORCIÓN	5
COMENTARIOS Y VISTAS	5
SALAS Y TEATROS – DISEÑO – ABSORCIÓN DE BUTACAS – KATH & KUHL	9
CONSIDERACIONES GENERALES	9
BUTACAS Y ARREGLOS DE ASIENTOS	9
VOLUMEN APROXIMADO	12
RT OBJETIVO	13
INTERFAZ AUDITORIO – ESCENARIO	13
MÉTODO DE KATH & KUHL	14
RT CON MATERIALES EN LA SALA	16
PLANOS Y DISEÑO 3D	18
PREGUNTAS TEÓRICO-PRÁCTICAS	21
PREGUNTA ‘A’	21
PREGUNTA ‘B’	21
PREGUNTA ‘C’	21
PROCESAMIENTO DE SEÑALES	23
CROSSOVER TIME RELATIVO	24
$\tau_{AE} (\tau_E)$	26
REFERENCIAS	29

Laboratorio de medición

Lineamientos para el diseño

La Norma UNE-EN ISO 354:2003 es un estándar español para “Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”, que contiene recomendaciones y lineamientos sobre cámaras reverberantes para las mediciones ahí efectuadas. Da varias indicaciones importantes respecto de dimensiones, relación entre medidas y volumen y áreas de absorción máximas para obtener validez en las mediciones. Como la consigna del examen solicita el diseño de una cámara reverberante que permita mediciones válidas desde 125 Hz cumpliendo con esta normativa, se acude a la misma para obtener los requisitos mínimos de diseño. Los factores más importantes a cumplir globalmente serán:

- Volumen de la cámara entre 150 y 500 m³, recomendando el valor de 200 m³ en varios cálculos.
- Diagonal mayor debe medir como máximo: $I_{max} < 1.9 * V^{1/3}$ (donde V es el volumen de la cámara en metros cúbicos).
- Para obtener validez en las mediciones de baja frecuencia, ninguna longitud debe ser múltiplo entero de otra. Adicionalmente, con la exigencia de mediciones a partir de 125 Hz, se halla que como mínimo, las longitudes deben superar esa longitud de onda, calculada sencillamente dividiendo la velocidad del sonido por la frecuencia. Tomando c = 343 m/s, se obtiene una longitud de onda de 2.74 m, con lo cual ninguna medida de la cámara debe ser inferior a ese valor.
- Se debe proveer “suficiente difusión” para lo cual se recomienda el uso de difusores variados, como se muestra en el Anexo A del estándar. Los mismos pueden ser fijos o giratorios (en ese caso la velocidad de rotación no puede tener relación de número entero con la frecuencia de repetición de las mediciones), deben ser láminas de baja absorción y con una densidad recomendada de 5 kg/m². Se recomiendan variedad de tamaños, entre 0.8 y 3 m², en superficies curvadas, orientadas al azar.
- La humedad relativa debe estar entre 30 y 90 % y la temperatura debe ser de al menos 15 grados Celsius.
- Se da una tabla con áreas de absorción equivalentes por tercio de octava para cámaras de 200 m³, brindando un factor de corrección para los casos en que fuera distinto el volumen. Se transcribe la misma en la Tabla 1. Además se exige en la norma que los valores de A no difieran más de un 15% respecto de la media de sus valores contiguos.

100	125	160	200	250	315	400	500	630	Hz
6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	m ²

800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	Hz
6.5	7	7.5	8	9.5	10.5	12	13	14	m ²

Tabla 1:Máximas áreas de absorción permitidas por la norma UNE-EN ISO 354.

Asimismo, la consigna del examen también impone restricciones de paralelismo, longitudes de lado y altura máxima. Dadas estas condiciones, se decide basar el diseño en las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 354 y en cumplir lo

exigido por la consigna, más allá de conocer que existen otros criterios que aportarían a un mejor diseño, principalmente en relación de longitudes por la distribución modal obtenida, como es dado en la norma IRAM 3741 que da proporciones para el diseño modal. También hay recomendaciones de criterios modales, como los de Bolt, Bonelo y otros, pero son principalmente para recintos paralelepípedicos, pero no podría ser aplicado ya que una de las exigencias de la consigna es no tener superficies paralelas.

Proceso de diseño y cálculo

Para iniciar el diseño, elegí un polígono de lados impares para lograr desde un principio evitar superficies paralelas. Por la facilidad de creación de las figuras poligonales en el software de CAD utilizado (Google Sketchup), se partió de un heptaedro regular, de lados iguales. Evidentemente, como la normativa exige para validar mediciones de baja frecuencia que no hayan dimensiones con relación de números enteros, decidí deformar sutilmente la figura base para llegar a un diseño apenas distinguible de un heptaedro, que cumpla de todos modos lo exigido. Así es como obtuve una figura para la planta del laboratorio de medición, siempre considerando el área de diseño, ya que al momento de imponer la altura, me convendría diseñar una cámara de 200 m³ para facilitar cálculos y estar en los valores ideales dados por la normativa aplicada. Con el valor de volumen de diseño definido, aplicando la fórmula de la norma para la diagonal mayor, se obtuvo un valor máximo de 11.11 metros. Para asegurarme estar dentro de lo exigido, decidí dibujar un cuadrado con diagonal de 11 metros, dibujando la planta del laboratorio por dentro, asegurándome que ninguna medida saliera de esa zona. Se muestra en la Figura 1 la planta del laboratorio diseñado con sus medidas de lado y los ángulos necesarios entre caras.

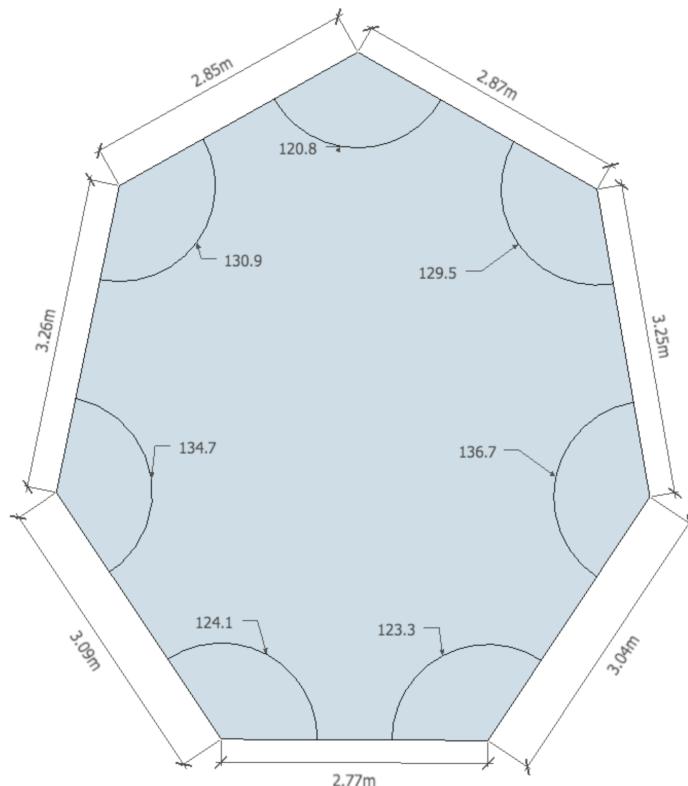


Figura 1: Planta del laboratorio de medición diseñado.

Con el fin de evitar paralelismo entre el techo y el piso, decidí cortar la planta en dos mitades prácticamente iguales, teniendo distintas alturas para cada una y así lograr un techo inclinado que cumpliera con ese requisito. Así, se estima el volumen total de la cámara y se muestra junto con el área de planta obtenida en la Tabla 2.

Área de planta total	32.79	m^2
Área planta 1	16.43	m^2
Área planta 2	16.36	m^2
Altura planta 1	6.15	m
Altura planta 2	6	m
Volumen 1	101.04	m^3
Volumen 2	98.16	m^3
Volumen total estimado	199.20	m^3

Tabla 2: Medidas de planta y volumen estimado.

Se muestra en la Figura 2 una vista exterior en perspectiva de la cámara diseñada.

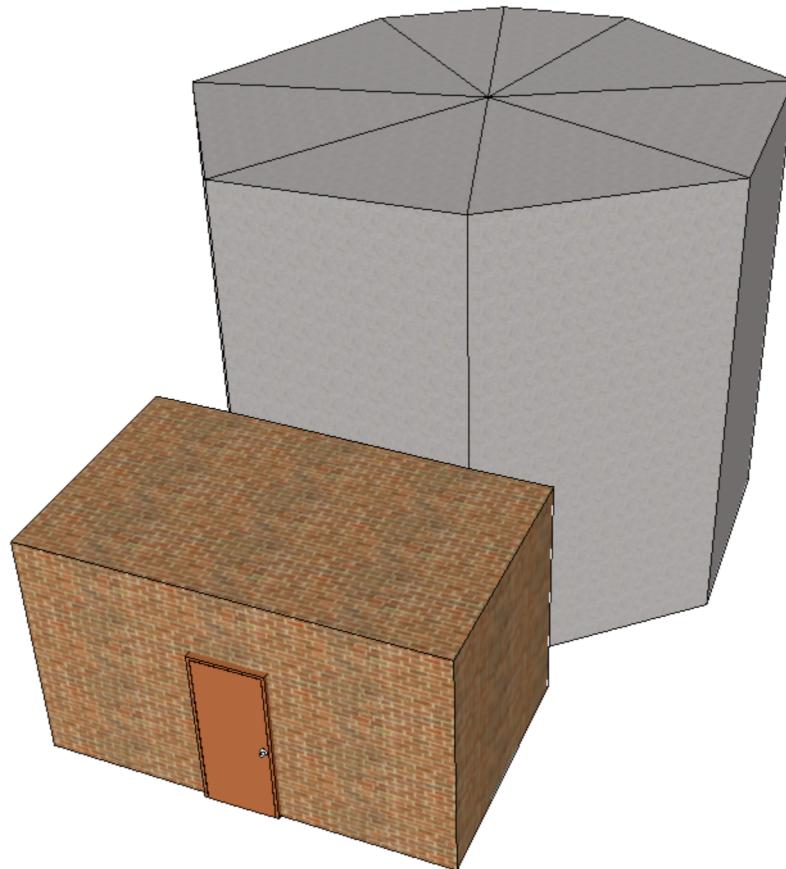


Figura 2: Perspectiva 3D de la cámara reverberante diseñada con la sala de control incluida.

Área equivalente de absorción

Para evitar cualquier tipo de absorción y cumplir con lo establecido por el estándar para área equivalente de Sabine, decidí utilizar materiales altamente reflectantes para todas las superficies en juego. En la Tabla 3 está el detalle de materiales (obtenidos del libro de Cox y D'Angelo[1]), las áreas de absorción y el RT logrado para la cámara.

Ítem	Material	Área [m ²]	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	Concrete block, painted	32.79	0.1	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
	Absorción Sabine		3.27	1.63	1.96	2.29	2.95	2.62
Paredes y techo	Smooth unpainted concrete	157.72	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
	Absorción Sabine		1.57	1.57	3.15	3.15	3.15	7.88
Puerta	Steel door	3.89	0.13	0.09	0.08	0.09	0.11	0.11
	Absorción Sabine		0.50	0.35	0.31	0.35	0.42	0.42
Absorción máxima ISO 354			6.5	6.5	6.5	7	9.5	13
Absorción Sabine total obtenida			5.36	3.56	5.43	5.79	6.53	10.93
RT cámara reverberante			5.98	8.99	5.90	5.52	4.90	2.93

Tabla 3: Materiales y absorción de la cámara diseñada.

