

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**DISEÑO ACÚSTICO PARA LA SALA I
DE LA BIBLIOTECA NACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGÍA
“ING. VÍCTOR BRAVO AHUJA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN COMUNICACIONES Y
ELECTRÓNICA

PRESENTA

DULCE ELENA RANGEL GRIMALDO

ASESOR

M. en C. AMPARO VÁZQUEZ SALDAÑA



CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO 2016

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS INDIVIDUAL Y EXÁMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA (N) DESARROLLAR C. DULCE ELENA RANGEL GRIMALDO

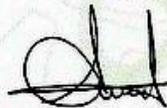
**"DISEÑO ACUSTICO PARA LA SALA I DE LA BIBLIOTECA NACIONAL DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA "ING. VICTOR BRAVO AHUJA"**

ANALIZAR LA SALA I DE LA BIBLIOTECA NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "ING. VICTOR BRAVO AHUJA" DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, PARA PROPONER, SI ES NECESARIO UN DISEÑO ACÚSTICO PARA MEJORAR LAS CONDICIONES ACÚSTICAS ACTUALES DE DICHO RECINTO.

- ❖ FUNDAMENTOS, TEORÍAS Y CONCEPTOS DE ACÚSTICA ARQUITECTURAL
- ❖ ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS ACTUALES DE LA SALA I
- ❖ PROPUESTA DEL DISEÑO ACUSTICO DE LA SALA I

CIUDAD DE MÉXICO A 22 DE FEBRERO DE 2016.

ASESOR



M. EN C. AMPARO VÁZQUEZ SALDAÑA



ING. PATRICIA LORENA RAMÍREZ RANGEL
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA



Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional y la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica “ESIME Zacatenco” por abrirme sus puertas y ayudarme a forjar un mejor futuro.

Agradezco a la M. en C. Amparo Vázquez Saldaña por sus asesorías, comentarios, consejos, observaciones y aportaciones realizadas para realizar un mejor trabajo. Muchas Gracias.

Al Ing. Ilhulcamina Servín Rivas por compartir y transmitirme sus conocimientos, técnicas y experiencia, por su paciencia, sus atenciones y aportaciones, así como su excelente disposición para mejorar el presente proyecto, aun a miles de kilómetros de distancia, Muchas Gracias.

Al M. en I. Ricardo Andrés Franco Pérez por sus excelentes observaciones y aportaciones, así como al Ing. Sergio García Beristain por compartirme su experiencia en la solución de dudas y observaciones. Muchas Gracias.

A la Ing. Patricia Lorena Ramírez Rangel por sus comentarios, observaciones, correcciones y su gran amabilidad y disposición. Muchas Gracias.

A la Ing. María Teresa Franco Martínez por sus aportaciones y atenciones. Muchas Gracias.

Muchas gracias por el tiempo dedicado a las revisiones de mi proyecto y por recorrer este camino conmigo brindándome conocimiento, experiencia, recomendaciones y observaciones que me ayudaron a enriquecer mi proyecto de tesis. Muchas gracias.

A la Lic. Beatriz Elizundia Balcázar encargada de la dirección de bibliotecas del IPN y al personal de la Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología “Víctor Bravo Ahuja” BNCT; Principalmente al Lic. Ignacio San Juan Hernández jefe del departamento de apoyo técnico, al Ing. David Alberto Gómez Villa Gómez, a la Lic. Erendida, al Dr. Jaime Hernández Méndez de la división de información y documentación, a Carmen Alegría, Lizbeth Martel y Leslie Oviedo. Así como al personal encargado del mantenimiento y supervisión de la Sala I de la BNCT. Gracias por su cordialidad, servicio y su excelente disposición para que este proyecto fuera llevado a cabo.

A los encargados del almacén de acústica Ing. Lucero Ivette Trinidad Ávila y Tec. Homero Villarruel Ramírez por sus atenciones y servicios para el préstamo de material y equipo, Gracias.

Mención especial al Ingeniero Vidal Hinojosa Rodríguez por sus atenciones recibidas.

Gracias

Dedicatoria

Agradezco a Dios por darme la paciencia y fortaleza para salir adelante, a San Cayetano por guiar mi camino y ayudarme a cumplir con mi objetivo de lograr concluir satisfactoriamente mi carrera en ingeniería en comunicaciones y electrónica.

A mi papá Manuel Rangel Vigueras por enseñarme que con dedicación y amor por lo que se hace todo es posible, que no hay barreras cuando se tiene el corazón y la mente puesta en un objetivo, a mi mamá María Elena Grimaldo Verdín por dar siempre esperanza y alegría a mi vida, por ser mi fortaleza y mi apoyo, a mi hermanito Manuel Eduardo Rangel Grimaldo por ser mi compañero, por siempre cuidarme y ayudarme a cada paso de mi vida, y a Carlos Eduardo Torres Álvarez por su apoyo y motivación.

A mi tío Jorge Carlos Rangel Vigueras que aun en la eternidad, su recuerdo me motiva a ser mejor y no rendirme, porque sé que siempre cuida y guía mis pasos.

Gracias por su apoyo y amor incondicional, por ser el mejor ejemplo para salir adelante y enseñarme a luchar para que mis sueños sean realidades, todo lo que he logrado es gracias a ustedes que siempre creyeron en mí.

Gracias



Contenido

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VI
Índice de formulas.....	X
Objetivo general.....	i
Objetivos específicos	i
Justificación	i
Introducción.....	iii
Capítulo 1.....	1
Fundamentos, teorías y conceptos de Acústica Arquitectural	1
1.1 Acústica	1
1.2 Acústica Arquitectural	1
1.3 Sonido.....	1
1.3.1 Características del sonido	1
1.3.1.1 Sonido reflejado	2
1.3.1.2 Transmisión del sonido	3
1.4 Magnitudes acústicas	5
1.4.1 Decibel.....	5
1.4.2 Presión sonora.....	5
1.4.3 Nivel de presión sonora.....	5
1.5 Ruido	7
1.5.1 Tipos de ruidos	7
1.5.1.1 Tipos de ruidos por frecuencia y tiempo.....	7
1.5.1.2 Fuentes de ruido internas a la edificación.	8
1.6 Banda de frecuencias	9
1.6.1 Bandas de octava	9
1.6.2 Banda de tercio de octava.....	10
1.7 Medición del sonido.....	10
1.7.1 Sonómetro.....	11
1.7.2 Sonómetro integrador.....	12



1.7.3 Analizador de espectro.....	12
1.8 Acondicionamiento acústico	13
1.8.1 Absorción.....	14
1.8.2 Coeficientes de absorción	15
1.8.3 Materiales absorbentes	16
1.8.3.1 Absorción del aire.....	16
1.8.3.2 Variación de la absorción en función del espesor del material	17
1.8.3.3 Variación de la absorción en función de la porosidad del material.....	19
1.8.3.4 Variación de la absorción en función de la densidad del material	20
1.8.3.5 Variación de la absorción en función de la distancia del material a la pared rígida	20
1.8.4 Protección de los materiales absorbentes	21
1.8.5 Reverberación	22
1.8.5.1 Tiempo de reverberación	22
1.8.5.2 Tiempo de reverberación óptimo	22
1.8.5.3 Ecuaciones de tiempo de reverberación óptimo	24
1.8.5.4 Cálculo del tiempo de reverberación	24
1.8.5.5 Elección de ecuación para cálculo del tiempo de reverberación.....	26
1.8.5.6 Control del tiempo de reverberación.....	26
1.8.6 Inteligibilidad de la palabra	27
1.8.6.1 Características del mensaje oral	28
1.8.6.2 Cálculo de inteligibilidad %ALcons (Articulation Loss of Consonants)	30
1.8.6.3 Índice de transmisión del habla (Speech Transmission Index "STI")	32
1.8.7 Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra	34
1.9 Criterios de evaluación del ruido	35
1.9.1 Curvas NC	35
1.9.2 Ruido de fondo	36
1.10 Aislamiento acústico	37
1.10.1 Proceso de transmisión acústica	37
1.10.2 Parámetros descriptores del aislamiento acústico por vía aérea	37
1.10.3 Pérdida por transmisión acústica	38
1.10.4 Reducción de ruido	39
1.10.5 Nivel de ruido esperado en el recinto receptor	39



1.10.6 Transmisión sonora (STC).....	40
1.10.7 Aislamiento de ruido aéreo.....	40
1.10.8 Materiales aislantes de ruido.....	41
Capítulo 2.....	42
Análisis de las condiciones acústicas actuales de la Sala I	42
2.1 Aplicaciones y usos.....	42
2.2 Ubicación geográfica de la BNCT.....	42
2.3 Plano de ubicación de la Sala I	43
2.4 Dimensiones y materiales de la Sala I de la BNCT.....	44
2.4.1 Imágenes de las dimensiones y distribución en Sala I.....	45
2.5 Análisis del ruido de fondo.....	47
2.5.1 Comparación de valores obtenidos en la Sala I vs la curva NC recomendada.....	49
2.6 Análisis de tiempo de reverberación	51
2.6.1 Cálculo del tiempo de reverberación con condiciones iniciales (actuales).....	57
2.7 Análisis de la inteligibilidad de la palabra	60
2.8 Pérdida por transmisión.....	63
2.8.1 Pérdida por transmisión medida.....	63
2.8.2 Evaluación de aislamiento acústico.....	71
Capítulo 3.....	79
Propuesta del diseño acústico de la Sala I	79
3.1 Propuesta de acondicionamiento acústico	79
3.2 Análisis de inteligibilidad.....	82
3.2.1 Análisis de inteligibilidad por pérdida de articulación de consonantes "%ALcons"	82
3.2.2 Análisis de inteligibilidad por STI.....	84
3.3 Propuesta de aislamiento acústico	85
3.3.1 Nivel de ruido esperado en el recinto receptor	89
3.4 Resultados gráficos del diseño acústico de Sala I	93
3.5 Análisis de costos	98
Conclusiones	101
Anexo A	103
Referencias	108



Índice de figuras

Figura 1.1	Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante	3
Figura 1.2	Curvas isofónicas de igual sonoridad para tonos puros.	4
Figura 1.3	Niveles medios de presión sonora NPS, a 1 m de distancia, producidos por una persona hablando con diferentes intensidades de voz.	6
Figura 1.4	Espectro sonoro promediado en bandas de octava.	9
Figura 1.5	Diagrama a bloques del sonómetro.	11
Figura 1.6	Analizador de espectro en tiempo real (a) PHONIC PAA3 y (b) NORSONIC 132.	13
Figura 1.7	Gráficas para la determinación del producto 4m (m es la constante de atenuación del sonido en el aire).	17
Figura 1.8	Variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente comercial a base de lana de vidrio.	19
Figura 1.9	Variación de la absorción en función de la frecuencia de un material absorbente con distintos grados de porosidad.	19
Figura 1.10	Coefficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m ³ .	20
Figura 1.11	Amplitud de la velocidad "u" de las partículas de aire en el interior de un material absorbente situado a una distancia de la pared rígida $d = \lambda/4$	21
Figura 1.12	Señal/ruido. En rojo: umbral de audición. En negro: enmascaramiento que provoca un tono de 1 kHz a diferentes amplitudes.	27
Figura 1.13	Directividad de la voz humana en las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz y 4 kHz (según Moreno y Pfretzschner).	30
Figura 1.14	Evolución temporal de la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en un recinto cerrado (según Kurtovic).	34
Figura 1.15	Curvas de criterio de ruido NC ("Noise Criteria").	35
Figura 1.16	Sistema masa resorte.	41
Figura 2.1	Ubicación satelital de la BNCT.	43
Figura 2.2	Vista en planta: ubicación de la Sala I.	43
Figura 2.3	Vista en isométrico 2: ubicación de la Sala I.	44
Figura 2.4	Vista en planta: dimensiones de Sala I; vista en isométrico: distribución de mobiliario.	45
Figura 2.5	Vista en isométrico: Pasillo I.	45



Índice de figuras (continuación)

Figura 2.6	Vista en isométrico: Pasillo II.	46
Figura 2.7	Vista en isométrico: Pasillo lateral.	46
Figura 2.8	Vista en isométrico: frontal de la Sala IV - Sala V.	46
Figura 2.9	Vista de planta: distribución de mobiliario y ubicación de los puntos de medición, Sala I.	47
Figura 2.10	Espectro acústico: promedio de ruido de fondo, Caso 1.	48
Figura 2.11	Espectro acústico: promedio de ruido de fondo, Caso 2.	49
Figura 2.12	Comparación de la curva NC-30 vs Caso 1 (NPA) y Caso 2 (NPA2)	50
Figura 2.13	Vista en planta: distribución de los puntos de medición, Sala I.	51
Figura 2.14	Promedio del tiempo de reverberación de los puntos A, B, C y D.	53
Figura 2.15	Tóptimo Metha M. Johnson, Rocafort J., para el tiempo de reverberación con relación al volumen a 500 Hz.	54
Figura 2.16	Tiempo de reverberación óptimo en función de la frecuencia (Kinsler <i>et al.</i> , 1993).	56
Figura 2.17	\bar{T} Medido y T_{mid} (tiempo óptimo).	56
Figura 2.18	Condición para calcular $TL_{necesaria}$.	73
Figura 2.19	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$ en Sala IV - Sala I.	75
Figura 2.20	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$, en Pasillo I - Sala I.	76
Figura 2.21	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$, en Pasillo lateral - Sala I.	76
Figura 2.22	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$, en el Pasillo II - Sala I.	77
Figura 2.23	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$, en Sala V - Sala I.	78
Figura 3.1	Comparación del tiempo de reverberación de acuerdo a la ecuación de Norris-Eyring por banda de octava con el $\pm 20\%$ de tolerancia.	81
Figura 3.2	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Propuesta}$ en Sala IV - Sala I.	86
Figura 3.3	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Propuesta}$ en Pasillo I - Sala I.	87
Figura 3.4	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Propuesta}$ en Pasillo lateral - Sala I.	88
Figura 3.5	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Propuesta}$ en Sala V - Sala I.	89
Figura 3.6	$L_{p2} < L_p$ del criterio de ruido NC-30, Sala IV - Sala I.	90
Figura 3.7	$L_{p2} < L_p$ del criterio de ruido NC-30, Sala Pasillo I - Sala I.	91
Figura 3.8	$L_{p2} < L_p$ del criterio de ruido NC-30, Pasillo Lateral - Sala I.	91



Índice de figuras (continuación)

Figura 3.9	$L_{p2} < L_p$ del criterio de ruido NC-30 en Sala V - Sala I.	92
Figura 3.10	Vista en isométrico de propuesta de diseño acústico de Sala I (vista hacia el pizarrón).	93
Figura 3.11	Vista en isométrico de propuesta de diseño acústico de Sala I (vista hacia la puerta).	94
Figura 3.12	Vista en isométrico, zoom de propuesta de acondicionamiento acústico en piso.	94
Figura 3.13	Vista en isométrico, zoom de propuesta de acondicionamiento acústico en techo.	95
Figura 3.14	Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento (arreglo de vidrios) y acondicionamiento (terciopelo) acústico en muro constructivo Sala IV y muro Pasillo lateral-Sala I.	95
Figura 3.15	Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento (placa de yeso	96
Figura 3.16	y (corcho aglomerado) acondicionamiento acústico en muro constructivo Sala V-Sala I.	
Figura 3.16	Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento acústico (placas de yeso) en muro constructivo Sala V-Sala I.	96
Figura 3.17	Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento acústico (arreglo de vidrios) y acondicionamiento (moqueta) en muro constructivo Pasillo I-Sala I.	97
Figura 3.18	Vista en isométrico por capas de propuesta acondicionamiento acústico (fibra de vidrio con velo acústico) en muro constructivo Pasillo II-Sala I.	97

Índice de tablas

Tabla 1.1	Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos y valoración subjetiva asociada.	6
Tabla 1.2	Frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas según la norma ISO-266, en Hz (Las frecuencias sombreadas son las más utilizadas).	10
Tabla 1.3	Banda de tercios de octava (cada frecuencia en azul representa una octava).	10
Tabla 1.4	Márgenes de valores recomendados de T_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados).	23
Tabla 1.5	Ecuaciones de tiempo de reverberación óptimo, según Rettinger.	24
Tabla 1.6	Características relevantes del mensaje oral.	29
Tabla 1.7	Valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.	32



Índice de tablas (continuación)

Tabla 1.8	Valores STI y valoración subjetiva equivalente.	33
Tabla 1.9	Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (dBA).	36
Tabla 2.1	Dimensiones por muro constructivo de Sala I	44
Tabla 2.2	Dimensiones totales de Sala I	45
Tabla 2.3	Medición de ruido de fondo en los 6 puntos distribuidos en Sala I y promedio, Caso 1.	48
Tabla 2.4	Ruido de fondo, Caso 2. (Sala IV en funcionamiento: reproducción de película).	49
Tabla 2.5	Curva de criterio de nivel de ruido recomendado para recintos acústicos.	50
Tabla 2.6	Comparación de valores NC recomendados y ruido de fondo medido.	50
Tabla 2.7	Tiempo de reverberación medido en el punto A.	52
Tabla 2.8	Tiempo de reverberación medido en el punto B.	52
Tabla 2.9	Tiempo de reverberación medido en el punto C.	52
Tabla 2.10	Tiempo de reverberación medido en el punto D.	53
Tabla 2.11	Tiempo de reverberación Promedio de los puntos A, B, C y D.	53
Tabla 2.12	Cálculo del tiempo de reverberación en condiciones iniciales de acuerdo a los coeficientes de absorción de la Sala I.	57
Tabla 2.13	Comparación del tiempo de reverberación medido, calculado y el tiempo óptimo para Sala I.	58
Tabla 2.14	Absorción total de la Sala I.	59
Tabla 2.15	% <i>ALcons</i> con el coeficiente de absorción promedio y tiempo de reverberación medido $r \leq 3.16$ Dc.	61
Tabla 2.16	% <i>ALcons</i> con el coeficiente de absorción promedio y tiempo de reverberación medido para $r \geq 3.16$ Dc.	62
Tabla 2.17	% <i>ALcons</i> con el coeficiente de absorción promedio y el tiempo de reverberación calculado $r \leq 3.16$ Dc.	62
Tabla 2.18	% <i>ALcons</i> con el coeficiente de absorción promedio y el tiempo de reverberación calculado para $r \geq 3.16$ Dc.	62
Tabla 2.19	Nivel de presión acústica en Sala IV, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	65
Tabla 2.20	Nivel de presión acústica en Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	65
Tabla 2.21	Nivel de presión acústica promedio medido en la Sala IV y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	66



Índice de tablas (continuación)

Tabla 2.22	Nivel de presión acústica promedio medido en el Pasillo I y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	66
Tabla 2.23	Nivel de presión acústica promedio medido en Pasillo lateral y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	66
Tabla 2.24	Nivel de presión acústica promedio medido en Pasillo II y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	67
Tabla 2.25	Nivel de presión acústica promedio medido en Sala IV y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	67
Tabla 2.26	Nivel de presión acústica en la Sala IV, Condición 2 (recinto fuente excitado con una señal de audio, en este caso con la reproducción de una película).	68
Tabla 2.27	Nivel de presión acústica promedio en la Sala IV, Condición 2 (recinto fuente excitado con una señal de audio).	68
Tabla 2.28	Conversión de \overline{NPA}_1 en el Pasillo o en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.	69
Tabla 2.29	Conversión de \overline{NPA}_1 en el Pasillo lateral en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.	70
Tabla 2.30	Conversión de \overline{NPA}_1 en el Pasillo II en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.	70
Tabla 2.31	Conversión de \overline{NPA}_1 en Sala V en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.	70
Tabla 2.32	Pérdida por transmisión en muro constructivo Sala IV – Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	71
Tabla 2.33	Pérdida por transmisión en muro constructivo Pasillo I – Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	71
Tabla 2.34	Pérdida por transmisión en muro constructivo Pasillo lateral – Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	72
Tabla 2.35	Pérdida por transmisión en muro constructivo Pasillo II – Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	72
Tabla 2.36	Pérdida por transmisión en muro constructivo Sala V – Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).	72
Tabla 2.37	Pérdida por transmisión necesaria del muro constructivo de Sala IV- Sala I, con \overline{NPA}_1 como señal de audio (reproducción de video, Condición 2).	73
Tabla 2.38	Pérdida por transmisión necesaria del muro constructivo de Sala IV- Sala I, con \overline{NPA}_1 como señal de audio (valores de referencia, Condición 2).	74
Tabla 2.39	Comparación $TL_{Necesaria\ medida}$, $TL_{Necesaria\ de\ referencia}$ y $TL_{Existente}$, en Sala IV - Sala I.	75
Tabla 2.40	Comparación $TL_{Necesaria\ medida}$, $TL_{Necesaria\ de\ referencia}$ y $TL_{Existente}$, en Pasillo I - Sala I.	75



Índice de tablas (continuación)

Tabla 2.41	Comparación $TL_{Necesaria}$ medida, $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$ en Pasillo lateral - Sala I.	76
Tabla 2.42	Comparación $TL_{Necesaria}$ medida, $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$ en Pasillo II - Sala I.	77
Tabla 2.43	Comparación $TL_{Necesaria}$ medida, $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Existente}$ en la Sala V - Sala I.	77
Tabla 3.1	Tolerancia de $\pm 20\%$ del tiempo óptimo de reverberación para la Sala I.	79
Tabla 3.2	Propuesta del tiempo de reverberación.	79
Tabla 3.3	Comparación de resultados de acuerdo a la ecuación de Norris - Eyring y el tiempo óptimo con el $\pm 20\%$.	81
Tabla 3.4	%ALcons con tratamiento acústico, $r \leq 3.16 Dc$.	82
Tabla 3.5	%ALcons con tratamiento acústico, $r \geq 3.16 Dc$.	82
Tabla 3.6	Comparación de % <i>Alcons</i> medidos, calculados y con tratamiento acústico para $r \leq 3.16 Dc$ y $r \geq 3.16 Dc$.	83
Tabla 3.7	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Propuesta}$ en Sala IV - Sala I.	85
Tabla 3.8	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Propuesta}$ en Pasillo I - Sala I.	86
Tabla 3.9	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia en Pasillo lateral - Sala I.	87
Tabla 3.10	Comparación $TL_{Necesaria}$ de referencia y $TL_{Propuesta}$ en Sala V - Sala I.	88
Tabla 3.11	Nivel de ruido esperado Sala IV - Sala I.	89
Tabla 3.12	Nivel de ruido esperado en Pasillo I - Sala I.	90
Tabla 3.13	Nivel de ruido esperado en Pasillo Lateral - Sala I.	91
Tabla 3.14	Nivel de ruido esperado en Sala V - Sala I.	92
Tabla 3.15	Análisis de costos de tratamiento acústico para acondicionamiento.	98
Tabla 3.16	Análisis de costos de tratamiento acústico para aislamiento.	98
Tabla 3.17	Análisis de costos de instalación para acondicionamiento.	99
Tabla 3.18	Análisis de costos de instalación para aislamiento.	99
Tabla 3.19	Análisis de costos con respecto a los materiales e instalación.	100
Tabla 3.20	Costo total del proyecto.	100



Índice de formulas

Ecuación 1	Nivel de presión sonora.	6
Ecuación 2	Absorción total del recinto, Sabine.	16
Ecuación 3	Tiempo de reverberación, Wallace Clement Sabine.	25
Ecuación 4	Absorción total del recinto (despeje de T), Sabine.	25
Ecuación 5	Área total de la superficie del recinto, Sabine.	25
Ecuación 6	Coefficiente de absorción promedio del recinto, Sabine.	25
Ecuación 7	Tiempo de reverberación, Norris-Eyring.	26
Ecuación 8	Calculo de %ALcons, $r \leq 3.16$ Dc.	31
Ecuación 9	Calculo de %ALcons, $r \geq 3.16$ Dc.	31
Ecuación 10	Cálculo de la distancia crítica.	31
Ecuación 11	Constante de la Sala (s).	31
Ecuación 12	Cálculo de %ALcons a partir del Speech Transmission Index (STI).	33
Ecuación 13	Cálculo de STI a partir de %ALcons.	33
Ecuación 14	Cálculo de pérdida por transmisión, ISO 140/III ² .	38
Ecuación 15	Cálculo de pérdida por transmisión.	38
Ecuación 16	Cálculo de pérdida por transmisión necesaria.	39
Ecuación 17	Cálculo del nivel de ruido esperado en el recinto receptor.	40
Ecuación 18	Promedio del tiempo de reverberación (s).	52
Ecuación 19	Nivel de presión acústica promedio.	65
Ecuación 20	Conversión de tercios de octava a banda de octava.	68



Diseño acústico para la Sala I de la Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología "Ing. Víctor Bravo Ahuja"

Objetivo general

Analizar acústicamente la Sala I de la Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología (BNCT) "Ing. Víctor Bravo Ahuja" del Instituto Politécnico Nacional, para proponer, si es necesario un diseño acústico para mejorar las condiciones acústicas actuales de dicho recinto.

Objetivos específicos

Obtener el tiempo de reverberación óptimo, así como la inteligibilidad de la palabra apropiado para una Sala de voz, esto mediante el estudio de acondicionamiento acústico.

Realizar un estudio de ruido, para determinar si es necesario un aislamiento acústico mediante un criterio de ruido apropiado para una sala dedicada al uso de la voz.

Justificación

La Sala I de la BNCT se utiliza actualmente para conferencias, exposiciones, debates, cursos y talleres de capacitación y actualización para alumnos, docentes y externos, por lo tanto es necesario que la Sala I sea adecuada para el uso de la voz.

La Sala I se encuentra en el Sótano 2, sin embargo está en una ubicación comprometedor, puesto que se encuentra sobre el Pasillo de acceso principal y el Pasillo general, y colinda directamente con 2 salas; en general forma parte de una de las 6 salas en la misma sección (Sótano 2). La importancia del diseño es aprovechar acústicamente el espacio otorgado por el IPN.

El acondicionamiento acústico es necesario para que la voz se escuche clara y homogénea en todo el recinto y el aislamiento acústico es para evitar interferencias de sonido con las salas contiguas y ruido del exterior.



El no percibir adecuadamente lo que el expositor u orador trata de transmitir a la audiencia el evento pierde su objetivo principal, que es la transmisión de información. Debido a la transmisión del ruido externo a la Sala I, se presenta desconcentración, fatiga, confusión, aburrimiento de la audiencia.

El motivo para realizar este proyecto de diseño de la Sala I de BNCT, es el aplicar los conocimientos adquiridos de la ingeniería en comunicaciones y electrónica, de la especialidad acústica para proponer un diseño acústico que beneficie a toda la comunidad politécnica e invitados de esta.

El diseñar acústicamente la Sala I del IPN es muy relevante debido que actualmente el número de salas diseñadas específicamente para voz es muy bajo y el brindar un buen servicio para los docentes, alumnos y trabajadores es primordial para un mejor aprovechamiento del recinto.



Introducción

El presente proyecto de tesis consiste en el estudio, análisis y diseño acústico de la Sala I de la Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología "Ing. Víctor Bravo Ahuja", para que funcione principalmente como un recinto dedicado a la voz.

El problema a resolver en este proyecto es la transmisión de ruido del exterior al interior del recinto y se buscó optimizar dentro de la Sala I la inteligibilidad de la voz, es decir, la comprensión de la palabra en cualquier parte del recinto a mayor distancia del orador.

El desarrollo consiste en el análisis detallado de las condiciones acústicas actuales de la Sala I, principalmente se analizó la ubicación de la Sala I dentro del Sótano 2, las dimensiones y materiales que la conforman.

Se realizó un estudio y análisis de ruido de fondo, tiempos de reverberación, inteligibilidad de la palabra y pérdida por transmisión, éste análisis fue realizado para evaluar si se cumple con los parámetros establecidos para el recinto, el cual es un recinto principalmente para el uso de la voz.

Al evaluar los puntos mencionados anteriormente, se realizó una propuesta acústica en base a los resultados obtenidos. Se planteó una solución a las carencias y debilidades acústicas del recinto donde se buscó conseguir los objetivos mencionados. Con los parámetros y resultados obtenidos con las condiciones iniciales se propuso un acondicionamiento acústico, el cual busca obtener tiempos de reverberación e inteligibilidad de la palabra óptimos y un aislamiento acústico para cumplir con los criterios de ruido apropiados para el uso del recinto.

El éxito en el diseño acústico de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definidas sus formas, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados a utilizar como revestimiento del mismo, con la finalidad de conseguir un recinto acústicamente favorable con respecto a lo establecido anteriormente.

El promover el diseño acústico de un recinto, en este caso de la Sala I de la BNCT, aparte de las mejoras en el desempeño de los sujetos (expositor y audiencia), es para dar a conocer la importancia que tiene el contar con un recinto adecuado para voz. Este proyecto es para dar a conocer los beneficios y la importancia que se tiene al contar con el diseño de un recinto acústico.



Capítulo 1

Fundamentos, teorías y conceptos de Acústica Arquitectural

1.1 Acústica

La Acústica es la ciencia que estudia la producción, transmisión y percepción del sonido tanto en el intervalo de la audición humana como en las frecuencias ultrasónicas e infrasónicas (García, 2000). Hace referencia a fenómenos físicos y psicofisiológicos. Las fases del fenómeno se dividen en: Producción (vibración), propagación (medio) y recepción (López, 2012).

1.2 Acústica Arquitectural

Estudia la interacción del sonido con las construcciones (García, 2000); Estudia los fenómenos vinculados con la propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto dedicado a una aplicación determinada (Miyara, 1999).

1.3 Sonido

Es un fenómeno vibratorio que a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, bien sea gaseoso, líquido o sólido, se propaga en ese medio, bajo la forma de una variación periódica de presión, una perturbación producida en un punto de un medio elástico no queda localizada en ese punto, sino que se transmite a los puntos próximos y así sucesivamente. Se dice que hay un sonido cuando la perturbación se propaga a través de un medio elástico causando una alteración de la presión o un desplazamiento de las partículas del medio, que es capaz de producir una sensación auditiva o que pueda reconocerse por un instrumento (Blanco, 2007).

1.3.1 Características del sonido

- **Tono**

El tono depende del número de oscilaciones por segundo (frecuencia). Mediante el tono podemos distinguir un sonido grave de uno agudo (López, 2012).



Si la vibración es lenta, el sonido es de baja frecuencia y se denomina sonido grave.
Si la vibración es rápida, el sonido es de alta frecuencia y se denomina sonido agudo.

- **Intensidad**

La intensidad acústica o sonora es una magnitud en parte subjetiva, y es la energía transportada por la onda que atraviesa, en la unidad de tiempo y de superficie perpendicular a la dirección de propagación de las ondas.

Está relacionada con la presión sonora, que es objetivamente medible. Sin embargo, dos sonidos de igual presión sonora y de distinta frecuencia no producen la misma sensación de intensidad. Se define como la energía por unidad de superficie y se mide en w/m^2 (Blanco, 2007).

- **Duración**

Es la característica del sonido que nos permite diferenciar sonidos largos de sonidos cortos. La podemos definir como el tiempo de permanencia de un sonido

- **Timbre**

Es una característica subjetiva del sonido que permite diferenciar dos sonidos que tengan idéntico tono e intensidad y que estén producidos por fuentes diferentes. El timbre viene definido por la intensidad y los diferentes armónicos de la señal sonora (López, 2012).