Así, se verifica que el laboratorio de medición diseñado cumple con lo especificado en la norma UNE-EN ISO 354 para área de absorción máxima exigida.

Comentarios y vistas

Se agregó un control para el laboratorio, que a pesar de que no era exigido en la consigna, es importante que esté y también se pusieron a modo de ejemplo algunos difusores colgantes y rotativos dentro de la sala.

Hay varias consideraciones constructivas que exceden el presente examen pero son importantes de mencionar: aislamiento adecuado para la cámara para poder tener un bajo ruido de fondo y que las curvas de medición lleguen a notar la extinción de la energía con el valor más cercano a RT_{60} posible, patcheras para cableado que no tengan coincidencia en posición entre la sala y el control para evitar bajas en el aislamiento, refuerzo en las puertas para evitar filtraciones de ruido indeseado, soporte para montaje de piezas, etc. La forma diseñada es muy compleja de realizar constructivamente, lo que requeriría especial atención en las medidas y formas ya que en caso de no tenerlo, podría darse simetría o paredes paralelas, posibilitando la influencia de distribuciones modales indeseadas que falseen la medición, especialmente en baja frecuencia.

Se presentan a continuación todas las vistas isométricas del diseño, sin el cuarto de control para facilitar la visualización de la cámara exclusivamente. Las Figuras 3 a 7 presentan vista frontal, trasera, lateral izquierda, lateral derecha y en corte con difusores de ejemplo montados, respectivamente.

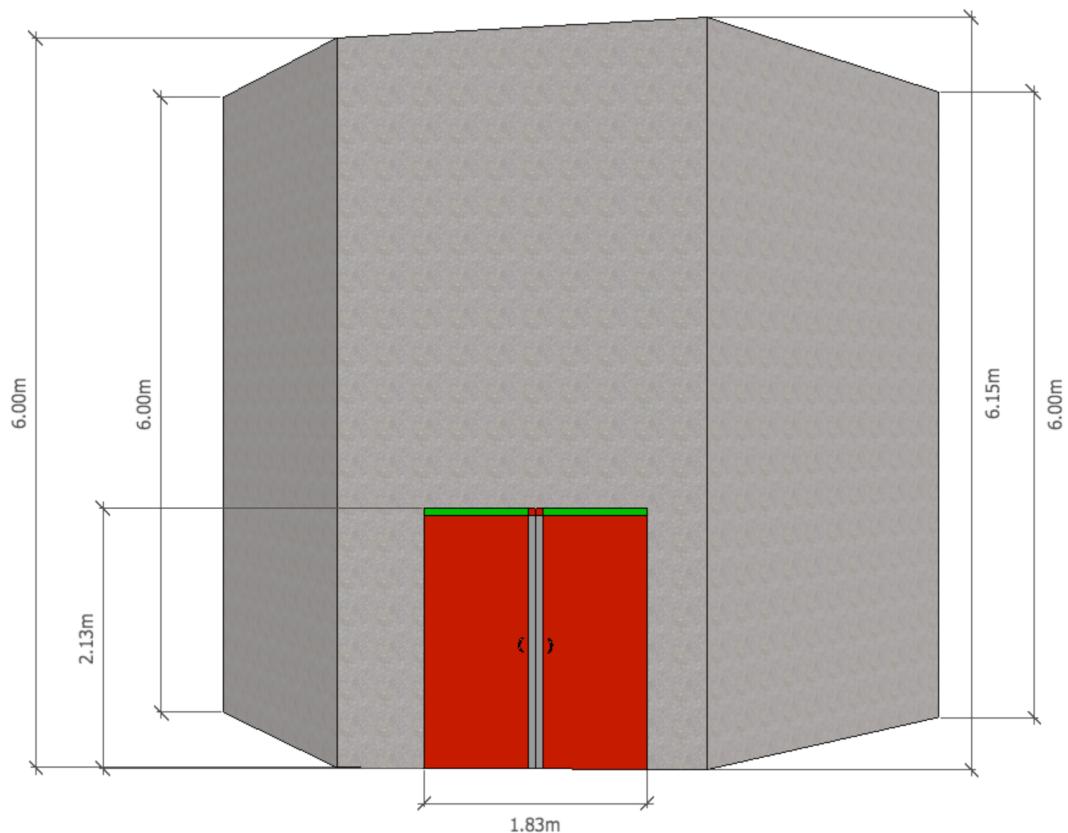


Figura 3: Vista frontal de la cámara reverberante.

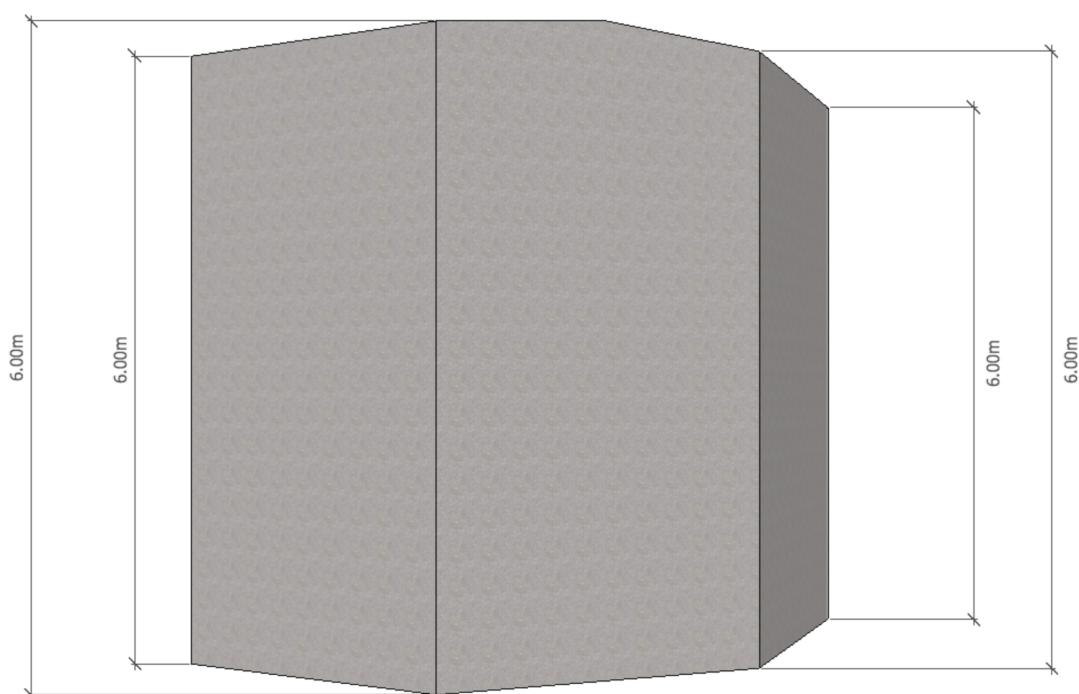


Figura 4: Vista trasera de la cámara reverberante.

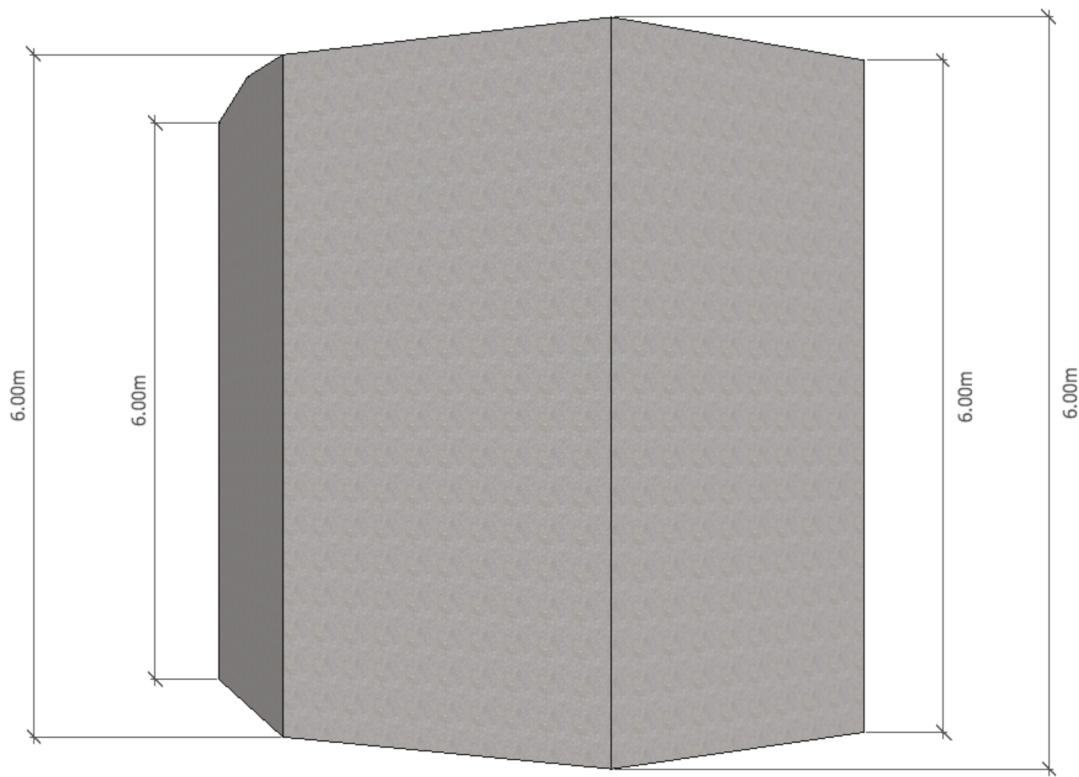


Figura 5: Vista lateral izquierda de la cámara reverberante.