1.3.1.1 Sonido reflejado

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas:

La primera zona engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas ("early reflections"), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden ≤ 3). Se dice que una reflexión es de orden "n" cuando el rayo sonoro asociado ha incidido "n" veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

Desde un punto de vista práctico, se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la **Figura 1.1** se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante) (Carrión, 1998).

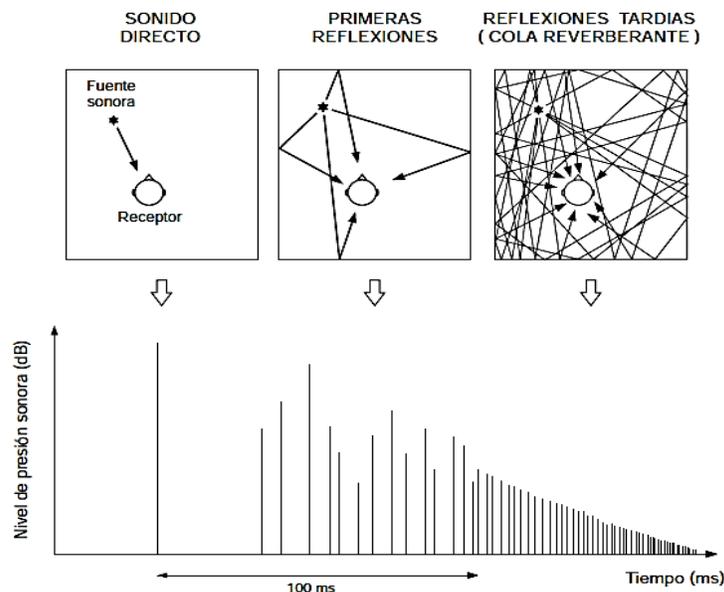


Figura 1.1. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante (Carrión, 1998).

1.3.1.2 Transmisión del sonido

Para que este fenómeno ocurra debe cumplirse la condición de que exista una fuente, un medio y un receptor. La fuente emite, el medio transmite y el receptor detecta el sonido o bien es en general afectado por el mismo de alguna manera determinada.

Cuando una fuente de sonido se pone en funcionamiento, comunica sus vibraciones a todas las partículas de aire estas, a su vez, hace lo mismo sobre las siguientes. Cuando se produce la propagación de las ondas sonoras lo que se transporta en ella no es materia sino energía.

La percepción del sonido es la siguiente: El pabellón auditivo recoge las ondas sonoras que pasan a través del conducto y pone en movimiento el tímpano, desde aquí se transmiten mediante la cadena de huesecillos hasta el oído interno. En el oído interno está el caracol, éste se conecta con una serie de terminaciones nerviosa que a través del nervio auditivo hacen llegar al cerebro la información del sonido.

No todas las frecuencias son percibidas con la misma intensidad, siendo el oído humano más sensible en la banda comprendida entre los 500 y 6000 Hz. Es decir, como se comprueba en las curvas de audición de la **Figura 1.2**, el oído humano se comporta "algo sordo" en bajas y altas frecuencias (Ramos, y A., 2009).

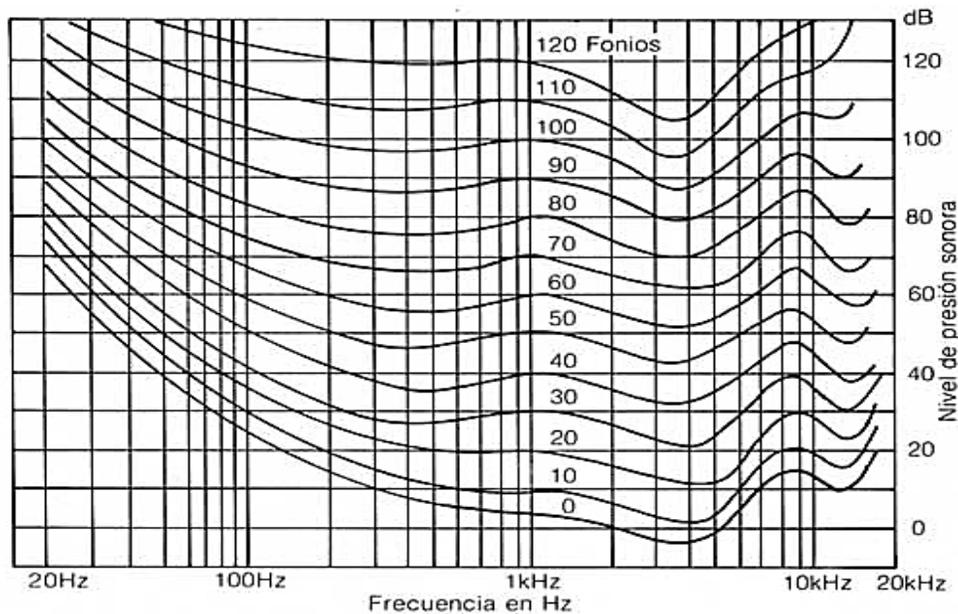


Figura 1.2. Curvas isofónicas de igual sonoridad para tonos puros (Blanco, 2007).

El fonio es una unidad adimensional empleada para caracterizar el nivel de sonoridad de un sonido o de un ruido determinado. Es decir es la unidad de nivel de sonoridad. Se expresa en dB por ser un nivel (Blanco, 2007).

Según Ramos (2009) la banda de frecuencias en la que fluctúa la voz humana está comprendida entre los 500 y los 2000 Hz, mientras que Pérez (2011) indica que ésta se encuentra en el espectro de 300 a 3400 Hz.



1.4 Magnitudes acústicas

1.4.1 Decibel

El decibel es la décima parte del Bel, se utiliza para comparar la presión sonora, en el aire, con una presión de referencia. Este nivel de referencia es una aproximación al nivel de presión mínimo que hace que nuestro oído sea capaz de percibirlo (Blanco, F. 2007).

A continuación se dan los valores de referencia:

Nivel de Referencia para la Presión Sonora (en el aire) = $0.00002 = 2 \times 10^{-5}$ Pa (rms)

Nivel de Referencia para la Intensidad Sonora (en el aire) = $0.000000000001 = 10^{-12}$ W/m²

Nivel de Referencia para la Potencia Sonora (en el aire) = $0.000000000001 = 10^{-12}$ W

1.4.2 Presión sonora

La magnitud física más importante empleada en acústica es la presión sonora (p), que representa la diferencia entre la presión total instantánea en un punto determinado, en presencia de una onda acústica, y la presión estática en el mismo punto, representa, pues, las variaciones de la presión atmosférica en torno a su valor de equilibrio, que en condiciones normales, al nivel del mar es del orden de 10^5 N/m² ($1 \text{ Pa} = \text{N/m}^2 = 10 \text{ } \mu\text{bar}$) (Blanco, 2007)

1.4.3 Nivel de presión sonora

El sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica, resulta razonable y conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora. Dicha escala se expresa en valores relativos a un valor de referencia. Se trata de la presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1 kHz (2×10^{-5} Pa). En tal caso, se habla de nivel de presión sonora NPS (SPL o Lp). La unidad utilizada es el decibel (dB).

El uso de dB reduce la dinámica de presiones sonoras a niveles de presión sonora de 0 a 135 dB, donde 0 dB representa una presión igual al umbral de audición (no significa, por tanto, ausencia de sonido) y 135 dB el umbral aproximado de dolor como se observa en la **Tabla 1.1**. De esta manera, las cifras manejadas son mucho más simples (Carrión, 1998). En la **Ecuación 1** se define el nivel de presión sonora (Blanco, F. 2007):

$$NPS = 10 \log \left[\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right] = 20 \log \left[\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right] \text{ dB} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

p_{ref} = Presión acústica o sonora eficaz de referencia o del umbral auditivo, que se toma, por acuerdo internacional, igual a $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ($= 2 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{bar}$), para el aire.

p_{rms} = Presión acústica o sonora eficaz en N/m^2 , correspondiente al nivel de presión NPS

NPS = Nivel de presión sonora (dB)

Tabla 1.1 Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada (Carrión, 1998)

Fuente sonora	Nivel de Presión Sonora NPS (dB)	Valoración subjetiva del nivel
Despegue de avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 m)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 m)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	
Dormitorio	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

En la **Figura 1.3** se representan los niveles medios de presión sonora a 1 m de distancia producidos por una persona hablando con diferentes intensidades de voz.

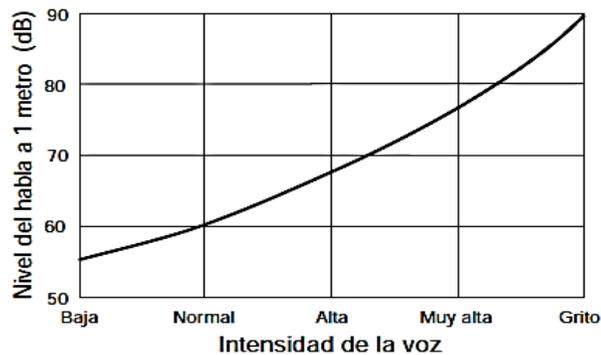


Figura 1.3. Niveles medios de presión sonora NPS, a 1 m de distancia, producidos por una persona hablando con diferentes intensidades de voz (Carrión, 1998).



1.5 Ruido

Todo sonido no deseado (confuso y no armonioso) que interfiere en alguna actividad humana y que es una mezcla compleja de sonidos con frecuencias fundamentales diferentes.

Efectos del ruido:

- Pérdida de la capacidad auditiva.
- Estrés.
- Perturbación del sueño.
- Disminución del rendimiento.

1.5.1 Tipos de ruidos

1.5.1.1 Tipos de ruidos por frecuencia y tiempo

a) Ruido blanco: es de naturaleza estadísticamente aleatoria, es decir que tiene igual energía por ancho de banda de frecuencia, sobre una banda total específica. Es decir, si el nivel de presión sonora medido con un analizador, es constante en un amplio margen de frecuencias, se dice que el espectro sonoro es plano, llamando al ruido blanco, dicho de otra forma, un ruido de este tipo es aquel cuya presión sonora cuadrática media es uniforme y continua con la frecuencia.

Un ruido blanco puede ser también aleatorio, caracterizado porque las amplitudes instantáneas de sus componentes se distribuyen en el tiempo según la curva de Gauss (también llamada distribución normal). Sin embargo el ruido aleatorio, no contiene necesariamente, un espectro plano.

b) Ruido rosa: es en el que todas las componentes nos dan el mismo nivel subjetivo, es decir es el ruido blanco pero con una pendiente de -3 dB.

1.-Ruido continuo constante: es aquel cuyo nivel de presión sonora medido en bandas de octava, no fluctúa a lo largo del tiempo.

2.-Ruido constante pero intermitente: es análogo al continuo, pero fluctuando en un margen moderado a lo largo del tiempo.

3.-Ruido fluctuante periódicamente: es análogo al continuo, pero fluctuando periódicamente con el tiempo.



4.-Ruido fluctuante no periódico: de características análogas a los anteriores, pero con largas fluctuaciones irregulares no periódicas.

5.-Ruido impulsivo repetitivo: es aquel que presenta impulsos repetidos análogos.

6.-Ruido impulsivo simple: es el que presenta impulsos aislados.

1.5.1.2 Fuentes de ruido internas a la edificación.

1.- Ruido debido a las personas: una persona, o un colectivo de personas pueden ser una fuente importante de ruido según el caso. El nivel de presión que existe en un recinto depende tanto de las características de la persona que habla (potencia acústica), como de las características acústicas y geométricas del local (absorción acústica, tiempo de reverberación, modos propios, etc.). Una conversación con un nivel normal puede producir un nivel de potencia acústica de 70 dB.

2.- Ruido de impactos: es un ruido típico que se transmite por la estructura y cuyo nivel y espectro en frecuencias dependen del tipo del suelo, como en el caso de pisadas, salto, movimiento de objetos, etc. Otro tipo de ruido de impactos se presenta al golpear las paredes (fijar clavos, etc.). Estos ruidos tienen un espectro importante en bajas frecuencias, que se transmiten con facilidad de un local al otro.

3.- Ruido debido a los aparatos de radio y televisión: Se han realizado estudios estadísticos para valorar la intensidad media que permita una escucha agradable, como dato orientativo, diremos que un aparato de radio a gran volumen produce un nivel de potencia acústica de 100 a 110 dB. En estos ruidos predominan en su espectro las frecuencias bajas y medias.

4.- Ruido debido a las instalaciones de fontanería: son una fuente importante de ruido, tanto en los edificios públicos, como privados, ya que el ruido además de producirse en los sistemas de tuberías se transmite a través de las mismas a toda la estructura (por la canalización y el fluido). Su control es difícil ya que se puede originar en muchos sitios, propagándose por la estructura a través de un complejo mecanismo.

Las canalizaciones son unas vías excelentes para transmitir sus propios ruidos, ya que el flujo de líquidos en tuberías puede ser laminar y turbulento, siendo en este último caso el movimiento del fluido irregular (Blanco, F., 2007).

1.6 Banda de frecuencias

La gran mayoría de los sonidos no constan únicamente de una sola frecuencia, sino que están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas. Se puede conocer que frecuencias componen un sonido observando el denominado espectro frecuencial (o simplemente espectro) del mismo, entendiendo por tal la representación de las frecuencias que lo integran junto con su correspondiente nivel de presión sonora.

El conjunto de frecuencias situado entre ambos extremos se denomina banda o margen de frecuencias. Dicha definición es válida para cualquier fuente sonora.

En el caso de la audición humana, la banda de frecuencias audibles para una persona joven y sana se extiende, aproximadamente, de 20 Hz a 20000 Hz (o bien 20 kHz). Las frecuencias inferiores a 20 Hz se llaman subsónicas y las superiores a 20 kHz ultrasónicas, dando lugar a los infrasonidos y ultrasonidos, respectivamente.

1.6.1 Bandas de octava

Dada la amplia banda o gama de frecuencias audibles para realizar estudios de ruido no es posible analizarlas una a una, por lo que ha sido dividida dicha banda en 10 bandas más pequeñas denominadas octavas que se denominan y conocen por su frecuencias centrales: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz (Ramos, y A., 2009).

La **Figura 1.4** muestra un espectro típico, de banda de octava, donde se usan las frecuencias estándar ISO de la banda de las octavas. Cada banda de octavas tiene una anchura de banda de alrededor del 70% de su frecuencia central. Este tipo de espectro se llama banda a porcentaje constante, porque cada banda tiene su anchura que es un porcentaje constante de su frecuencia central. En otras palabras: las bandas de análisis se hacen más anchas en proporción a sus frecuencia centrales (Illanes, 2012).

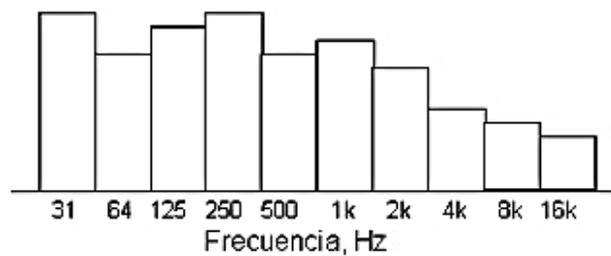


Figura 1.4. Espectro sonoro promediado en bandas de octava (Illanes, 2012).

En la **Tabla 1.2** las 6 bandas de octava sombreadas cuyas frecuencias centrales están comprendidas entre 125 Hz y 4000 Hz son las que generalmente se consideran tanto en la fase de diseño acústico como en el diseño acústico de recintos (Carrión, 1998).

Tabla 1.2. Frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas según la norma ISO 266, en Hz (Las frecuencias sombreadas son las más utilizadas) (Carrión, 1998).

Frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas (ISO 266)										
16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

1.6.2 Banda de tercio de octava

Las bandas de 1/3 de octava se aproximan a la respuesta de las bandas críticas, características de la audición humana. El ancho de banda crítico es el intervalo de frecuencias en el cual el oído no detecta variaciones de presión. En el tercio de octava su ancho de banda son alrededor del 27% de sus frecuencias centrales. Tres bandas de un tercio de octava forman una octava, como ejemplo obsérvese la **Tabla 1.3**.

Tabla 1.3. Bandas de tercio de octava (cada frecuencia en azul representa una octava).

Banda de tercio de octava (Hz)																
100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1160	2000	2500	3150	4000

1.7 Medición del sonido

Debido a la complejidad del funcionamiento del oído humano, hasta el momento actual no ha sido posible diseñar un aparato de medida objetiva del sonido que sea capaz de dar unos resultados del todo equivalentes, para cualquier tipo de sonido, a las valoraciones subjetivas asociadas al mismo. Sin embargo, resulta evidente la necesidad de disponer de un instrumento electrónico que permita medir sonidos bajo unas condiciones rigurosamente prefijadas, de manera que los resultados obtenidos sean siempre objetivos y repetitivos, dentro de unos márgenes de tolerancia conocidos (Carrión, 1998).

1.7.1 Sonómetro

El sonómetro es un instrumento que permite medir el nivel de presión acústica, expresado en decibeles (dB). Está diseñado para responder al sonido de la misma forma aproximadamente que el oído humano y proporciona mediciones objetivas y reproducibles del nivel de presión acústica. Básicamente consiste de un micrófono como transductor de entrada, una sección de procesamiento de señal y una unidad de lectura.

La **Figura 1.5** representa la estructura funcional de un sonómetro, mediante un diagrama a bloques.

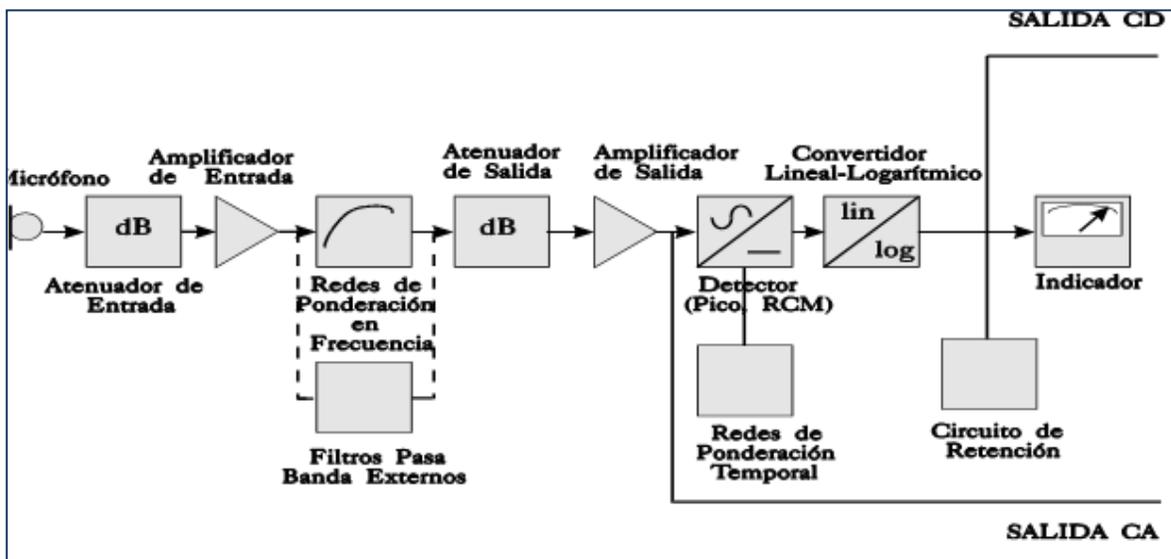


Figura 1.5. Diagrama a bloques del sonómetro (Servín R., 2012).

Pueden realizarse diferentes tipos de procesamiento en la señal, esta puede pasar a través de una red de ponderación en frecuencia, cuya característica de respuesta a la frecuencia varía de manera similar a la del oído humano, simulando los contornos de igual sonoridad. Esto dio por resultado en los sonómetros antiguos a tres diferentes características de ponderación en frecuencia normalizadas internacionalmente, denominadas como ponderación A, B, C:

- **Red de ponderación A:** se pensó para proporcionar una respuesta que se aproxima a la curva invertida de un contorno de igual sonoridad para niveles de presión acústica bajos (< 55 dB).
- **Red de ponderación B:** correspondía a un contorno invertido para niveles de presión acústica medios (55 – 85 dB).
- **Red de ponderación C:** contorno invertido para niveles de presión acústica altos (> 85 dB).



- **Red de ponderación Z:** cero o de respuesta plana.

Para medir el sonido apropiadamente es deseable medir estas variaciones lo más exactamente que sea posible. Sin embargo, si el nivel fluctúa demasiado rápido, los indicadores, particularmente los de tipo analógico (galvanómetros) e inclusive los de tipo digital, cambian tan erráticamente que en ocasiones es imposible obtener una lectura significativa.

Por esta razón, se han normalizado características de respuesta del detector las cuales se conocen como características de ponderación temporal y se obtienen mediante redes eléctricas del mismo nombre.

Las más comunes son la respuesta rápida (fast) y respuesta lenta (slow): La respuesta rápida tiene una constante de tiempo de 125 ms, mientras que la respuesta lenta tiene una constante de tiempo de 1 s (Servín R., 2012).

1.7.2 Sonómetro integrador

El sonómetro integrador realiza medidas del nivel de presión sonora obtenido como resultado de promediar linealmente la presión sonora cuadrática instantánea a lo largo del tiempo de medida. Dicha medida se denomina nivel continuo equivalente de presión sonora y se designa por N_{eq} .

Este tipo de sonómetro representa la alternativa actual al sonómetro convencional, ya que permite disponer de tiempos de promediado más largos, pudiendo llegar a muchos minutos o, incluso, horas.

El nivel N_{eq} se utiliza como criterio de valoración del ruido ocupacional, de acuerdo con la norma ISO 1999 (Carrión, 1998).

1.7.3 Analizador de espectro

Son dispositivos de medición que nos permiten ver gráficamente que es lo que sucede con la frecuencia en el tiempo, en términos de nivel, con una señal determinada. Dado que se trata de un análisis de la frecuencia adquieren el nombre de analizadores de espectro.

Funcionan dividiendo el espectro en grupos de frecuencias, para después aplicar un proceso matemático llamado Transformada Rápida de Fourier o FFT (Fast Fourier

Transform), que transforma una señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y viceversa.

Algunos analizadores de espectro operan usando bandas de frecuencia, siendo las más comunes las bandas de 1/1 octava y 1/3 de octava. El eje de las ordenadas describe la amplitud en dB y el eje de las abscisas indica los valores de frecuencia (Jorge, 2014).

En la **Figura 1.6** muestra un analizador de espectro de tiempo real.



Figura 1.6. Analizador de espectro en tiempo real
(a) PHONIC PAA3 y (b) NORSONIC 132.

1.8 Acondicionamiento acústico

El acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.

El acondicionamiento acústico puede lograr las siguientes ventajas dependiendo del uso que se le destine al recinto seleccionado, como son las siguientes:

- Aumentar el confort acústico interno, disminuyendo el ruido de fondo y mejorando la intimidad.
- Mejorar las condiciones acústicas de sonoridad del recinto, a fin de adecuarlo a unas necesidades específicas según su utilización.



- Proyectar un recinto donde las condiciones acústicas sean fundamentales y definitorias de la actividad, como el caso de un teatro, auditorio, estudio de TV, etc.

El alcance del tratamiento acústico será distinto así como el número de parámetros y consideraciones técnicas que deban ser apreciadas en su desarrollo.

Las condiciones acústicas de un recinto están definidas con base en:

- Niveles sonoros existentes en el interior del recinto provenientes de fuentes sonoras interiores (cañerías, vecinos, máquinas, etc.) o exteriores (tráfico, construcciones, ruido ambiente, etc.) que penetran en el recinto por vía aérea o estructural.
- Tiempo de reverberación
- Distribución del sonido
- Inteligibilidad de la palabra

Dependiendo del uso al que destine el recinto, unos de los factores anteriores serán más prioritarios que otros. Por ejemplo, mientras que en un colegio es fundamental la inteligibilidad de la palabra, en una Sala de conciertos va a ser más importante la distribución del sonido y los tiempos de reverberación.

Aunque, en el fondo, todos estos parámetros están relacionados de alguna manera.

Es obvia la necesidad de respetar unos límites sonoros del diseño si queremos conseguir unas condiciones acústicas favorables.

1.8.1 Absorción

La reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite, es determinante en la calidad acústica final del mismo.

Básicamente, dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por:

- Formas geométricas del recinto.
- Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto.
- Todas aquellas superficies límite de la Sala susceptible de entrar en vibración (como, por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- El aire.



- Las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino también en gran parte de un sin fin de condicionantes y de detalles constructivos, que varían sustancialmente de un caso a otro y que no se pueden representar mediante una expresión matemática. Es por ello que, para realizar cualquier diseño acústico, resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción α obtenidos mediante ensayos de laboratorio (Carrión, 1998).

1.8.2 Coeficientes de absorción

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una parte de la energía es absorbida, otra se refleja y otra se transmite. El coeficiente de absorción sonora (α), representa la fracción de la energía sonora absorbida por un material. El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. Habitualmente se lo especifica para frecuencias centrales de bandas por octava y tercio de octava (García *et al.*, 2013).

Debido a que la determinación de dichos coeficientes se lleva a cabo a partir de la medida de tiempos de reverberación y posterior utilización de la fórmula de Sabine, habitualmente se representan por el símbolo α_{SABINE} o, de forma abreviada, α_{SAB} .

Generalmente se presenta en tablas o en forma de gráfico. El coeficiente de absorción que hacen referencia normalmente los catálogos comerciales es el medido en cámaras reverberantes. Este método está perfectamente especificado en normas. Hay que recalcar que los niveles de coeficientes de absorción obtenidos con diferentes técnicas, también son diferentes.

Los coeficientes de absorción de los materiales de construcción habitualmente utilizados varían desde 0.01 hasta 0.99. Sin embargo, las pruebas de laboratorio algunas veces obtienen coeficientes mayores de la unidad. Esta aparente imposibilidad puede ocurrir debido a las peculiaridades de los métodos de ensayo y difracción de la energía sonora.

Los materiales con coeficientes de absorción medios y altos (> 0.5) se denominan absorbentes; cuando el coeficiente de absorción es bajo (< 0.2) se denominan reflectantes. En cuanto a la denominada absorción A de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción α por su superficie S . La unidad de absorción es el sabin (1 sabin corresponde a la absorción de 1m^2 de ventana abierta).

Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total A_t como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales (Carrión, 1998), es decir (**Ec. 2**):



La absorción total del recinto está dada por la **Ecuación 2**

$$A_t = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i = S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 \dots + S_n \cdot \alpha_n$$

(Ec. 2)

Donde:

A_t = absorción total del recinto (sabins)

S_i = es el área de cada superficie del recinto (m^2)

α_i = es el coeficiente de absorción de cada superficie a una frecuencia determinada

El coeficiente de absorción depende no solamente del material, sino también de la frecuencia y del ángulo de incidencia (Stee y Elias., 2001).

1.8.3 Materiales absorbentes

Por regla general son muy rígidos y con porosidad nula, dan lugar a una mínima absorción del sonido. Si bien, desde un punto de vista físico, la disipación de energía en forma de calor, y por tanto la absorción del sonido, se produce en las capas de aire adyacentes a cada una de las superficies consideradas, a efectos prácticos, dicho fenómeno habitualmente se representa en forma de coeficientes de absorción asignados a dichas superficies.

Su efecto es únicamente apreciable cuando no existe ningún material absorbente en el recinto, ya sea en forma de revestimiento de alguna de sus superficies, o bien de público presente en el mismo. Es el caso, por ejemplo, de las mencionadas cámaras reverberantes, especialmente diseñadas para obtener tiempos de reverberación muy altos.

1.8.3.1 Absorción del aire

La absorción producida por el aire es solamente significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias relativamente altas (≥ 2 kHz) y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire m .

En la **Figura 1.7** se presenta un conjunto de gráficas mediante las que es posible determinar el valor del producto $4m$ en condiciones normales de presión y temperatura ($P_0 = 105 \text{ Pa}$ y 20°C), para cada frecuencia y porcentaje de humedad relativa del aire.

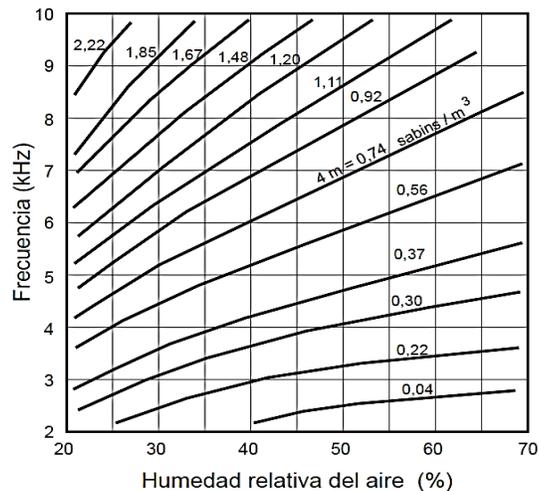


Figura 1.7 Gráficas para la determinación del producto $4m$ (m es la constante de atenuación del sonido en el aire) (Carrión, 1998).

A partir del conocimiento del producto $4m$ y del volumen V del recinto, es posible calcular el valor del tiempo de reverberación T del mismo, teniendo en cuenta la atenuación producida por el aire.

1.8.3.2 Variación de la absorción en función del espesor del material

Siguiendo con la hipótesis anterior de que el material absorbente está colocado delante de una pared rígida y partiendo de que su espesor inicial es D , al aumentar dicho espesor también aumenta la absorción que produce, especialmente a frecuencias bajas y medias. A continuación se expone el motivo por el cual existe dicho incremento de absorción con el espesor.

En primer lugar, es preciso tener en cuenta que la absorción es baja a todas aquellas frecuencias para las que se cumple que el espesor D es mucho menor que la longitud de onda del sonido dentro del material:

$$D \ll \lambda'$$

En efecto, el hecho de que la pared sea rígida obliga a que las partículas de aire situadas en sus inmediaciones no se muevan, es decir, a que su velocidad sea nula. Además, al alejarse de la pared, los valores de dicha velocidad seguirán siendo próximos a cero, ya



que $D \ll \lambda'$. La variación de la amplitud de la velocidad de las partículas de aire "u" en función de la distancia a la pared rígida, para una frecuencia tal que $D \ll \lambda'$.

Al ser dicha velocidad tan baja en todos los puntos del material absorbente, la fricción de las partículas de aire con las paredes de los canales del material es reducida y, en consecuencia, la transformación de energía sonora en energía calorífica es mínima. En cambio, a medida que la frecuencia aumenta, la longitud de onda λ' disminuye, con lo cual el espesor D será cada vez mayor en comparación con λ' . Ello significa que la velocidad "u" dentro del material irá aumentando, la energía disipada se verá incrementada y, por lo tanto, la absorción será mayor.

Se muestra la variación de la velocidad de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida, para una frecuencia tal que $D = \lambda'/4$.

Efectivamente, se puede comprobar que la velocidad de las partículas de aire dentro del material es sustancialmente mayor que en el caso anterior, correspondiente a una banda de frecuencias más bajas ($D \ll \lambda'$).

Por consiguiente, si el espesor D es pequeño, la condición de baja absorción ($D \ll \lambda'$) se cumple a bajas y medias frecuencias. Al incrementar el espesor, dicha condición se verifica para longitudes de onda más elevadas, es decir, para frecuencias inferiores. Ello significa que, a igualdad de frecuencia, la absorción es mayor.