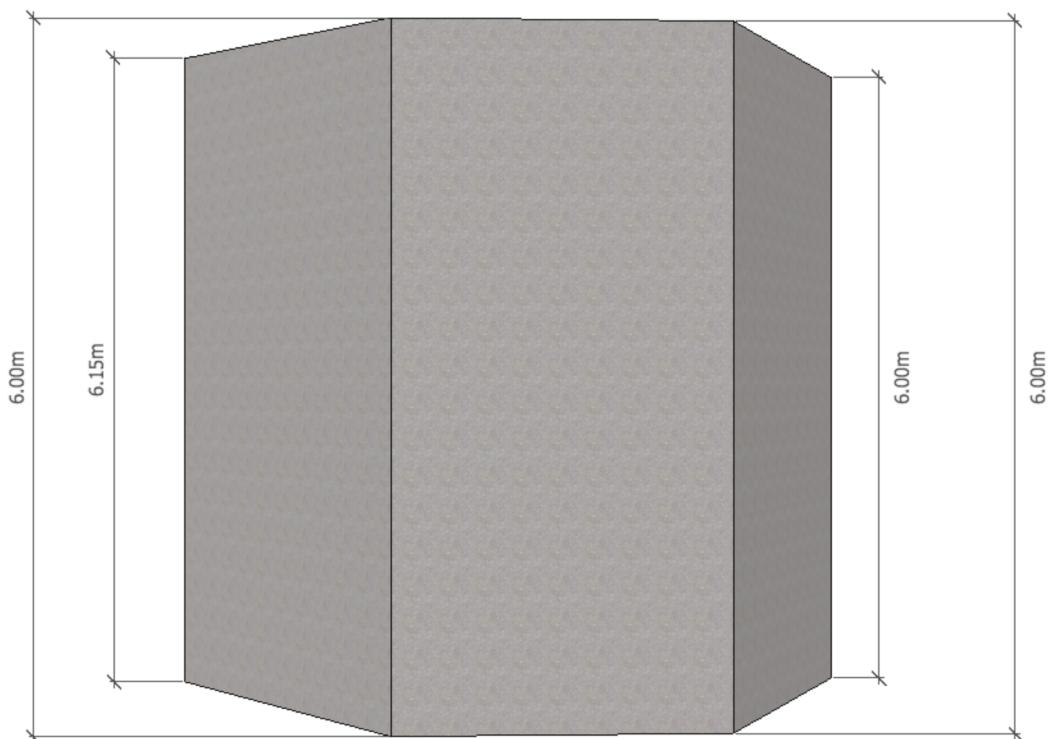


Figura 6: Vista lateral derecha de la cámara reverberante.

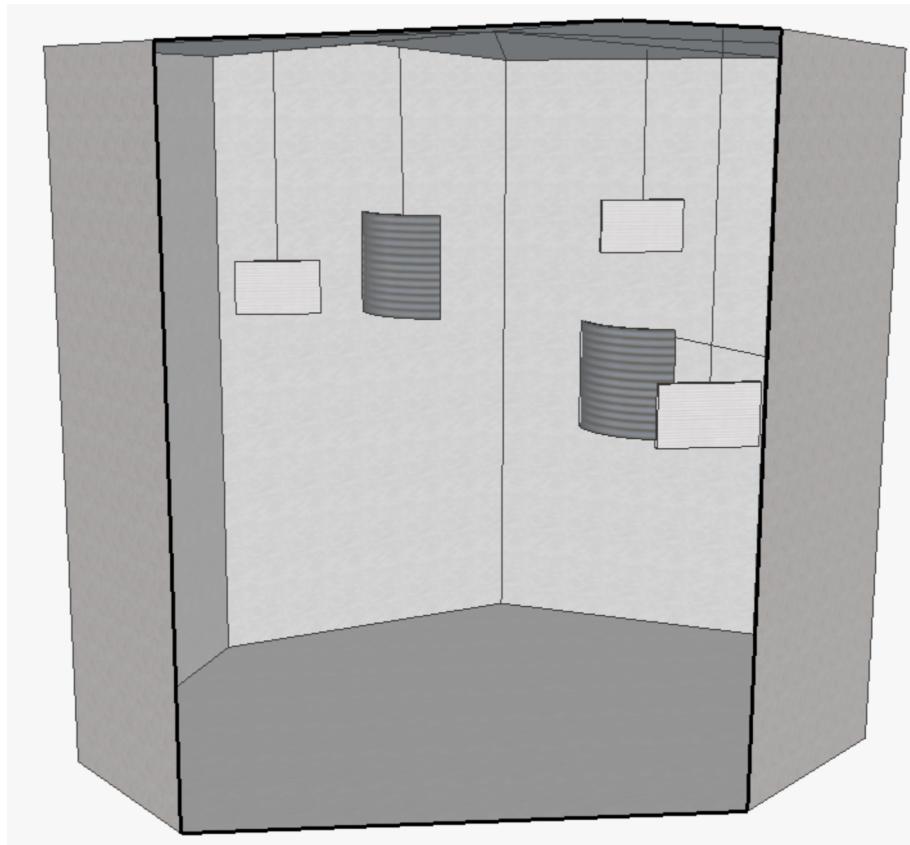


Figura 7: Vista en corte con los difusores rotativos en el interior.

Salas y teatros – Diseño – Absorción de butacas – Kath & Kuhl

Consideraciones generales

Inicialmente, en base a los requerimientos para el diseño, puede seguirse la manera usual y sencilla de comenzar el diseño de salas de concierto de la siguiente manera:

1. Definición de cantidad de butacas: 3000.
2. Volumen por persona: entre 8 y 15 m³.
3. Profundidad de la sala: relación con el parámetro G (strength), el cual para igual cantidad de espectadores con 10 m³ por persona, da 40 metros para obtener un factor $G > 0$ dB (valor obtenido de las presentaciones de la materia).
4. Layout clásico: elegí *fan shape*, ya que es la mejor forma de distribuir gran cantidad de gente en una única planta, variando el ángulo de apertura, cuando al realizar algo como un *shoebox* podría darse demasiado largo (mayor a 40 metros) o demasiado ancho (recinto muy cuadrado también complica la vista de las primeras filas al escenario).
5. Altura definida por cielo raso y su elevación para llegar al volumen total requerido basado en el volumen por persona.

Un gran beneficio de tener un diseño *fan shape* es que el radio de curvatura es constante, con el punto focal preferido en el diseño. Lo bueno es que al tener las filas un radio constante, los parámetros dependientes del espacio (distancia) son constantes en un gran rango, como por ejemplo el strength (G), será igual en todas las últimas filas, teniendo que superar los 0 dB.

Butacas y arreglos de asientos

De acuerdo al código de edificación para espectáculos públicos de la Ciudad autónoma de Buenos Aires [2], el máximo de personas por fila será de 16 personas, lo cual ya plantea una primera limitación para el cálculo de ángulo de apertura de la forma elegida. Se obtiene la información técnica de las butacas fabricadas por la empresa Rassegna (con oficinas en CABA), de las pocas del país que poseen mediciones de sus productos, en este caso, por tercio de octava, medido en el Laboratorio de acústica y luminotecnia de La Plata. Por la posibilidad de variar la espuma de relleno (para observar distintas condiciones y su influencia en el RT de la sala) y por su agradable forma, se eligen las butacas del modelo Z2 curva, de las cuales se muestra un croquis en la Figura 8 (verificando el cumplimiento de las normativas municipales) y su información de absorción en la Figura 9. Se anexa el informe de las mediciones completas encargadas por la firma en cuestión.

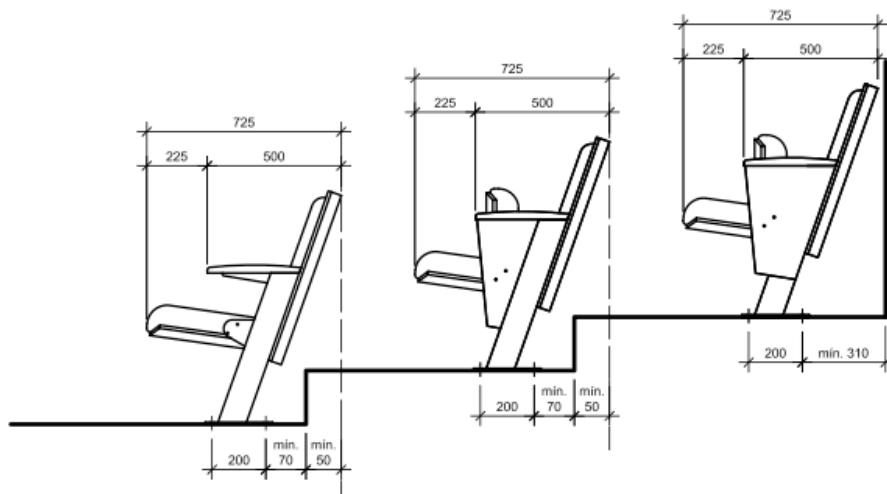


Figura 8: Croquis de butacas elegidas, fabricante Diseño y Equipamiento S.R.L.

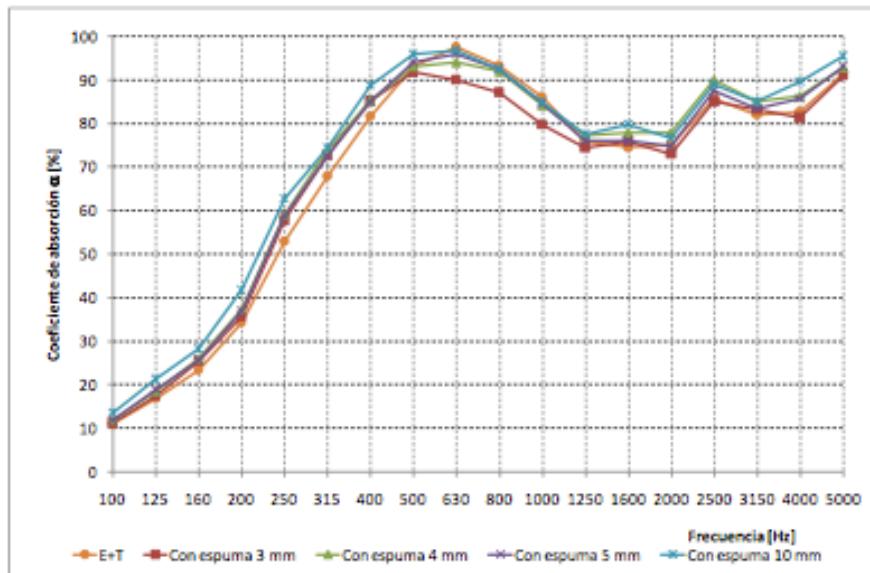


Figura 9: Información de absorción según relleno de espuma para butacas, fabricante Diseño y Equipamiento S.R.L.

Trasladando esas medidas a butacas propias de Google Sketch Up, se logra encontrar un boceto de una distribución posible, contemplando la cantidad de personas que entran en cada sub-área. Se muestra en la Figura 10 una porción de butacas en detalle con sus medidas entre filas y su ancho y en la Figura 11 la distribución de todas las butacas en un área máxima de 16 butacas en la sección para luego repetir esa forma en todo el auditorio.

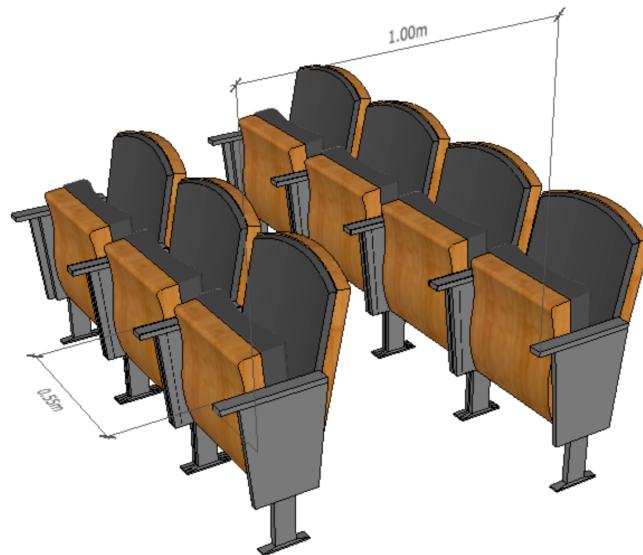


Figura 10: Butacas utilizadas en Sketchup simulando el modelo elegido.