Otra forma de justificar el aumento de absorción con el espesor consiste en tener presente que el camino recorrido por la onda sonora en el interior del material de mayor grosor es también mayor y, además, que la velocidad de las partículas de aire en el interior del nuevo tramo de material adquiere valores más elevados.

En la **Figura 1.8** se muestra la variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente comercial a base de lana de vidrio.

Por otra parte, se puede demostrar que si la onda sonora se ve sometida solamente a una pequeña atenuación dentro del material absorbente, el coeficiente de absorción oscilará de forma periódica entre un valor máximo y otro mínimo, en función de la frecuencia. Los valores máximos tendrán lugar a todas aquellas frecuencias para las cuales el espesor D del material sea igual a $\lambda'/4$ o a un múltiplo impar de $\lambda'/4$.

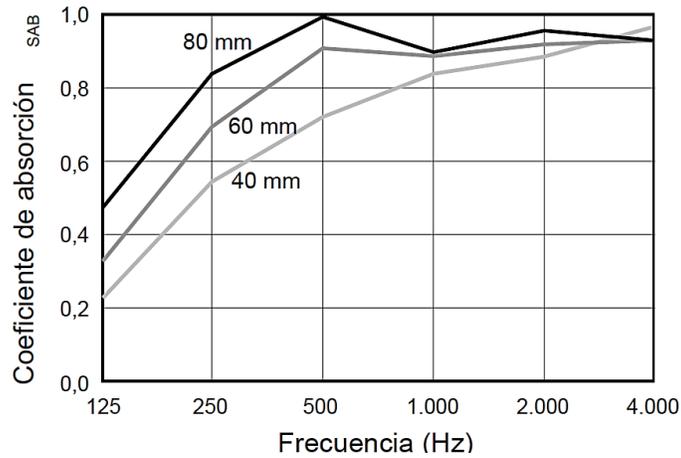


Figura 1.8. Variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente comercial a base de lana de vidrio (Carrión, 1998).

1.8.3.3 Variación de la absorción en función de la porosidad del material

Partiendo de la hipótesis anterior en cuanto a la situación del material, al aumentar su porosidad también aumenta la absorción a todas las frecuencias. Este efecto era de esperar, ya que la penetración de la onda sonora incidente es mayor a medida que se incrementa el grado de porosidad.

En la **Figura 1.9** se observa la evolución del coeficiente de absorción en función de la frecuencia de un mismo material con tres grados de porosidad diferentes, en el supuesto de que la onda sonora se vea sometida a una fuerte atenuación en el interior del material.

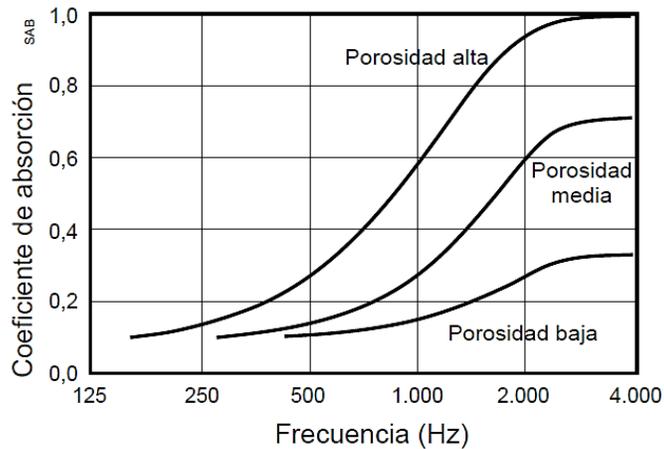


Figura 1.9. Variación de la absorción en función de la frecuencia de un material absorbente con distintos grados de porosidad (Carrión, 1998).

1.8.3.4 Variación de la absorción en función de la densidad del material

Si la densidad del material es baja, existen pocas pérdidas por fricción y, en consecuencia la absorción es pequeña. A medida que la densidad va aumentando, se produce un incremento progresivo de absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda sonora en el material, es decir, una mayor reflexión de energía.

Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente 40 y 70 Kg/m^3 , no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/m^3 . En la **Figura 1.10** se muestran los valores de los coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m^3 , respectivamente.

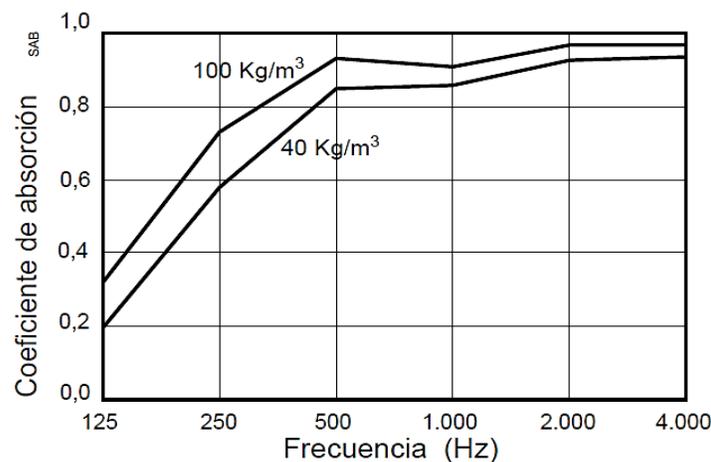


Figura 1.10 Coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m^3 (Carrión, 1998).

1.8.3.5 Variación de la absorción en función de la distancia del material a la pared rígida

Si se pretenden obtener coeficientes de absorción elevados a bajas frecuencias, no es imprescindible hacer uso de materiales muy gruesos. Basta con utilizar un material con un espesor medio y colocarlo a una cierta distancia de la pared rígida, sabiendo que la máxima absorción se producirá a aquella frecuencia para la cual la distancia "d" del material a la pared sea igual a $\lambda/4$ (en este caso, λ es la longitud de onda del sonido cuando se propaga a través del aire existente entre el material y la pared). Ello es debido a que la amplitud de la velocidad de las partículas de aire es máxima para $d = \lambda/4$, como se muestra en la **Figura 1.11**.

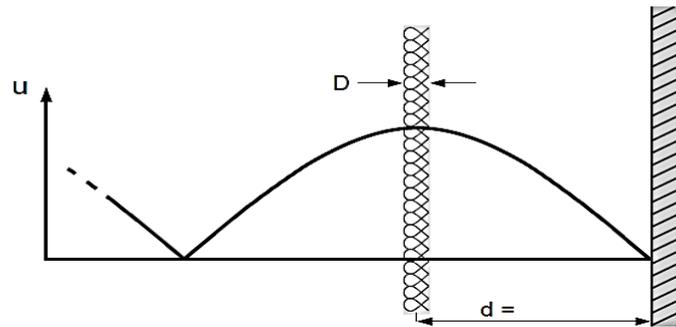


Figura 1.11 Amplitud de la velocidad "u" de las partículas de aire en el interior de un material absorbente situado a una distancia de la pared rígida $d = \lambda/4$ (Carrión, 1998).

Cuanto mayor sea "d", menor será la frecuencia a la que la absorción será máxima. Por lo tanto, para aumentar la absorción a bajas frecuencias, es preciso incrementar la separación entre el material y la pared. De todas formas, dicha mejora se ve contrarrestada por una disminución de absorción a frecuencias más elevadas.

1.8.4 Protección de los materiales absorbentes

En muchas ocasiones, resulta conveniente cubrir los materiales absorbentes por la cara expuesta al recinto. Los principales motivos son los siguientes (Carrión, 1998):

- En el curso del tiempo, algunos materiales desprenden partículas que pueden llegar a contaminar el aire de la Sala.
- Si los materiales están al alcance del público, existe el peligro de que puedan resultar dañados.
- El arquitecto habitualmente desea ocultarlos por razones eminentemente estéticas.

A continuación se indican los recubrimientos más comúnmente utilizados:

- Velo acústicamente transparente
- Superficie microporosa
- Placa rígida de mortero poroso a base de granos de mármol, piedras naturales o cuarzo pigmentado
- Placa de viruta de madera fina aglomerada con magnesita o cemento
- Lamina de plástico o de papel
- Panel perforado o ranurado de madera, chapa metálica o cartón-yeso
- Ladrillo perforado o ranurado



1.8.5 Reverberación

La reverberación se refiere a la persistencia de sonido en el interior de un recinto debida a las reflexiones sucesivas de sonido que ocurren en las superficies límites de éste, después de que ha cesado la emisión de energía acústica de una fuente sonora (Servín R., 2012). La reverberación es un aspecto fundamental para el diseño del acondicionamiento acústico de un recinto.

La reverberación influye de manera importante en la claridad con la que se entiende un mensaje hablado, es decir, la inteligibilidad de la palabra hablada, o en la calidad con la que se escuchan obras musicales.

1.8.5.1 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación se define como el tiempo necesario para que el nivel de presión acústica disminuya en 60 decibeles después de que se interrumpe la emisión de energía acústica de la fuente sonora. Se suele abreviar mediante la letra T o también como TR_{60} y se expresa en segundos (s) (Servín, R., 2012).

Un recinto con un tiempo de reverberación grande se denomina "vivo", por ejemplo, una iglesia, mientras que si el tiempo de reverberación es pequeño recibe el nombre de recinto "muerto" o "sordo", como es el caso de un estudio de grabación o un locutorio (Carrión, 1998).

Dentro de los elementos a tomar en cuenta en el diseño del acondicionamiento acústico se encuentran la actividad a la que estará destinado el recinto y el tiempo de reverberación óptimo.

Asimismo, es necesario calcular el volumen interno del recinto y las áreas de las diferentes superficies que integran los contornos o límites del recinto, esto es, muros, techo y piso.

1.8.5.2 Tiempo de reverberación óptimo

El tiempo de reverberación óptimo se refiere usualmente al valor recomendado de tiempo de reverberación para cada recinto a la frecuencia de 500 Hz, considerando su uso y su volumen. Este valor está basado en la opinión pública de la calidad acústica de recintos existentes. El valor del tiempo de reverberación óptimo se considera como referencia para el diseño del acondicionamiento acústico de recintos.



En ocasiones se utiliza el promedio aritmético de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz. Cuando se establece un valor único recomendado de tiempo de reverberación. Este valor se representa por T_{mid} .

Cuando se trata de recintos destinados a la voz, es conveniente que los valores del tiempo de reverberación sean bajos, a fin de conseguir una buena inteligibilidad. En salas de conciertos son recomendables unos valores más elevados del tiempo de reverberación para que la audición musical resulte óptima.

Para fines de diseño, se considera el tiempo de reverberación óptimo para las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, frecuencias a las que los fabricantes proporcionan los coeficientes de absorción de sus productos.

Para calcular el tiempo de reverberación usualmente se utiliza la ecuación de Sabine o la ecuación de Norris-Eyring. En el proceso de cálculo es conveniente considerar la definición de materiales que se tengan contemplados como parte del concepto arquitectónico. Es aconsejable distribuir lo más uniforme posible los materiales a emplear dentro del recinto.

En general, el valor más adecuado de T_{mid} depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de T sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima.

En la **Tabla 1.4** se dan los márgenes de valores recomendados de T_{mid} para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas (Carrión, 1998).

Tabla 1.4. Márgenes de valores recomendados de T_{mid} en función del tipo de Sala (recintos ocupados) (Carrión, 1998).

Tipo de Sala	T_{mid} Sala ocupada (s)
Sala de conferencias	0.7 – 1.0
Cine	1.0 – 1.2
Sala polivalente	1.2 – 1.5
Teatro de ópera	1.2 – 1.5
Sala de conciertos (música de cámara)	1.3 – 1.7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1.8 – 2.0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2.0 – 3.0
Locutorio de radio	0.2 – 0.4



1.8.5.3 Ecuaciones de tiempo de reverberación óptimo

Rettinger (1977), propone valores de tiempo de reverberación óptimo para diferentes recintos suponiendo una ocupación de las dos terceras partes, haciendo uso de las ecuaciones de la **Tabla 1.5**:

Tabla 1.5. Ecuaciones de tiempo de reverberación óptimo (Rettinger M., 1977)

Recinto	Ecuación
Iglesias católicas	$0.4 \log V - 0.4$
Iglesias protestantes, sinagogas	$0.35 \log V - 0.35$
Salas de concierto	$0.3 \log V$
Salas de ópera	$0.25 \log V$
Salas de música de cámara	$0.2 \log V$
Cines	$0.2 \log V + 0.1$
Estudios de grabación (límite inferior)	$0.15 \log V$
Estudios de grabación (límite superior)	$0.2 \log V$
Salas de conferencias	$0.2 \log V - 0.1$

Estas ecuaciones evitan la dificultad que se presenta al usar las gráficas, de estimar la posición en el eje horizontal que corresponde al valor del volumen; sin embargo, hay que considerar que estas ecuaciones fueron derivadas empíricamente y no tienen un sustento teórico. Es conveniente también tener presente que en las ecuaciones anteriores el volumen está dado en pies cúbicos.

1.8.5.4 Cálculo del tiempo de reverberación

Para diseñar el acondicionamiento acústico de un recinto que se va a construir o para hacer el diagnóstico del estado actual de un recinto que ya está construido, se emplea una ecuación para calcular el tiempo de reverberación. Aunque se han desarrollado diferentes ecuaciones a lo largo del tiempo, se coincide con Rettinger en el sentido de que solo dos de ellas han pasado la prueba de la "validez popular", la de Sabine y la de Norris-Eyring (Rettinger, M., 1977). Cabe señalar que las ecuaciones que permiten calcular el tiempo de reverberación están basadas explícitamente o implícitamente en condiciones de difusión de la energía acústica en el recinto bajo consideración.



Ecuación de Wallace Clement Sabine para el cálculo de tiempo de reverberación (**Ec. 3**).

$$T = \frac{0,161 V}{A_t} = \frac{0,161 V}{S_t \bar{\alpha}_i} = \frac{0,161 V}{\sum_{i=1}^n S_i \alpha_i} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

T = Tiempo de reverberación

V = Volumen del recinto, en m^3

S_i = Área de la superficie i , en m^2

α_i = Coeficiente de absorción de la superficie i

De la **Ecuación 3** se puede despejar la absorción total del recinto, que se define como **Ecuación 4**:

$$A_t = \frac{0.161 V}{T} \quad (\text{Ec. 4})$$

A_t = Absorción total del recinto

De la **Ecuación 3** se obtiene la superficie total del recinto:

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_i = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad (\text{Ec. 5})$$

S_t = Área de la superficie total del recinto, en m^2 (paredes + techo + suelo).

A partir de A_t (**Ec. 4**) es posible calcular el coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$ dividiendo la absorción total A_t por la superficie total del recinto S_t :

$$\bar{\alpha} = \frac{A_t}{S_t} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \alpha_i}{S_t} \quad (\text{Ec.6})$$

$\bar{\alpha}$ = Coeficiente de absorción promedio del recinto



▪ Ecuación de Norris-Eyring

Durante los años 1930 a 1932 Eyring y Norris desarrollaron de forma independiente una teoría de la reverberación que tuviera validez cuando en el recinto existe una elevada absorción. Hay que tener presente que la teoría de Sabine fue concebida para salas con un grado de absorción pequeño.

$$T = \frac{0,161 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

(Ec. 7)

Donde:

Las magnitudes involucradas corresponden con las definidas para la ecuación de Sabine.

1.8.5.5 Elección de ecuación para cálculo del tiempo de reverberación

De acuerdo con Rettinger (1977), la ecuación de Sabine es aplicable a recintos con una absorción moderada, es decir, cuando el coeficiente de absorción promedio $\bar{\alpha}$ es menor que 0,15, en tanto que la ecuación de Norris-Eyring es empleada generalmente para recintos con $\bar{\alpha}$ mayor que 0,15.

Según Mehta, Johnson y Rocafort (1999), si $\bar{\alpha}$ es menor que 0.2 es preferible usar la ecuación de Sabine, mientras que si es mayor que 0.2 es recomendable emplear la ecuación de Norris-Eyring.

1.8.5.6 Control del tiempo de reverberación

Los materiales absorbentes sonoros pueden ser utilizados para controlar la reverberación de forma que la palabra no sea ininteligible. Cuanto mayor sea el volumen de la habitación, mayor será la reverberación porque las ondas sonoras encontrarán superficies con las que chocar menos frecuentemente que en recintos pequeños. Cada vez que doblamos la cantidad total de absorción en una habitación, el tiempo de reverberación se reduce a la mitad.

La absorción sonora puede hacer que el sonido parezca venir directamente de la fuente sonora en vez de venir de cualquier lugar de la habitación (Stee y Elias ,2001).

1.8.6 Inteligibilidad de la palabra

En la comunicación oral, una persona o un altoparlante transmite un mensaje, codificado en un idioma, a través de un determinado recinto, hasta los oídos de un oyente que recibe y decodifica el mensaje. La comunicación puede fallar por una mala pronunciación del hablante, escaso entendimiento del idioma o problemas auditivos por parte del oyente. Pero también puede fallar debido las características acústicas del recinto.

Es fácil comprender cómo el ruido impide la comunicación: el mensaje se ve enmascarado por el ruido y el oyente no puede decodificarlo correctamente. La solución consiste en mejorar la relación señal/ruido, ya sea atenuando el ruido de fondo o aumentando el nivel del mensaje. Sin embargo, no es igual de fácil comprender el efecto de la reverberación.

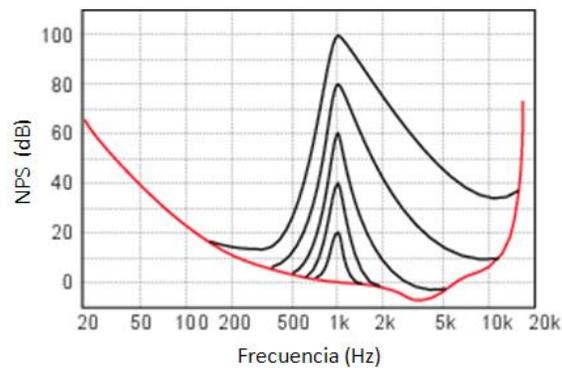
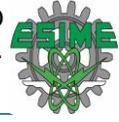


Figura 1.12. Señal/ruido. En rojo: umbral de audición.
En negro: enmascaramiento que provoca un tono de 1kHz a diferentes amplitudes (Ramón, 2014).

Las palabras habladas no están separadas como en un texto. El oyente recibe un sonido continuo compuesto por una secuencia de fonemas, en los cuales se reconocen vocales y consonantes. Las últimas son sonidos impulsivos, de corta duración y energía distribuida principalmente en alta frecuencia; mientras que las primeras tienen mayor duración, menos ataque y energía en menor frecuencia.

Se ha estudiado que la información necesaria para el entendimiento de un mensaje se encuentra en la envolvente dinámica del discurso, es decir, el oyente necesita percibir correctamente los cambios entre vocales y consonantes, así también como las pausas y acentuaciones para decodificar correctamente.



En un recinto con largos tiempos de reverberación, el decaimiento energético de una vocal resulta más lento que el de una consonante debido a su distribución espectral y mayor duración. Esto genera un solapamiento temporal con las consonantes inmediatamente posteriores y un consecuente enmascaramiento. Es decir, las vocales que permanecen en la cola reverberante enmascaran, parcial o totalmente, a las consonantes siguientes; y así se entorpece la inteligibilidad del mensaje.

Es un grave error, es querer solucionar este problema aumentando el nivel de presión sonora del mensaje, puesto que también aumentarán las reflexiones y el enmascaramiento seguirá sucediendo a mayor nivel. La solución radica en aumentar la distancia crítica.

La distancia crítica es la distancia (referida a la fuente) para la cual el nivel de presión sonora del sonido directo es igual al nivel de presión del sonido reflejado. Todos los oyentes que estén dentro de la distancia crítica recibirán el sonido directo con mayor intensidad que las reflexiones y no sufrirán enmascaramiento, mientras que los que estén por fuera tendrán mayor nivel de reflexiones que de sonido directo y sufrirán enmascaramiento. Se puede calcular con la siguiente expresión: $D_c = 0.14 \sqrt{Q \cdot R}$

En donde Q es el factor de directividad de la fuente, y R es un parámetro que cuantifica la capacidad de absorción de la Sala.

Es decir, para mejorar la inteligibilidad en un recinto reverberante se debe aumentar la absorción del recinto para bajar el tiempo de reverberación y aumentar la distancia crítica, o bien, utilizar fuentes con directividad controlada que concentren su energía en la audiencia y eviten reflexiones innecesarias.

Otra opción válida consiste en utilizar muchas fuentes distribuidas, para lograr que todos los oyentes posean al menos una fuente a una distancia menor que la distancia crítica.

Una buena relación señal/ruido y un controlado tiempo de reverberación son dos condiciones necesarias para lograr una buena inteligibilidad en recintos.

1.8.6.1 Características del mensaje oral

Cuando una persona emite un mensaje, emplea un tiempo mayor en la emisión de las vocales que en la de las consonantes. Es por ello que las vocales constituyen el llamado régimen permanente del habla, mientras que las consonantes se asocian al régimen transitorio (Carrión, 1998).

La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms, reduciéndose a 20 ms en el caso de una consonante.



El hecho de que la duración de las vocales sea más elevada hace que el nivel de presión sonora asociado a las mismas sea, en promedio, del orden de 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes.

Por otra parte, su contenido frecuencial es más rico en bajas frecuencias, mientras que las consonantes presentan una mayor contribución de altas frecuencias.

Por otro lado, el grado de inteligibilidad de la palabra está estrechamente relacionado con la correcta percepción de las altas frecuencias.

En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral. En cambio, la información contenida en las vocales es redundante. En la **Tabla 1.6** se resumen las características mencionadas.

Tabla 1.6. Características relevantes del mensaje oral (Carrión, 1998)

	Duración (promedio)	Contenido frecuencial dominante	Nivel (promedio)	Contribución a la inteligibilidad de la palabra
Vocales	≈ 90ms	Bajas frecuencias	Nivel vocales ≈ Nivel consonantes + 12 dB	Baja
Consonantes	≈ 20ms	Altas frecuencias		Alta

Según se puede observar, la máxima contribución al nivel de la voz se sitúa en la zona de frecuencias medias, destacando la banda de 500 Hz con un 46%.

En cambio, la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra está situada a frecuencias más elevadas (57% sumando la contribución de las bandas de 2 y 4 kHz).

La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor de directividad Q. El factor Q depende de la relación entre el nivel de presión sonora producido por dicha fuente en la dirección considerada y el nivel que se obtendría si la fuente no fuese directiva. Cuanto mayor sea el nivel de presión sonora en una dirección determinada, mayor será el valor de Q en dicha dirección.

La voz humana presenta unas características de directividad que vienen determinadas por el sistema de fonación y la forma de la cabeza, siendo la dirección frontal la de mayor directividad.

Si bien la directividad aumenta con la frecuencia a efectos prácticos, se considera que el factor de directividad de la voz humana en la dirección frontal es $Q=2$ **Figura 1.13** (Carrión, 1998).

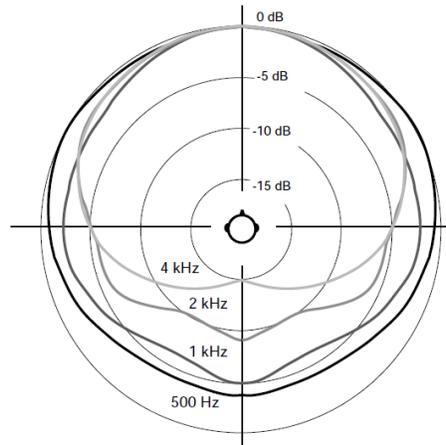


Figura 1.13. Directividad de la voz humana en las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz y 4 kHz (según Moreno y Pfretzschner) (Carrión, 1998).

1.8.6.2 Cálculo de inteligibilidad %ALcons (Articulation Loss of Consonants)

Además del inconveniente que representa para la inteligibilidad de la palabra la existencia de eco o eco flotante en una sala, la comprensión de un mensaje oral depende fundamentalmente de la correcta percepción de sus consonantes.

A principios de la década de los años 70, el investigador holandés V. M. A. Peutz llevó a cabo un trabajo exhaustivo a partir de la cual estableció expresiones para calcular la inteligibilidad.

El trabajo se dividió en dos partes. La primera consistió en realizar una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos, basadas en la emisión de un conjunto preestablecido de "logatomos", que son palabras sin significado formadas por consonante-vocal-consonante.

Cada individuo receptor registraba lo que escuchaba, y posteriormente se procesaba toda la información recabada y se calculaba una estadística de los resultados obtenidos. Por ejemplo, si el porcentaje medio de logatomos detectados correctamente en uno de los recintos era de 85 %, se consideraba entonces que la pérdida de información era de un 15 %.



Como dicha pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, Peutz la denominó % de pérdida de articulación de consonantes, que se abrevia %ALCons (del inglés Articulation Loss of Consonants).

La segunda parte consistió en encontrar un modelo matemático, que a partir de parámetros acústicos del recinto bajo estudio permitiese determinar el valor de %ALCons en cada punto, sin necesidad de realizar pruebas laboriosas con audiencias (Carrión, 1998).

Haciendo uso de la teoría acústica estadística, Peutz dedujo que el valor de %ALCons en un punto dado se podía determinar a partir de las **Ecuaciones 8 y 9**:

$$\%ALCons = \frac{200 r^2 T^2}{V Q} \quad (\text{Para: } r \leq 3,16 D_c) \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\%ALCons = 9 T \quad (\text{Para: } r > 3,16 D_c) \quad (\text{Ec.9})$$

Donde:

r = Distancia entre el emisor (orador) y el receptor (m)

T = Tiempo de reverberación de la Sala (s)

V = Volumen de la Sala (m^3)

D_c = Distancia crítica (m)

$$D_c = 0.14 \sqrt{QR} \quad (\text{Ec. 10})$$

Q = Factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada ($Q=2$ en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador), constante de la sala, en segundos.

$$R = \frac{S_t \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

R = constante de la Sala (s)

S_t = Superficie total de la Sala (m^2)

$\bar{\alpha}$ = Coeficiente de absorción promedio de la sala (Sabins ó m^2)



Usualmente el %ALCons se calcula en la banda de 2 kHz, por tratarse de la banda de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia. Para distancias, el valor de %ALCons tiende a ser constante, lo cual significa que a partir de esta distancia, la inteligibilidad de la palabra ya no empeora, en la **Tabla 1.6** se indica la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

Tabla 1.7. Valoración subjetiva del grado de inteligibilidad (Carrión, 1998)

%ALCons	Valoración subjetiva
1.4 % - 0 %	Excelente
4.8 % - 1.6 %	Buena
11.4 % - 5.3 %	Aceptable
24.2 % - 12 %	Pobre
46.5 % - 27 %	Mala

Otro factor que contribuye a la pérdida de inteligibilidad, es el ruido de fondo existente en la Sala. Se considera que su efecto es despreciable, cuando el nivel correspondiente al ruido de fondo está como mínimo 10 ó 12 dB por debajo del nivel de la señal de interés (Servín R., 2012).

1.8.6.3 Índice de transmisión del habla (Speech Transmission Index "STI")

Es preciso indicar que existe otro parámetro alternativo que permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. Dicho parámetro, conceptualmente más complejo, se denomina STI ("Speech Transmission Index") y su valor oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total (Carrión, 1998)).

Houtgast y Steeneken han desarrollado desde 1973 uno de los métodos objetivos para predecir la calidad de la transmisión del habla de un canal de comunicación. Este método está basado en la aplicación de una señal de prueba específica. La calidad de la transmisión es derivada del análisis de la señal recibida y es expresada por un índice, el índice de transmisión del habla (STI). El STI está basado en la contribución ponderada de un número de bandas de frecuencia.

Actualmente, la norma IEC 60268-16 define el método para la estimación de la inteligibilidad del habla mediante el parámetro STI que reconoce como cercano a la valoración subjetiva de la inteligibilidad.



De acuerdo con la norma 60268-16, el índice de transmisión del habla STI es una medida objetiva para predecir la inteligibilidad del habla transmitida de un orador a un oyente por un canal de transmisión.

Para cuantificar el deterioro de la inteligibilidad del habla inducida por el canal de transmisión, se utiliza entonces el método rápido y objetivo del STI. El método STI aplica una señal de prueba específica al canal de transmisión y mediante el análisis de la señal de prueba recibida, se deduce la calidad de transmisión del habla del canal y se expresa por medio de un valor entre 0 y 1, como el índice de transmisión del habla STI.

Usando el valor obtenido del STI puede determinarse la inteligibilidad del habla potencial. Aunque hay limitaciones al método STI, el uso del STI ha demostrado ser útil en muchas situaciones y ha ganado aceptación internacional.

Los valores STI están en el intervalo de 0 a 1. Las valoraciones subjetivas equivalentes se muestran en la **Tabla 1.8**.

Tabla 1.8. Valores STI y valoración subjetiva equivalente

STI	Valoración subjetiva equivalente
0.0 < STI < 0.3	Malo
0.3 < STI < 0.45	Pobre
0.45 < STI < 0.6	Regular
0.6 < STI < 0.75	Bueno
0.75 < STI < 1.00	Excelente

Se ha podido demostrar que existe una muy buena correlación entre los valores de %ALCons y de STI (Carrión, 1998). Las relaciones entre STI y ALcons (%) están dadas mediante las ecuaciones **(12)** y **(13)**.

$$AL_{cons}(\%) = 170.5405 e^{-5.419 STI} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$STI = -0.1845 \ln (AL_{cons}(\%)) + 0.9842 \quad (\text{Ec. 13})$$

1.8.7 Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra

Al emitir un mensaje oral, la duración de las vocales y su correspondiente nivel de presión sonora es mayor que el de las consonantes. Además, el contenido frecuencial de las vocales es más rico en bajas frecuencias, en tanto que las consonantes presentan un mayor contenido de altas frecuencias. En una sala con un tiempo de reverberación alto, el decaimiento energético de una vocal emitida en la misma es apreciablemente más lento que su decaimiento propio (aquél que se observaría si la vocal se emitiese en el espacio libre). Tal hecho, junto con la mayor duración y nivel comentados anteriormente, provoca un solapamiento temporal de la vocal con la consonante emitida inmediatamente después, según se observa en la **Figura 1.14**.

La simultaneidad temporal de la vocal y de la consonante con sus correspondientes niveles, así como las características espectrales de ambos sonidos, son las causantes del enmascaramiento parcial o total de la consonante, producido por la vocal (un tono de baja frecuencia y nivel elevado enmascara otro tono de frecuencia más elevada y nivel inferior) (Carrión, 1998).

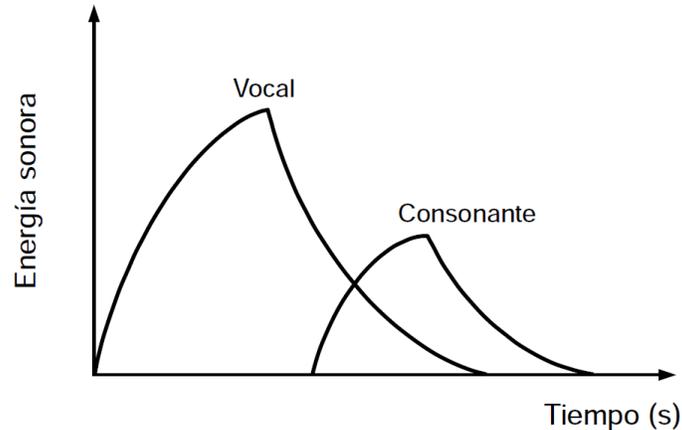


Figura 1.14. Evolución temporal de la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en un recinto cerrado según Kurtovic (Carrión, 1998).