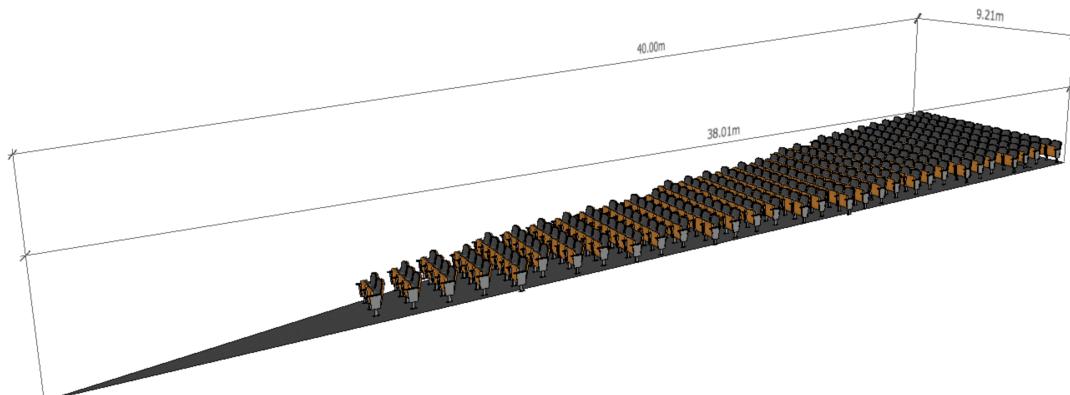


Figura 11: Conjunto completo de butacas con máximo de 16 personas por fila.

Así se logra observar que en la porción de auditorio mostrada entran 299 personas, por lo que se necesitarán 10 áreas como la mostrada para completar el total de asientos requeridos en el auditorio. Elegí una inclinación de público de 10 grados (dentro de los valores recomendados usualmente) para sustentar con soporte visual la intención de lograr un $G > 0$ dB, teniendo en cuenta el efecto subjetivo que tiene poder visualizar la fuente sonora y así cambiar la percepción de loudness dentro del recinto. Es importante notar que el arreglo de butacas también se ha hecho de manera intercalada con el fin de no provocar obstrucción visual de una fila con su contigua. Por otro lado, según el código de edificación vigente, al exceder las 50 personas por grupo en cada área, los pasillos laterales se calculan según:

$$ancho_{pasillo} = 1.1 + \frac{0.15(300-50)}{50} \quad (1)$$

Esto da un valor mínimo de pasillo de 1.85 metros, con barandas que deberán tener una altura mínima de 85 cm, como es requerido. Calculando los pasillos con un excedente, teniendo 2 metros de para tener mejor circulación y por algún exceso de butaca sobre el pasillo que quita algunos centímetros, se modela la estructura básica para definir el grado de apertura del *concert hall*, como se muestra en la Figura 12.

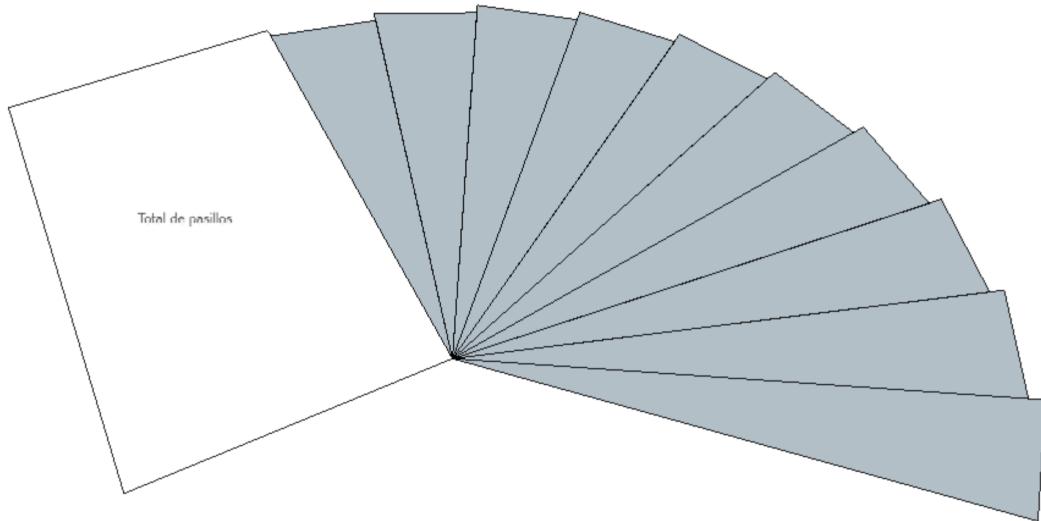


Figura 12: Cálculo previo de apertura total del auditorio.

Así, se observa con las herramientas del software de CAD, una apertura total de 226 grados de apertura para poder albergar la cantidad de gente requerida y cumplir con la reglamentación vigente en forma simultánea.

En otras temáticas también abordadas, es importante que los accesos a la sala cumplan con la regulación dada por el código de referencia. Allí se indica la forma de determinación de ancho de puertas, dando un mínimo de alto de 2 metros. Se calcula el ancho mínimo de acuerdo a:

$$\text{ancho}_{\text{accesos}} = 0.9 + \frac{0.15(300-50)}{50} \quad (2)$$

Así, se conoce que el ancho mínimo de las puertas de acceso deberá ser de 1.65 metros.

Volumen aproximado

Luego de estos cálculos preliminares, proseguí a distribuir las butacas efectivamente en el volumen supuesto. En eso, noté que sobraban butacas, con lo cual decidí achicar el ángulo de apertura de la forma elegida, con el fin de tener mejor visualización de escenario desde los puntos más críticos (pasando los 90 grados para cada lado) y mantener siempre el número de 3000 espectadores. Con eso, logré cambiar la apertura a 206 grados, 20 grados menos de apertura que antes.

Teniendo la cantidad de espectadores exigida y aproximando el volumen por persona a los valores recomendados, se puede hacer una primera aproximación de forma del auditorio para calcular el volumen estimado y ver la altura necesaria para cumplir todas las exigencias. Se muestra ese acercamiento en la Figura 13 donde se ve la forma básica del auditorio diseñado. El software utilizado para el diseño (Google Sketchup) calcula un volumen total de recinto de 28656 m³, lo que

dividiéndolo por la cantidad de espectadores da un volumen por persona aproximado de 9.55 m^3 .

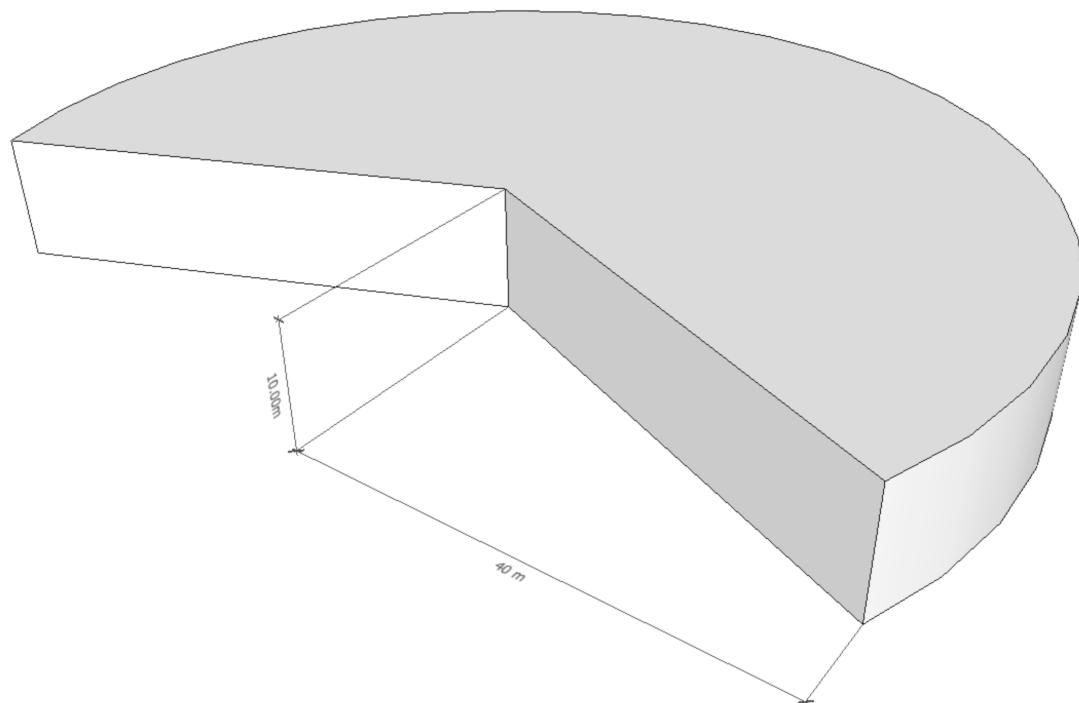


Figura :13 Modelado básico para cálculo de volumen.

RT Objetivo

Mediante el procedimiento seguido, al tener el volumen, se pueden observar variables respecto del tiempo de reverberación y áreas de absorción asociadas. Según Barron [3], para la aplicación buscada, puede hallarse el RT_{500} según:

$$RT_{500} = a + 2.306 * b * \log_{10}(v) \quad (3)$$

Siendo $a = -0.162$ y $b = 0.2$ para este caso, se obtiene un valor de RT_{500} de 1.91 segundos. Así se puede extraer mediante los índices de adaptación por octava datos y obtener los valores de tiempo de reverberación objetivo buscados, dados en la Tabla 4.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT objetivo	2.76	2.14	1.89	1.99	1.99	1.99	1.99

Tabla 4: RT objetivo por banda de octava según método de Barron.

Interfaz auditorio – escenario

Dada la exigencia de considerar que la caja de escenario se encuentra acoplada acústicamente a la sala, se torna necesario definir un coeficiente de absorción para la interfaz de contacto entre ambos.

Hay varios parámetros para caracterizar propiedades acústicas del escenario, de importancia para la percepción de los músicos ejecutantes, siendo uno de los más importantes el Stage support (early/late) que da la noción de cuánta energía retorna al músico para su percepción de ensamble de la orquesta como conjunto y no como instrumentos discretos. Esto implica ciertas limitaciones para la elección de

un coeficiente de absorción apropiado para el área de contacto escenario-sala ya que es evidente que no puede pertenecer a ningún extremo. Si fuera 0, toda la energía que llega al escenario se refleja, con lo cual también habría un gran aumento de SPL en el mismo escenario, generando problemas para los ejecutantes. Si fuera 1 también sería problemático, ya que elimina las reflexiones útiles para la percepción de los ejecutantes.

Gade [4] afirma que no hay aún respuestas certeras sobre el diseño de escenarios con criterios ampliamente aceptados, pero si hay preferencias sobre lo llamado *H/W ratio*, o sea la relación entre altura y ancho, que da percepción de reverberancia en la zona alta y evita reflexiones demasiado fuertes, molestas en instrumentos percusivos o de viento. Se generaron regulaciones también respecto de control de ruido a partir de 2008 en la Unión Europea por las altas dosis de energía acústica recibida por los músicos durante las ejecuciones. El tratamiento de este problema trae aparejadas soluciones que exceden el presente trabajo, pero es importante tener en cuenta la discusión entre el soporte acústico que debe tener el músico y el nivel al cual está expuesto, que no sea dañino para su salud, lo que nuevamente indica que los factores de absorción 0 ni 1 son útiles (obviamente son teóricos ambos, pero indicaría no usar materiales excesivamente reflectantes ni absorbentes).

En este sentido, me parece coherente tomar un valor promedio de absorción, que no sea demasiado absorbente ni reflectante. Es evidente que hacerlo constante en todo el espectro analizado desestimaría el comportamiento usual de materiales reales, donde casi siempre la absorción en alta frecuencia es mayor a la de baja, entonces una absorción equivalente de escenario podría seguir esos lineamientos. Me parece coherente plantear una absorción promedio de 0.5 en las frecuencias medias, con un incremento del 20% en alta frecuencia y un decrecimiento del 20% en baja. Se muestran los valores en la Tabla 5.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000	8000
alfa interfaz	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60

Tabla 5: Coeficiente de absorción por octava de la interfaz escenario – sala.

Método de Kath & Kuhl

El presente método de medición comprende una modalidad de obtención del coeficiente de absorción de una muestra de butacas en cámara reverberante pudiendo eliminar el efecto de borde. Es conocido que el mismo presenta una sobreestimación del coeficiente de absorción real, por lo que esta solución a través de 3 mediciones de RT en cámara reverberante en distintas condiciones de montaje logra suprimir el falseo de absorción por influencia del borde de la muestra. En el caso de este examen se simula la medición y se obtienen los valores intermedios, que en el caso real serían los valores medidos.

El proceso es metodológicamente sencillo: conociendo el tiempo de reverberación de la cámara de medición (RT_0) y su volumen, se puede rápidamente obtener el área equivalente de absorción (A Sabine) a través de la clásica y confiable ecuación de tiempo de reverberación de Sabine:

$$RT_{60} = 0.161 \frac{V}{A} \quad (4)$$

Donde V es el volumen del recinto y A es el área de absorción que se obtiene multiplicando el área geométrica por el coeficiente de absorción (α).

En el texto se analizará la resolución para la banda de 1 KHz, pudiendo encontrar los cálculos por octava en la hoja de cálculo adjunta al examen. Aplicando la ecuación (4) se obtiene $A_0 = 7.85 \text{ m}^2$.

Una vez obtenida el área de absorción de la cámara de ensayo, se procede a colocar el arreglo de butacas, en este caso de 12 m^2 , en una disposición de 4 metros de profundidad y 3 de frente, pudiendo ubicar en ese espacio 4 filas: 2 de 6 asientos y 2 de 5, dando un total de 22 butacas ensayadas. Una vez instaladas, se colocan unas barreras cubriendo la superficie de planta de 12 m^2 con espesor de 1 cm (como es indicado en el ensayo real) y 1 metro de altura. Al darse el volumen de planta de la cámara reverberante (45 m^2) y un volumen total de 200 m^3 , asumo una planta cuadrada de 6.71 m de lado ($\sqrt{45 \text{ m}^2}$) y una altura de 4.44 m ($200 \text{ m}^3 / 45 \text{ m}^2$). Con la disposición descripta anteriormente, se ensaya la medición de tiempo de reverberación (RT_1), logrando así obtener el área de absorción A_1 . En este caso, logro estimar A_1 para poder obtener el valor de RT_1 . Para ello utilizo la ecuación:

$$A_1 = A_0 + \alpha_{\text{butacas}} * S_{\text{butacas}} + \alpha_{\text{barreras}} * S_{\text{barreras}} \quad (5)$$

Como A_0 es conocido, S_{butacas} es 12 m^2 , S_{barreras} es 7 m^2 , α_{butacas} según el fabricante es 0.8 en 1 KHz, busco un valor en el libro de Cox y D'Antonio [1] para un material lo más cercano posible al estimado para las barreras. Encuentro el denominado *Plywood panelling, 1 cm thick* que en la frecuencia de análisis presenta una absorción de 0.09. Así calculo A_1 , obteniendo como resultado $A_1 = 18.68 \text{ m}^2$.

Siguiendo con el método Kath & Kuhl, lo próximo son 2 mediciones de tiempo de reverberación de la cámara en condiciones complementarias. Para obtener RT_2 se retira la barrera frontal y se deja la lateral, mientras que para RT_3 se hace lo contrario. En cada caso puedo calcular A_2 y A_3 respectivamente, ya que serán prácticamente iguales a A_1 , descontando el área Sabine de la barrera quitada en cada caso. Así obtengo $A_2 = 18.41 \text{ m}^2$ y $A_3 = 18.32 \text{ m}^2$. De esta manera, sencillamente recurriendo una vez más a la ecuación (4), logro obtener los valores de RT_2 y RT_3 a través de la ecuación (4). Es importante aclarar la diferencia en nomenclatura con lo exigido por la consigna, donde se considera RT_2 al caso sin barrera lateral y RT_3 al caso sin barrera frontal, invertido a mi análisis, lo que de todos modos se aclara en la Tabla 6 que muestra los resultados obtenidos como son pedidos en la consigna.

Barreras colocadas	RT [s]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
S_f, S_s	RT_1	4.18	2.48	1.78	1.72	1.61	1.32	1.07	s
S_s	RT_2	4.69	2.61	1.83	1.75	1.63	1.33	1.08	s
S_f	RT_3	4.89	2.66	1.85	1.76	1.64	1.34	1.08	s
-	RT_0	10.00	8.30	6.00	4.10	3.20	2.50	1.80	s

Tabla 6: Tiempos de reverberación obtenidos según método de Kath & Kuhl.

Con estos valores se logra calcular los índices α_∞ , α_f y α_s según las ecuaciones:

$$\alpha_\infty = \frac{A_1}{(l + \frac{\lambda}{8}) * (w + \frac{\lambda}{8})} \quad (6)$$

Donde l es el ancho de la barrera, w es la profundidad y cada λ según la frecuencia analizada.

$$\alpha_f = \frac{A_2 - A_1}{h * (w + \frac{\lambda}{8})} \quad (7)$$

Donde h es la altura de las barreras.

$$\alpha_s = \frac{A_3 - A_1}{w * (l + \frac{\lambda}{8})} \quad (8)$$

Así finalmente se logra calcular el coeficiente de absorción “real” de las butacas en cuestión a partir de la ecuación:

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\infty} + \alpha_f \frac{S_f}{S_p} + \alpha_s \frac{S_s}{S_p} \quad (9)$$

Donde S_f es la superficie de barrera frontal, S_s es la superficie de barrera lateral y S_p es la superficie de planta. Se muestran los resultados en la Tabla 7 que serán usados en los cálculos para el auditorio diseñado.

alfa	125	250	500	1000	2000	4000	8000
∞	0.53	0.98	1.43	1.52	1.65	2.02	2.51
f	-0.25	-0.21	-0.17	-0.09	-0.09	-0.11	-0.101
s	-0.08	-0.07	-0.05	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03
total	0.44	0.91	1.37	1.49	1.61	1.99	2.47

Tabla 7: coeficientes de absorción hallados.

RT con materiales en la sala

El único uso de material absorbente explícitamente, permitido a modo de alfombra será en los corredores, por la necesidad vista en cálculos intermedios de agregar cierta cantidad de absorción. Para ello, se utiliza una alfombra de hilos de algodón (*cotton carpet*) la cual iría pegada sobre el hormigón de piso directamente ya que su aplicación es más por necesidad de sumar área de absorción que por la forma de montaje que podría tener, como parte de un resonante o algo por el estilo. Se muestra a continuación en la Tabla 8 los valores de RT por octava obtenidos con los materiales utilizados para el auditorio diseñado.

Item	Material	Area	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Suelo Escenario	Wood, stage floor, 2 layers, 27 mm	85.24	0.10	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00
	A sabine		8.52	5.97	5.11	5.11	5.11	5.11	0.00
Suelo Inclinado	Audience floor, 2 layers, 33 mm	0	0.09	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.00
	A sabine		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Corredores	Cotton carpet	1141.1	0.07	0.31	0.49	0.91	0.66	0.54	0.48
	A sabine		79.88	353.74	559.14	1038.40	753.13	616.19	547.73
Pared de Escenario	Walls, hard surfaces average	102	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
	A sabine		2.04	2.04	3.06	3.06	4.08	5.10	5.10
Paredes	Thin carpet, cemented	2236.81	0.02	0.04	0.08	0.20	0.35	0.40	0.00

	A sabine		44.74	89.47	178. 94	447.3 6	782.88	894.7 2	0.00		
Techo	Plasterboard ceiling on battens	2865.5 6	0.20	0.15	0.10	0.08	0.04	0.02	0.00		
	A sabine		573.11	429.83	286. 56	229.2 4	114.62	57.31	0.00		
Puertas	Solid wooden door	51.02	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10		
	A sabine		7.14	5.10	3.06	4.08	5.10	5.10	5.10		
Interfaz escenario	Material supuesto	160.14	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60		
	A sabine		64.06	64.06	80.0 7	80.07	80.07	96.08	96.08		
Asientos (Desocupados)	Asientos Resegnaespuma intermedia 3mm	1657.7	0.18	0.58	0.92	0.80	0.73	0.81	0.91		
	A sabine		298.39	961.47	152 5.08	1326. 16	1210.1 2	1342. 74	1508. 51		
	Aire		0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03		
	Multiplicado por volumen		2.87	28.66	85.9 7	114.6 2	257.90	0	0		
Area Sabine total			1080.74	1940.3 3	272 7.00	3248. 12	3213.0 2	3796. 07	2936. 22		
RT unocc			4.27	2.38	1.69	1.42	1.44	1.22	1.57		

Tabla 8: RT de la sala diseñada con descripción de materiales y su absorción.

Los coeficientes de absorción de las butacas son tomados de los valores provistos por el fabricante. A pesar de que en el informe adjuntado por ellos, se explicita que la metodología implementada es la clásica y no aplicaron Kath & Kuhl, me pareció preferible sobreestimar esa absorción y no arrastrar un posible error de cálculo cometido anteriormente.

Finalmente se presenta una comparación del RT objetivo y el obtenido, en la Tabla 9 y Figura 14 con el fin de evaluar la exactitud del diseño y posibles mejoras en cada banda.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT objetivo	2.76	2.14	1.89	1.99	1.99	1.99	1.99
RT obtenido	4.27	2.38	1.69	1.42	1.44	1.22	1.57
Diferencia	154%	111%	89%	71%	72%	61%	79%

s
s

Tabla 9: RT objetivo de la sala comparado con el obtenido.