Finalmente, el grado de inteligibilidad está estrechamente ligado a la correcta percepción de las consonantes por su importante contenido de altas frecuencias, el enmascaramiento de las mismas debido a un exceso de reverberación provoca indefectiblemente una pérdida de inteligibilidad en la Sala.

1.9 Criterios de evaluación del ruido

Los criterios de evaluación del ruido son especificaciones de los niveles de presión acústica máximos permisibles por bandas de octava, de acuerdo con el uso del recinto (Beranek, 1957).

1.9.1 Curvas NC

La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente se realiza por comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC ("Noise Criteria").

Las curvas NC son además utilizadas de forma generalizada para establecer los niveles de ruido máximos recomendables para diferentes tipos de recintos en función de su aplicación (oficinas, salas de conferencias, teatros, salas de conciertos, etc.).

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC-20) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos en cada una de dichas bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente.

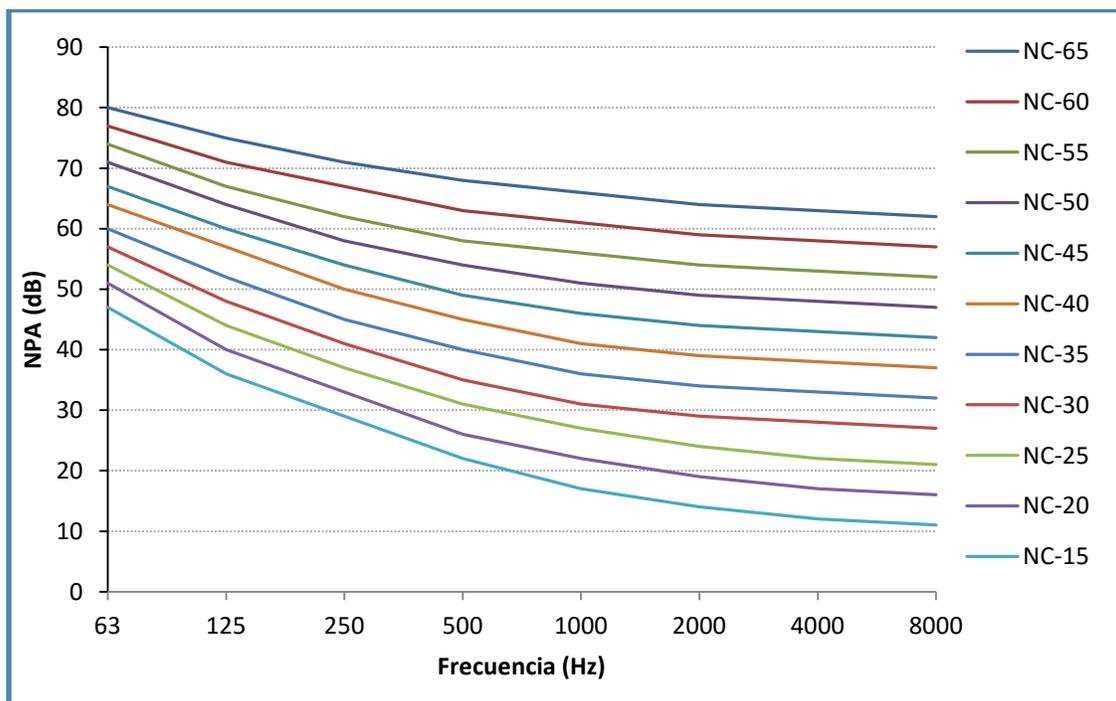


Figura 1.15. Curvas de criterio de ruido NC ("Noise Criteria") (Servín, R., 2012).



Según se puede observar en la **Figura 1.15**, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Ello significa que, para una determinada curva NC, los niveles NPA máximos permitidos a bajas frecuencias (sonidos graves) son siempre más elevados que los correspondientes a frecuencias altas (sonidos agudos), ya que el oído es menos sensible a medida que la frecuencia considerada es menor. Lógicamente, para verificar el cumplimiento de una determinada especificación NC, es necesario analizar el ruido de fondo presente en el recinto por bandas de octava.

En la **Tabla 1.9** se muestran las curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos, junto con su equivalencia en dBA (Carrión, 1998).

Tabla 1.9. Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (dBA) (Carrión, 1998).

Tipos de recintos	Curva NC recomendada	Equivalencia en dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-40	46-50
Cafeterías	40-45	50-60
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Finalmente, cabe mencionar que existen otros criterios de evaluación del ruido de fondo, como las curvas PNC ("Preferred Noise Criteria") y las NR ("Noise Rating"), de funcionamiento operativo análogo a las curvas NC.

1.9.2 Ruido de fondo

Se considera ruido de fondo todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad. Dicho ruido puede ser debido al sistema de climatización, a las demás instalaciones eléctricas y/o hidráulicas, e incluso puede provenir del exterior del recinto (por ejemplo, el ruido de tráfico).



La evaluación del grado de molestia que un determinado ruido de fondo provoca sobre un oyente se hace por comparación de los niveles de ruido existentes en la sala, para cada banda de octava comprendida entre los 63 Hz y los 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC ("Noise Criteria").

Las curvas NC son, además, utilizadas para establecer los niveles máximos recomendados para diferentes tipos de espacios en función de su uso.

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC-15, NC-20, etc.) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos por bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente, para todas las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz.

1.10 Aislamiento acústico

Aislar acústicamente un recinto significa impedir (reducir o anular) que los sonidos generados dentro del mismo trasciendan hacia el exterior y, recíprocamente, que los ruidos externos se perciban desde su interior (Miyara, 1999).

1.10.1 Proceso de transmisión acústica

Cuando las ondas acústicas inciden en una partición, entendiéndose por ésta elementos constructivos tales como muros, pisos, o techos así como puertas y ventanas, las presiones acústicas variables que actúan sobre la superficie la ponen en movimiento y una porción de energía asociada a las ondas se transfiere a la partición. Si la partición es un panel homogéneo, ambos lados vibrarán simultáneamente y las mismas vibraciones aparecerán en la superficie de la partición opuesta a aquella en la cual incidieron las ondas, produciendo ondas acústicas en el espacio adyacente. En particiones más complejas, las cuales pueden consistir por ejemplo en un arreglo formado por varios materiales, parte de la energía de las ondas puede disiparse dentro de la partición (Servín R., 2010).

1.10.2 Parámetros descriptores del aislamiento acústico por vía aérea

De acuerdo con Harris-Cyril y colaboradores (1997), los parámetros empleados son: la pérdida por transmisión o índice de reducción acústica, la reducción de ruido y la reducción normalizada de ruido.



De estos descriptores el más común es la pérdida por transmisión o el índice de reducción acústica. Los norteamericanos usan el primero, mientras que los europeos emplean el último. Para fines de trabajo, el interés se centrará en estos parámetros que son equivalentes.

1.10.3 Pérdida por transmisión acústica

La pérdida por transmisión es la razón de la energía acústica que incide en la partición con respecto a la energía acústica transmitida, expresada en dB, y es una medida de las propiedades de aislamiento acústico de una partición, que es característica propia de la partición en sí misma y no del recinto que la confina. La expresión de la pérdida por transmisión o índice de reducción acústica R , determinada en condiciones de laboratorio según la norma ISO 140/III² es:

$$R' = 10 \log_{10} \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \text{ dB} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

R' = Pérdida por transmisión o índice de reducción acústica (dB)

W_1 = potencia acústica incidente en un espécimen bajo prueba (w)

W_2 = potencia transmitida a través del espécimen (w)

La pérdida por transmisión depende del ángulo de incidencia.

Si los campos acústicos son difusos y sí existe transmisión únicamente a través del espécimen, el índice de reducción acústica para incidencia difusa puede evaluarse mediante la **Ecuación 15**:

$$TL = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde

$R' = TL$ = pérdida por transmisión (dB)

L_{p1} = nivel de presión acústica promedio en el recinto fuente (dB)

L_{p2} = nivel de presión acústica promedio en el recinto receptor (dB)

S = superficie del muro constructivo (m²)

A = área equivalente de absorción en el recinto receptor



La pérdida por transmisión de una partición (muro constructivo) varía con la frecuencia, usualmente aumentando a medida que aumenta la frecuencia. Se determina el valor de pérdida por transmisión necesaria a partir de la **Ecuación 16**.

$$TL_n = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

TL_n = pérdida por transmisión necesaria (dB).

Si el recinto ya está construido, se compara el valor de TL_n con el de pérdida por transmisión existente TL_e (pérdida por transmisión existente), para obtener la pérdida por transmisión existente se aplica la **Ecuación 15** (con diferentes condiciones). Se debe cumplir:

$TL_e > TL_n$ en todas las bandas de frecuencia, esto implica que el recinto no requiere tratamiento acústico.

Si el recinto se va a construir o se requiere modificar para conseguir un aislamiento aceptable, se debe cumplir:

$TL_p > TL_n$ en todas las bandas de frecuencia.

Donde TL_p es la pérdida por transmisión propuesta para cumplir con el criterio de ruido seleccionado, se calcula con la **Ecuación 15** (con diferentes condiciones).

1.10.4 Reducción de ruido

La reducción de ruido entre dos recintos es la diferencia entre el nivel de presión acústica promedio medida en un recinto que contiene una fuente sonora y la medición en el recinto adyacente.

1.10.5 Nivel de ruido esperado en el recinto receptor

El nivel de ruido esperado L_{p2} en el recinto receptor, tiene que ser menor que la curva del criterio de ruido correspondiente al tipo de recinto receptor, está dado por la **Ecuación 13**, donde se despeja L_{p2} como se observa en la **Ecuación 17**:



$$L_{P2} = L_{p1} - TL_p + 10 \log \frac{S}{A}$$

(Ec. 17)

Donde:

L_{P2} = nivel de presión acústica promedio en el recinto receptor (dB)

TL_p = pérdida por transmisión propuesta (dB)

L_{p1} = nivel de presión acústica promedio en el recinto fuente (dB)

S = superficie del muro constructivo (m^2)

A = área equivalente de absorción en el recinto receptor

Como se mencionó anteriormente la condición que hay que cumplir es:

$$L_{P2} < L_p$$

Donde:

L_p = nivel de presión acústico del criterio de ruido seleccionado.

1.10.6 Transmisión sonora (STC)

La clase de transmisión sonora (del inglés Sound Transmission Class, que se abrevia STC) es una especificación de una sola cifra del desempeño de la pérdida por transmisión del sonido por vía aérea de un material o división constructiva, obtenida a partir de los valores de pérdida por transmisión medidos a las bandas de frecuencia normalizadas por tercios de octava.

1.10.7 Aislamiento de ruido aéreo

Las vibraciones que se ocasionan en una estructura, no quedan confinadas en dicho elemento, sino que una parte se disipa en calor y la otra se transmite como vibraciones y sonido al medio circundante del elemento.

Existen tres propiedades físicas que inciden, principalmente en el aislamiento de los elementos constructivos **Figura 1.16**.

Masa: El aislamiento acústico depende de la masa del elemento divisorio. La ley física de masa indica que existe una mejora de 6 dB en el aislamiento al duplicar la masa. Esto es válido para elementos macizos tales como muros. En el caso de elementos con cámara de aire interior la masa también influirá positivamente en el aislamiento.

Rigidez: Es una medida de la elasticidad de los cuerpos. En el caso del aislamiento acústico, el análisis de esta propiedad va directamente relacionado con la frecuencia. En algunos casos convendrá disminuir la rigidez del sistema (solución constructiva) como es el caso de las estructuras soportantes de tabiques. En otros casos, será necesario aumentarla, como por ejemplo en los revestimientos.

Amortiguación: Es conveniente que los elementos constructivos sean capaces, de disipar energía sonora, siendo la amortiguación una medida de esto. A mayor amortiguación habrá mayor disipación (Sanchez *et al.*, 2006).

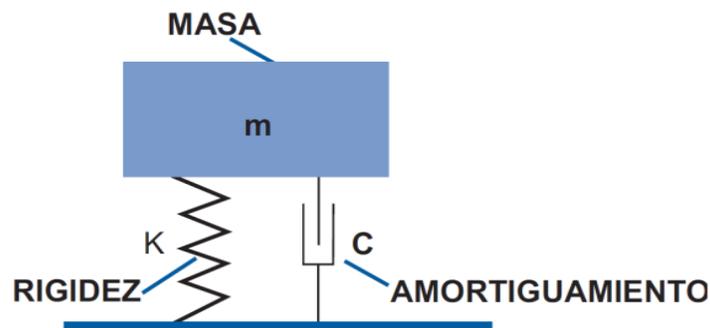


Figura 1.16. Sistema masa resorte (Sanchez *et al.*, 2006).

1.10.8 Materiales aislantes de ruido

Se considera un material como aislante acústico cuando tiene la propiedad de ser absorbente sonoro, debido a que posee un elevado coeficiente de absorción acústica en todo o en parte del espectro de frecuencias de sonidos audibles por el ser humano, que van en un rango desde los 20 Hz hasta los 20 kHz.



Capítulo 2

Análisis de las condiciones acústicas actuales de la Sala I

2.1 Aplicaciones y usos

Capacidad de personas:

- De 30 a 42 personas sentadas.

Actualmente la Sala I funge para las siguientes aplicaciones:

- Conferencias
- Debates
- Exposiciones
- Talleres
- Cursos
- Diplomados
- Certificaciones

Como se observó en las aplicaciones, predomina el uso de la voz.

2.2 Ubicación geográfica de la BNCT

La biblioteca nacional de ciencia y tecnología "Ing. Víctor Bravo ahuja" (BNCT) del instituto politécnico nacional se encuentra ubicada en: Av. IPN S/N casi esquina con Wilfrido Massieu C.P. 7738 Col. Lindavista Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", obsérvese **Figura 2.1**.

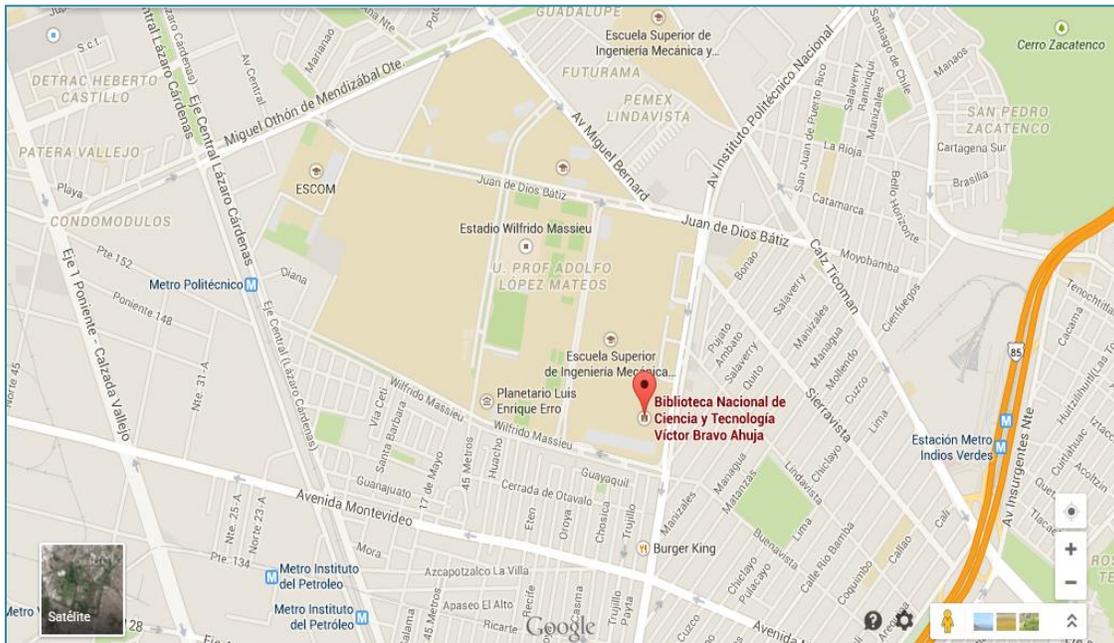


Figura 2.1. Ubicación satelital de la BNCT

2.3 Plano de ubicación de la Sala I

En la **Figura 2.2** se muestra el plano de distribución de las salas en el Sótano No.2 de la BNCT.