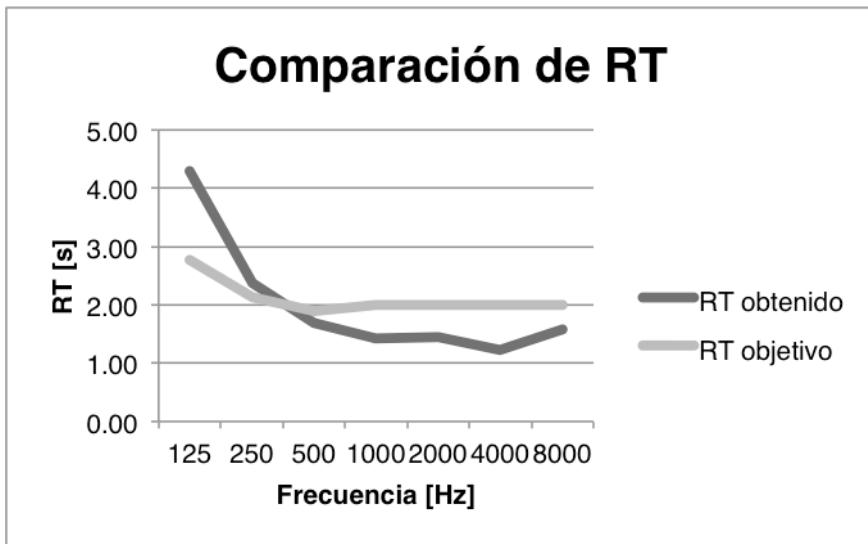


Figura 14: RT objetivo de la sala comparado con el obtenido.

Como se observa, los valores están relativamente cerca, pero con un corrimiento importante en baja frecuencia, visible en la banda de 125 Hz y un poco en 250 Hz, lo cual eventualmente podría ser tratado con resonadores de baja frecuencia o trampas de graves. Como la forma de atenuar RT era posible en este ejercicio solamente a través de alfombra, no resultó útil para el tratamiento de estas frecuencias, donde no tiene demasiada acción por si sola, sino en combinación quizás con un piso flotante o algo que logre atacar esta banda en particular.

Por otro lado, es importante notar siempre en auditorios donde haya una pared paralela al escenario que pueden darse reflexiones especulares que vuelvan al escenario y sean molestas para los ejecutantes, generando una repetición discreta audible que no es parte de la masa reverberante total. Esto puede ser evitado, o al menos minimizado, con la incorporación de difusión y/o absorción sobre esa pared. El material elegido debe ser diseñado según el área a abarcar, para evitar lo que muchas veces se hace pero es perjudicial, que es poner una unidad de difusión repetidas veces en forma continua. Esto perjudica al resultado global y baja la difusión total, generando un efecto adverso al deseado inicialmente. Es importante en ese caso buscar secuencias de mínima auto-correlación, para generar arreglos complejos que sumen difusión o directamente diseñar difusores para el área necesitada.

Planos y diseño 3D

Para el diseño de la sala pedida utilicé el software Google Sketchup, generando un modelo 3D a partir de las herramientas CAD que ofrece, con ciertos elementos descargados del *warehouse* simplemente con el fin de mejorar el aspecto estético de lo presentado. Se muestran a continuación variadas vistas del auditorio diseñado.

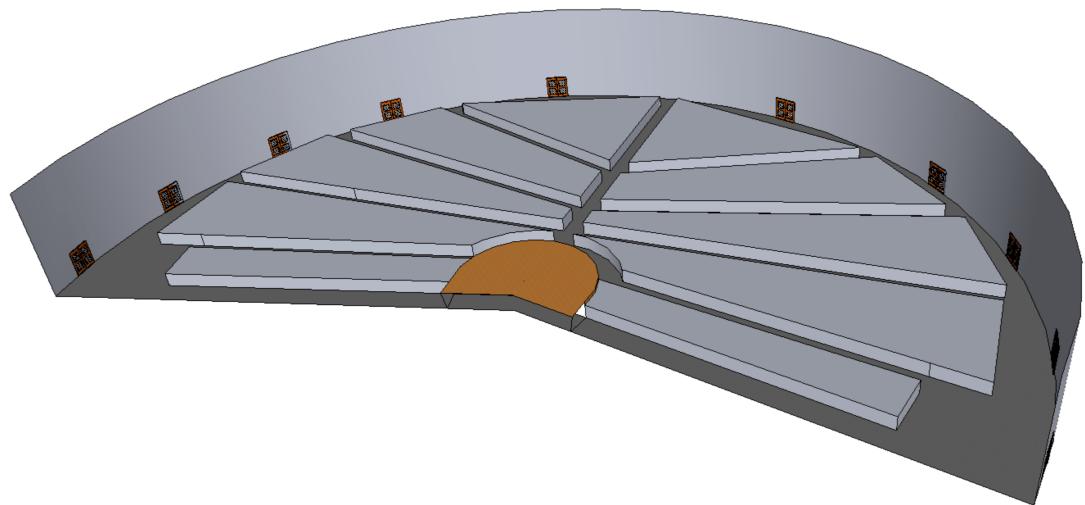


Figura 15 : Vista en perspectiva del auditorio.

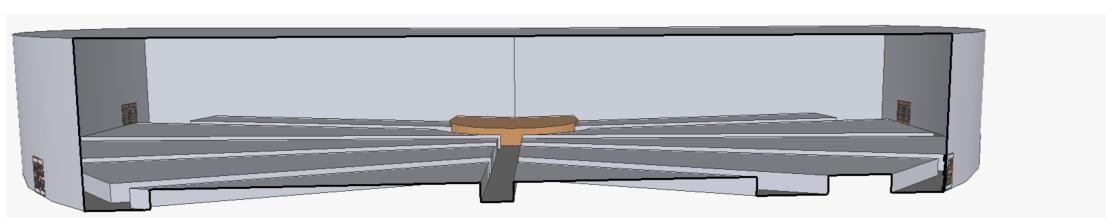


Figura 16: Vista en corte del auditorio.

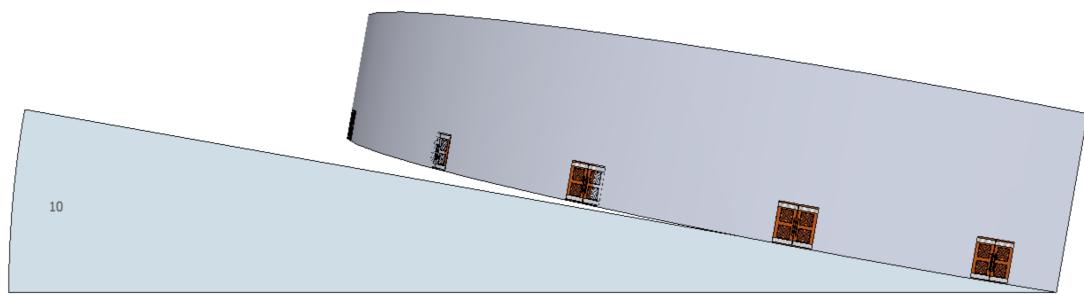


Figura 17: Vista lateral del auditorio.

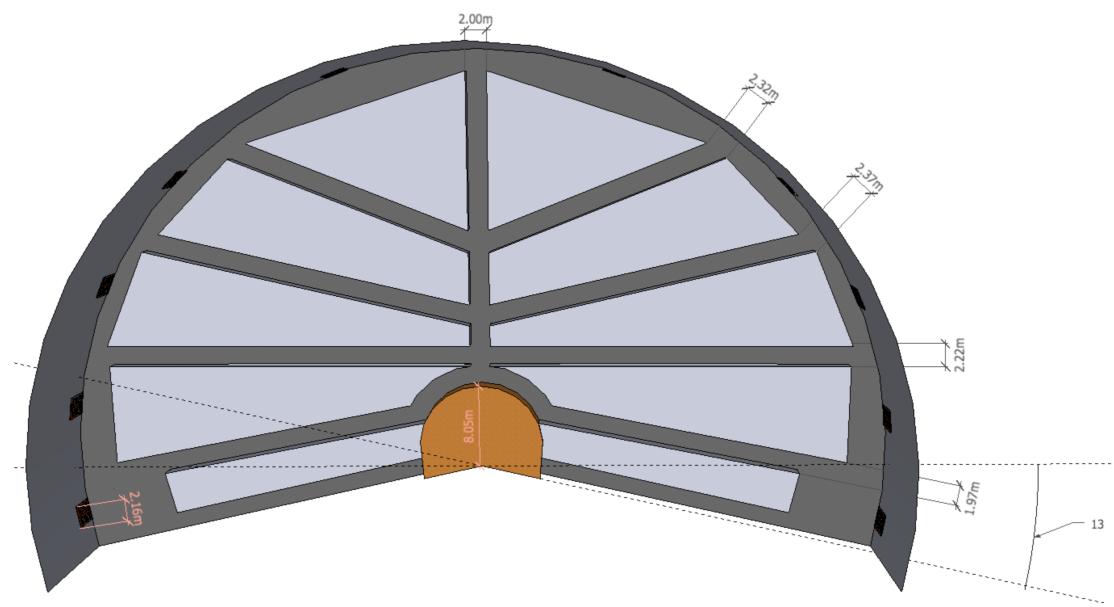


Figura 18: Vista de planta del auditorio.

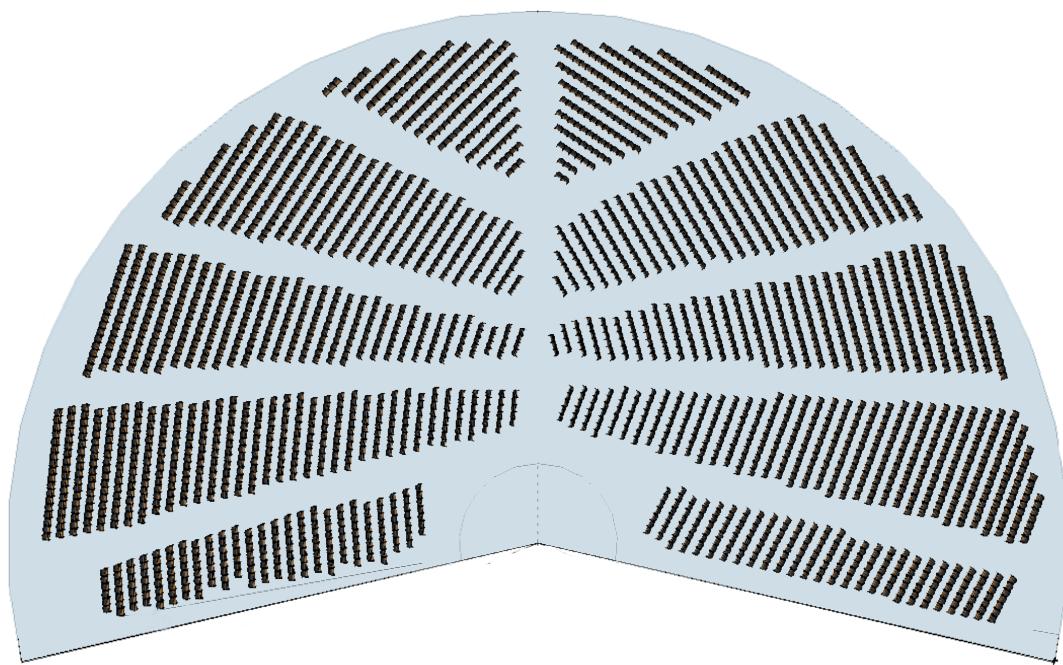


Figura 19: Arreglo de butacas del auditorio.

Preguntas teórico-prácticas

Pregunta ‘a’

Los software de simulación basados en la teoría de acústica geométrica tienen ciertos beneficios y algunas limitaciones. Por un lado tiene un procesamiento basado en cantidad de rayos emitidos, tiene orden de impacto de cada rayo y también duración total de la respuesta al impulso construida. Es importante que sean consistentes estos valores entre si, ya que, por ejemplo, si se tuvieran demasiados rayos de un orden muy elevado, pero un tiempo de respuesta al impulso muy corto, se gastaría demasiado tiempo computacional en impactos que no serán visualizados en la RIR generada, ya que el umbral termina antes. Por otro lado, el tiempo computacional no es nada menor con este tipo de software: determinar la cantidad de rayos y su orden más adecuado puede ayudar a que la simulación no lleve tanto tiempo. Asimismo, hay un valor dado al poner una fuente y un punto receptor que estima un tiempo de delay, con el cual al dividir la duración de la respuesta al impulso deseada por este valor, se puede estimar la cantidad de rayos necesarios para que impacten en el radio de 1m de la fuente. Si la cantidad de rayos fuera demasiado grande, en la comparación tiempo de procesamiento-precisión de la información, no se notarían especiales mejoras, ya que cuantos más rayos generados de forma aleatoria hayan, la posibilidad de coincidencia en un mismo punto no es tan elevada, cada vez menos.

Pregunta ‘b’

Intuitivamente pensaría que debería ponerse como un absorbente en forma de superficie a la altura de las cabezas de los oyentes. Podría traer aparejados 2 problemas: por un lado puede generarse un material de 2 caras, sumando área de absorción al recinto y falseando la simulación de TR, o sumando reflexiones, cosa que no tendría mucho sentido siendo un área absorbente con difusión y por otro lado, debería ser un valor basado en medidas con el método de Kath & Kuhl, ya que el mismo permite considerar la superficie de la muestra como un bloque completo de absorbente, descartando prácticamente el efecto de bordes. Inclusive, considerar todo como un bloque volumétrico puede no ser del todo válido en casos de suelo reflectante, ya que no se estaría considerando la absorción del piso, sino un material completo compuesto por las butacas.

Pregunta ‘c’

Es importante recordar la ecuación que rige el concepto de Lateral Fraction:

$$LF = 10 \log \left(\frac{\int_{10ms}^{80ms} p_{\text{ocho}}^2 dt}{\int_0^{80ms} p_{\text{omni}}^2 dt} \right) \quad (10)$$

Es importante ver aquí que es una comparación entre el micrófono lateral (que respondería como nuestra audición, binaural, pero “quitando” el sonido directo, en comparación a un micrófono omnidireccional, recibiendo toda la información).

Para verificar un software que lo calcule se me ocurren ciertas posibilidades:

- Generar una señal que no tenga información luego de los 10 ms, para observar que el cálculo dé un valor infinitamente bajo y negativo. Iría esa señal tanto en el numerador como en el denominador. Sería imposible probar el caso contrario, que tienda a infinito positivo, ya que es imposible que la integral de arriba diera mucho más que la de abajo con igual señal.
- Otra forma sería tener una señal que no tuviera información en los 10 primeros milisegundos y usarla tanto en numerador como en denominador. La integral de abajo cambiaría sus límites y daría todo 0 dB. Otra señal posible para este mismo test podría ser una respuesta al impulso sintetizada para el micrófono omnidireccional y la misma desfasada 10 ms, con lo cual ambas variables tendría la misma señal y tendría que volver a dar 0 dB.
- Una opción más podría ser tener exactamente la misma señal en numerador y denominador, lo que daría una fracción 7/8, entonces el valor de LF esperado sería $10 \log(7/8) = -0.58$ dB.
- Otra forma sería generando una señal de duración 20 ms, que iría en ambas partes de la fracción. Eso daría una señal arriba de la mitad de la duración que la de abajo, entonces se esperaría que el valor de LF fuera -3 dB.

Procesamiento de señales

Inicialmente, previo a todo el análisis de señales correspondiente, realicé una inspección de los audios asignados para el examen. Así noté los diferentes parámetros que tenían todos los archivos a procesar, como indico en la Tabla 10.

Nombre de archivo	Sample rate [KHz]	Profundidad de bits
Cuerdas-Anecoica.wav	96	16
IR 1.wav	48	24
IR 2.wav	96	24

Tabla 10: Archivos recibidos y análisis preliminar.

Viendo la situación, se hizo evidente la necesidad de cambiar algunos parámetros para lograr obtener todos los archivos en iguales condiciones para su procesamiento (convolución y posterior análisis). En ese sentido, la primera duda fue qué sample rate utilizar, para lo cual decidí realizar un análisis rápido de las respuestas al impulso en cuestión, para determinar su respuesta en frecuencia y ver si era posible trabajar con todas en 48 KHz, por estimar menor tiempo de procesamiento y falta de necesidad de trabajar en 96 KHz si es que así lo demostrarán los análisis de espectro. Se muestran en las Figuras 20 y 21 los análisis de las IRs recibidas a través del analizador de espectro de Audacity, con el tamaño de FFT más grande para también tener buena resolución en baja frecuencia, a pesar de que no fuera un punto crítico de análisis en esta instancia.

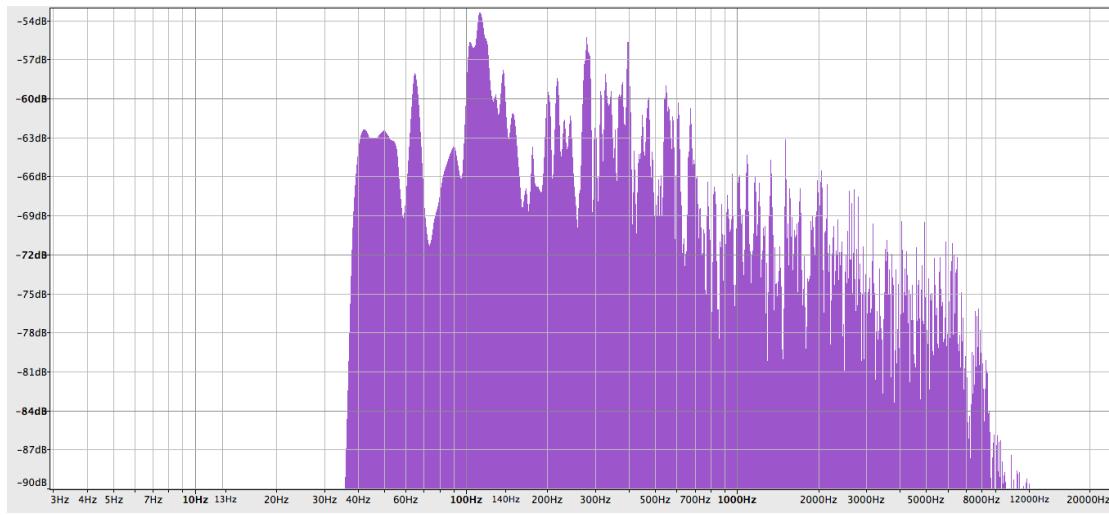


Figura 20: Espectro para IR 1.

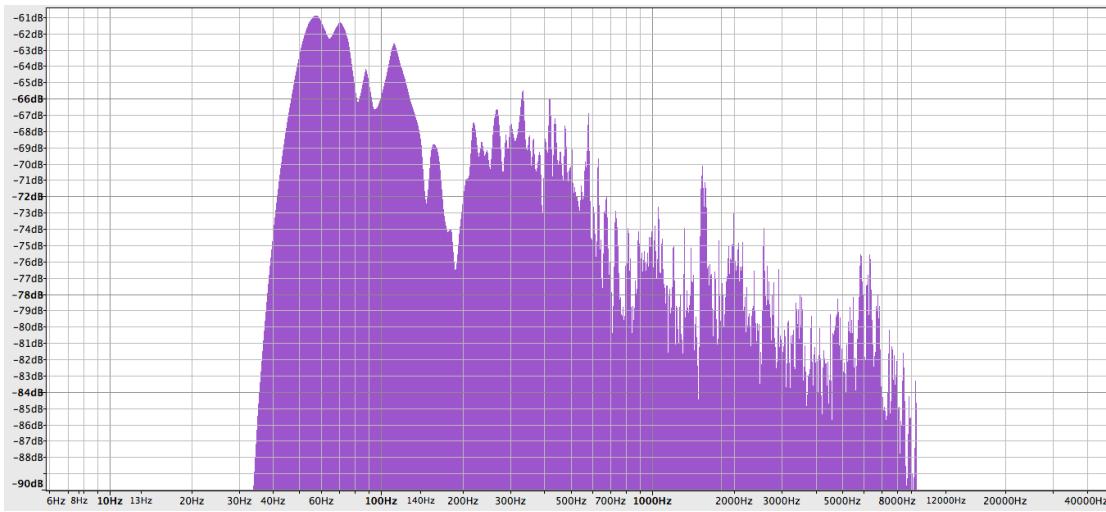


Figura 21: Espectro para IR 2.

Así se logra observar que ninguna de las dos respuestas trabajadas tiene información relevante por encima de los 12 KHz, con lo cual el resampleo a 48 KHz que daría una frecuencia de Nyquist máxima para el audio de 24 KHz no afectará el trabajo futuro.

En cuanto a la profundidad de bits, no resulta dañino para los archivos trabajados tener una profundidad de bits mayor a la original, ya que genera mayor resolución para valores de amplitud digitalizados que no serán usados por aquellos que cambian de 16 a 24 bits. Por lo dicho, se convierten todos los archivos a sample rate de 48 KHz y profundidad de bits de 24 bits, formato con el cual pueden trabajar tranquilamente tanto Matlab (que uso para analizar τ_{ue} y filtrar) como Audacity (que uso para convolucionar el audio anecoico con las respuestas al impulso otorgadas).

Crossover time relativo

El *crossover time relativo* se define de varias maneras posibles, siendo un fenómeno que no tiene la atención que debiera en el mundo de análisis y mediciones acústicas, pero que podría hacer tambalear varias teorías o al menos ciertos parámetros con definiciones de tiempo arbitrarias (con valores usuales como 24 ms, 25 ms, 50 ms, 80 ms, etc. cuando prácticamente ninguno de los mismos tiene una justificación objetiva). Puede verse como el punto donde la auto-correlación al cuadrado de la respuesta al impulso pasa de ser determinística (con memoria) a ser estocástica (sin memoria). Esto implica que a partir del crossover time termina el campo temprano y comienza el tardío, lo que separaría la respuesta al impulso en la sección de sonido directo y reflexiones tempranas y otra parte con la cola tardía, la cual está demostrado que se asemeja a ruido blanco con distribución gaussiana. Es importante notar que este parámetro es variable con la frecuencia, con lo cual hay una zona de transición que dependerá del comportamiento de la respuesta al impulso y su excitación del espectro. Hay ciertas formas de hallar este valor: una se basa en hallar un rectángulo en el gráfico de la auto-correlación al cuadrado, con amplitud 1 (normalizado a escala dB_{FS}) y su base será el valor de crossover time, mientras que otro método permite el análisis por ventanas para evaluar *gaussianidad* de cada una (lo cual es posible a través de la kurtosis) y el

valor más parecido a una distribución normal será el punto del crossover time. Este último método es el implementado.

A través de un pequeño código desarrollado en plataforma Matlab (anexado al examen) se logra analizar la kurtosis del audio a través de ventanas elegidas, se opta por el valor mínimo y se halla ese punto en el vector de audio, definiendo ese valor como la medida del crossover time relativo.

Luego de variadas pruebas, donde los resultados evidentemente no eran consistentes (daban valores previos al inicio de la IR o de varios segundos posteriores al decaimiento de la misma), decidí generar una nueva versión de esas IR pero cortadas a un rango de tiempo que facilitara el cálculo en la zona buscada. Inicialmente, para determinar cuánto tiempo de decaimiento dejar, a través del módulo en Audacity ‘Aurora Acoustical Parameters’ calculé los distintos indicadores de RT de la señal (EDT, T_{20} , T_{30}) y corté en el límite del mayor valor indicado por esos 3, pero sin embargo seguía sin funcionar.

La siguiente especulación fue en dónde podría estar ese valor de crossover time relativo. Basado en los parámetros más usuales, se suelen tomar valores en el orden de 25, 50, 80 ms, por lo cual era evidente que se podía recortar aún más la respuesta al impulso de modo de no falsear el valor, pero teniendo más certeza de obtener un rango lógico y esperable, lo que llevó a cortar ambas señales en aproximadamente 1 segundo de duración.

Otra decisión importante para el cálculo es el tamaño de las ventanas tomadas, lo que daría la resolución del sistema de análisis, para lo que decidí que tuvieran 1 milisegundo de duración cada una para analizar su kurtosis. Finalmente, para entender el orden de magnitud que debería tener esa kurtosis mínima, decidí analizar el caso de ruido blanco de 1 segundo de duración generado a través del software Audacity, lo cual dio un valor de 1.8 aproximadamente. De esta manera se hallan los resultados mostrados en la Tabla 11.

RIR #	Crossover time relativo [ms]	Kurtosis
1	458	1.2043
2	166	1.2881

Tabla 11: Crossover time relativo hallado y su kurtosis.

En principio, los valores hallados parecen ser elevados, lo cual posibilita las sospechas de error en el cálculo del mismo. Es importante notar lo bajo de los valores de kurtosis, recordando que la tendencia a 0 indica mayor *gaussianidad*, con lo que se asumiría que el punto de crossover time hallado para cada respuesta sería más similar a una distribución normal que el ruido blanco generado de 1 segundo de duración. De todos modos, es importante tener en cuenta los tiempos de reverberación involucrados que se observan en la Tabla 12, hallados a través de los módulos Aurora previamente mencionados.

RIR #	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
1	1.38	1.06	0.97	1.07	0.98	1.04	0.95	0.82	0.72	0.49
2	1.45	2.10	2.28	1.94	2.17	1.98	2.04	1.96	1.59	1.30

Tabla 12: T_{20} en segundos hallado para cada RIR.

Se observa que prácticamente todos los valores superan 1 segundo (excepto en alta frecuencia para la RIR 1), indicando que los valores obtenidos podrían ser válidos, principalmente el hallado para la RIR 2, de 166 ms, donde se nota un tiempo de reverberación global cercano a los 2 segundos.

Tau_e (τ_e)

Yoichi Ando demostró que el tiempo de retardo de una reflexión simple depende del motivo musical y se corresponde a la duración efectiva de la función de auto-correlación (ACF) de la señal[5]. Esa duración está definida como tau_e (τ_e) y se halla como el tiempo que tarda la envolvente de la ACF normalizada en caer 10 dB, o sea en llegar al 10% de su valor máximo.

Sato y Wu [6] demostraron en 2011 que se puede utilizar un método iterativo para hallar este parámetro que tiene resultados de igual o mejor exactitud que el método de Ando y que el de Kato. También describen que en los puntos de τ_e mínimos, es donde la información es más densa y está conectada con la respuesta subjetiva.

Hidaka y otros [7] investigaron que hay relación entre el $\tau_{e \min}$ y el tempo de la música en cuestión, aumentando el valor de τ_e al bajar el tempo.

Para lograr efectivamente hallar los valores de τ_e , es importante inicialmente lograr convolucionar el archivo de audio anecoico con cada respuesta al impulso, con el fin de auralizar la grabación de cuerdas en cada recinto al cual pertenece esa respuesta al impulso. Con las primeras pruebas de convolución, noté que el nivel de audio final era demasiado bajo y no lograba reproducirlo bien en mi sistema de monitoreo, por lo cual me pareció pertinente normalizar las respuestas al impulso y el audio anecoico en una instancia previa a la convolución, para lograr que el audio resultante tuviera mayor nivel y fuera más fácilmente observable su forma de onda. Elegí la normalización por picos a -1 dB_{FS}.

Como los valores de τ_e mínimo promedio y promedio fueron pedidos en ponderación A, una vez obtenidos los resultados de las convoluciones, se procede a filtrar cada audio con ponderación A, para lo cual se desarrolla un breve código en plataforma Matlab (anexado al examen) que genera filtros bajo la normativa ANSI S1.42-2001 en Clase 1. Se observa en la Figura 22 el gráfico de magnitud en función de la frecuencia para el filtro generado, verificando estar dentro de los valores exigidos por la normativa.

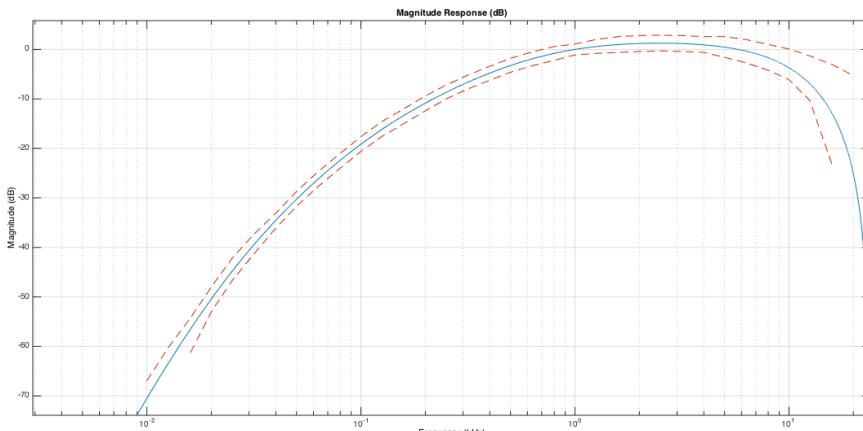


Figura 22: Magnitud del filtro de ponderación A generado en Matlab.

Una vez listos los archivos de audio para su análisis, se procede a ejecutar el script ‘acfGUI.m’ (anexado al examen) dado por la cátedra para el cálculo sencillo de los valores de τ_e a través de una sencilla interfaz gráfica con la posibilidad de exportar la información a planillas de cálculo.

A través de lo mencionado previamente, por escucha de los audios asignados, basado en los instrumentos ejecutados, el ligado de las notas y la duración de cada una, es evidente que el bajo tempo dará valores de τ_e no tan bajos como si fuera un

instrumento con mayor carga de transitorios. Por esto se decide utilizar una ventana (*frame*) de integración de 10 ms, estimando que no se encontrarán valores menores a este, obteniendo una correcta resolución para el sistema de análisis.

Una vez obtenida la información del código dado, se halla el valor de τ_e promedio ponderado A mediante el promediado de los valores obtenidos a lo largo del archivo y se encuentra el τ_e mínimo promedio ponderado A considerando el percentil 95 del total de los valores hallados. Se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 13.

Audio	τ_e mínimo promedio [ms]	τ_e promedio [ms]
Convolucionado con IR 1	69.40	1251.07
Convolucionado con IR 2	143.63	1229.87

Tabla 13: τ_e mínimo promedio y τ_e promedio, ambos con ponderación A.

Para hallar la variación porcentual que cada RIR establece sobre el valor anecoico, se compara cada uno de los valores analizados respecto de los valores para el audio anecoico y se muestran en la Tabla 14.

Audio	τ_e mínimo promedio [ms]	τ_e promedio [ms]	Variación mínimo [%]	Variación promedio [%]
Cuerdas anecoico	201.35	820.69	-	-
Convolucionado con IR 1	69.40	1251.07	34.47	152.44
Convolucionado con IR 2	143.63	1229.87	71.33	149.86

Tabla 14 :Variación de τ_e respecto del audio anecoico.

Es evidente la influencia del recinto de escucha a través del análisis del τ_e , logrando ver que frente a un mismo audio anecoico con dos respuestas al impulso distintas, de diversas características, modifican la forma de percepción del sonido allí dentro. En las Figuras 23 y 24 se puede observar la comparativa en trazo negro del τ_e correspondiente al audio anecoico y en azul al convolucionado con cada respuesta al impulso. Es evidente ahí también la modificación tanto en magnitud como en tiempo del τ_e “con” y “sin” recinto.



Figura 23: Comparativa del τ_e del audio anecoico en trazo negro y del audio convolucionado con RIR 1 en azul, marcando los puntos evidentes de cambio de $\tau_{e\min}$.

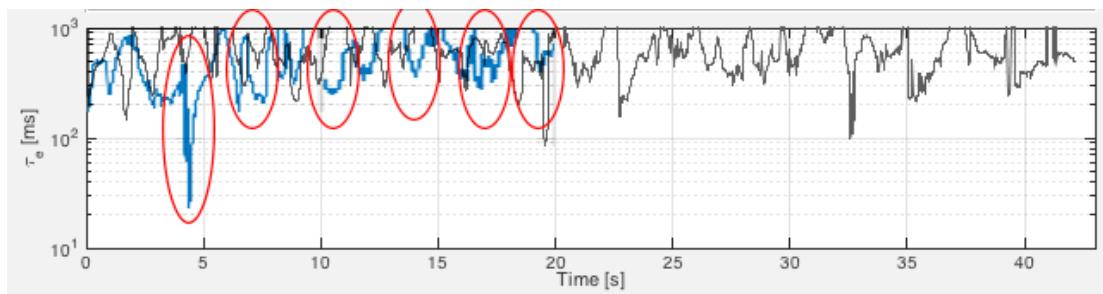


Figura 24: Comparativa del τ_e del audio anecoico en trazo negro y del audio convolucionado con RIR 2 en azul, marcando los puntos evidentes de cambio de $\tau_{e\min}$.

Referencias

- [1] Trevor. J. Cox & Peter D'Antonio, "Acoustic Absorbers and Diffusers", London: Taylor & Francis, 2009.
- [2] "Código de edificación para espectáculos públicos en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires". CABA.
- [3] Barron.F, Randall. "Industrial Noise Control and Acoustics", New York, Marcel Dekker Inc, 2001.
- [4] Gade A. C., "Acoustics for Symphony Orchestras; Status After Three Decades of Experimental Research", BUILDING ACOUSTICS, Volumen 18, 3 y 4, 2011, pp 181–206
- [5] Ando Y. "Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo" J. Acoust. Soc. Am. 62 (1977) 1436–1441.
- [6] Sato S. & Wu S. "Comparison of Different Calculation Methods of Effective Duration (τ_e) of the Running Autocorrelation Function of Music Signals", Acta acústica united with Acustica, vol. 97, pp 432 – 440. 2011.
- [7] Hidaka T., Kageyama K. & Masuda S.: Recording of anechoic orchestral music and measurements of its physical characteristics based on the auto-correlation function. Acustica 67 pp 68–70. 1988.