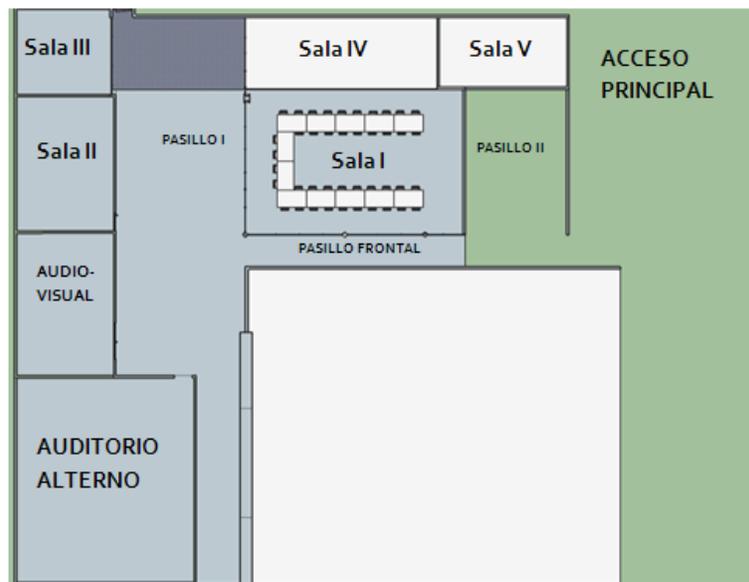


Figura 2.2. Vista en planta: ubicación de la Sala I.

Para mayor visualización se muestra la **Figura 2.3** donde se observa nuevamente la distribución de salas en el Sótano No. 2 de la BNCT en isométrico.



Figura 2.3. Vista en isométrico 2: ubicación de la Sala I.

2.4 Dimensiones y materiales de la Sala I de la BNCT

A continuación se muestra en la **Tabla 2.1** las dimensiones de la Sala I con respecto a cada sección (muros constructivos, piso y techo), para mayor entendimiento véase **Figura 2.3** y en la **Tabla 2.2** se muestran las dimensiones totales de Sala I.

Tabla 2.1. Dimensiones por muro constructivo de Sala I.

Sección	Material	Dimensiones				
		Alto (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Superficie (m ²)
Muro Sala IV	Vidrio	2.29	9.98	-	0.06	22.85
Muro Sala V	Tablaroca	2.29	1.33	-	0.06	3.04
Muro Pasillo frontal	Vidrio	2.44	11.31	-	0.06	27.59
Muro Pasillo I	Vidrio	2.44	-	7.50	0.06	18.3
Muro Pasillo II	Tablaroca	2.29	-	7.50	0.06	17.17
Piso	Mármol	-	11.31	7.50	0.06	84.82
Techo (Plafón)	Yeso	-	11.31	7.50	0.16	84.82
Superficie total						258.56

Tabla 2.2. Dimensiones totales de Sala I.

Alto (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	Volumen Total (ft ³)
2.44	11.31	7.50	206.97	7309.1

2.4.1 Imágenes de las dimensiones y distribución en Sala I

En la **Figura 2.4** se muestra las dimensiones en planta de la Sala I, así como la distribución del mobiliario (mesas y sillas) dentro de la Sala I.

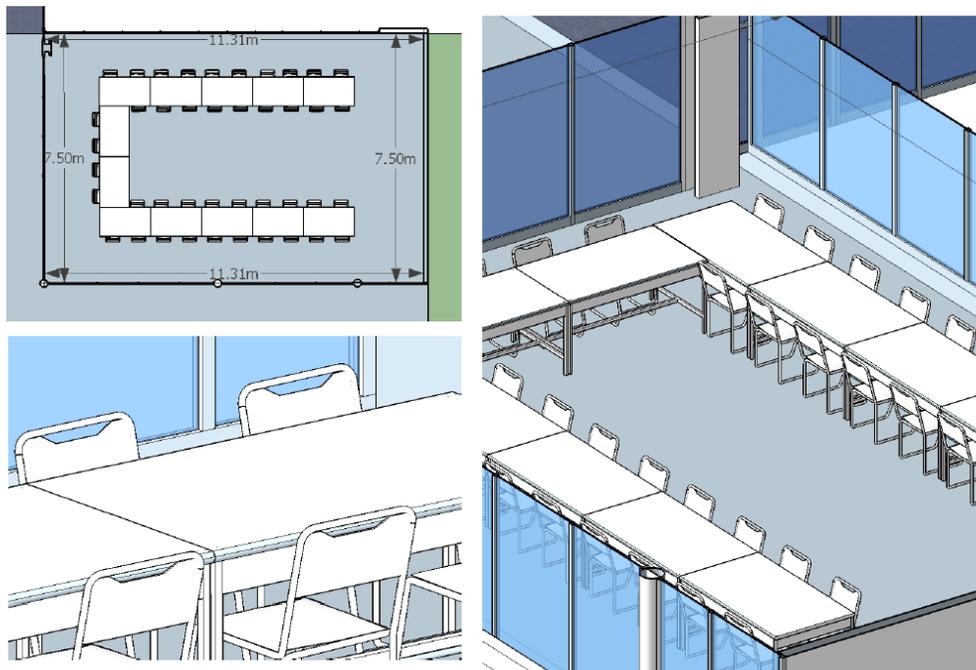


Figura 2.4. Vista en planta: dimensiones de Sala I; vista en isométrico: distribución de mobiliario.

En la **Figura 2.5** se muestra el muro constructivo Pasillo I – Sala I y sus correspondientes acotaciones (medidas reales) (**Anexo A, Figura A2**).

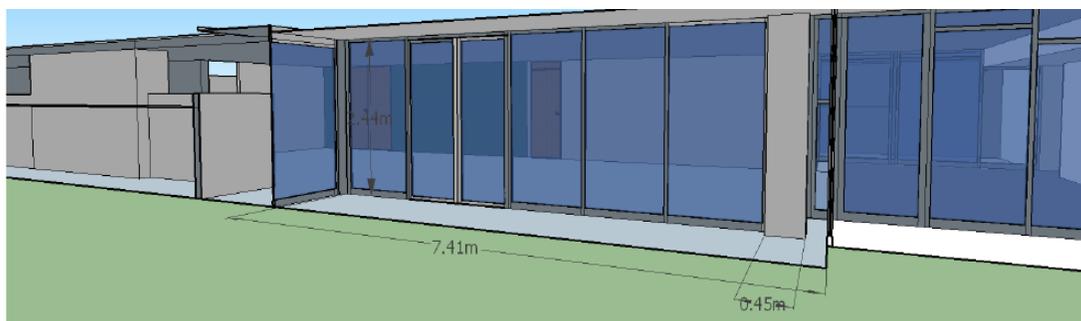


Figura 2.5. Vista en isométrico: Pasillo I.

En la **Figura 2.6** se muestra el muro constructivo Pasillo II – Sala I y sus correspondientes acotaciones (medidas reales) (**Anexo A, Figura A6**).

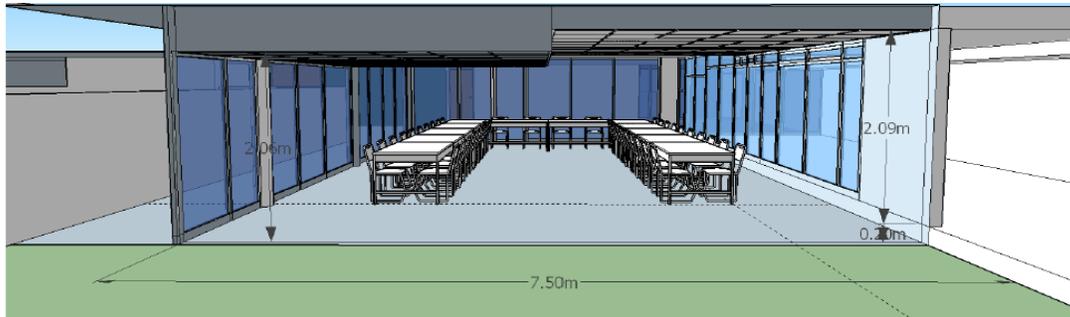


Figura 2.6. Vista en isométrico: Pasillo II.

En la **Figura 2.7** se muestra el muro constructivo Pasillo lateral – Sala I y sus correspondientes acotaciones (medidas reales) (**Anexo A, Figura A4**).

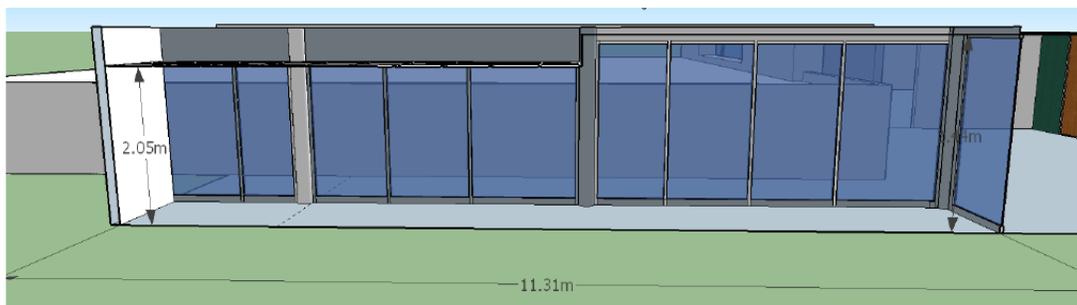


Figura 2.7. Vista en isométrico: Pasillo lateral.

En la **Figura 2.8** se muestra el muro constructivo Sala IV – Sala I (sección de vidrio) y el muro constructivo Sala V – Sala I (sección de tablaroca) y sus correspondientes acotaciones (medidas reales) (**Anexo A, Figura A5**).

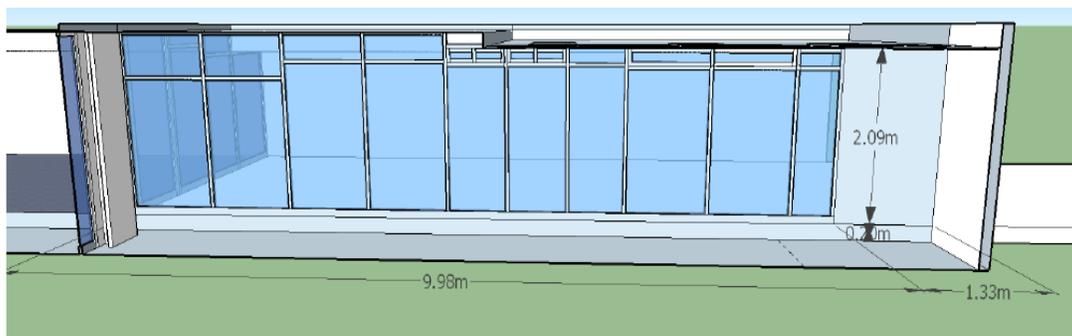


Figura 2.8. Vista en isométrico: frontal de la Sala IV - Sala V.

2.5 Análisis del ruido de fondo

Para realizar las mediciones del ruido de fondo en la Sala I ésta se encontró vacía en su interior, así como las salas más cercanas incluyendo los Pasillos I, II y lateral, el equipo de medición utilizado fue el sonómetro analizador de espectro NORSONIC 132, se eligió debido a que el ruido de fondo en algunas bandas era menor de 30 dB, otra ventaja es que despliega los datos en bandas de octava. Se utilizó un calibrador y un tripié para sostener al sonómetro.

▪ Caso 1

Las mediciones se realizaron con la ubicación de puntos de medición **Figura 2.7**, se eligieron 6 puntos aleatorios a una altura no inferior del piso de 1.20 m, esto fue tomado de la referencia de NOM-081-ECOL-1994. Se programó al sonómetro en la ponderación Z (respuesta plana), se le dio un tiempo de respuesta medio, después se procedió a medir el nivel de presión acústica "NPA" (dB).

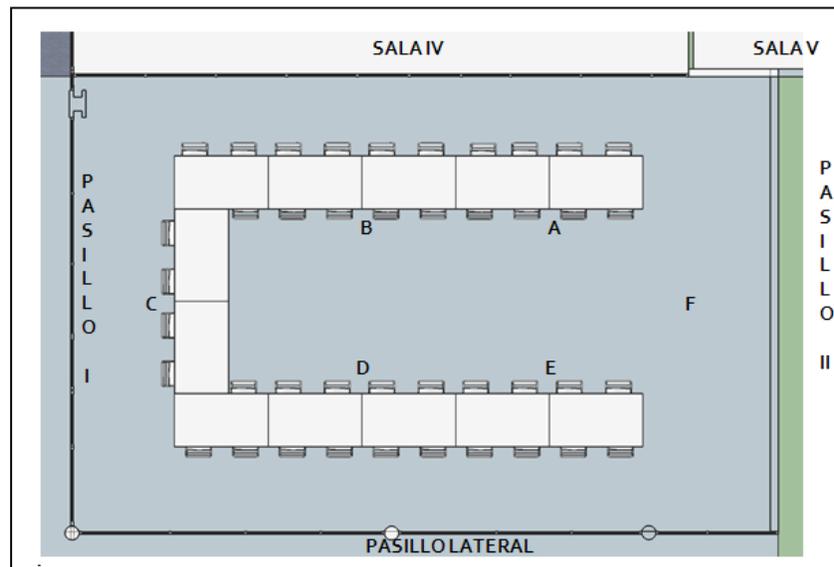


Figura 2.9. Vista de planta: distribución de mobiliario y ubicación de los puntos de medición, Sala I.

Las mediciones realizadas son mediciones continuas (una medición continua es la medición de un ruido fluctuante que se realiza sin interrupción durante el periodo de observación). Se tomó el nivel equivalente (N_{eq}) en cada punto (temporal) con un tiempo de 1 minuto, una vez registrados los valores se realizó análisis espacial (promedio de todos los puntos de medición), como se observa en la **Tabla 2.3**.

Tabla 2.3. Medición de ruido de fondo en los 6 puntos distribuidos en Sala I y promedio, caso 1.

Frecuencia (Hz)	NPA _A (dB)	NPA _B (dB)	NPA _C (dB)	NPA _D (dB)	NPA _E (dB)	NPA _F (dB)	NPA _{PROM} (dB)
63	50.6	51.4	53.5	46.6	46.5	52.7	50.99
125	43.1	42.3	45.1	42.1	43.2	44.1	43.44
250	39.3	37	44.3	42.5	46.2	40.5	42.68
500	41.3	33.2	43.7	37.2	38.9	37.1	39.79
1k	31.5	32.1	37.4	34.1	29.9	36.4	34.38
2k	28.3	23.6	30.2	29.4	23.8	36.5	30.99
4k	26.2	21.4	27.1	21.8	19	28.6	25.28

En la **Figura 2.10** se muestra el espectro acústico promedio del ruido de fondo en la Sala I, de acuerdo a las condiciones del Caso 1.

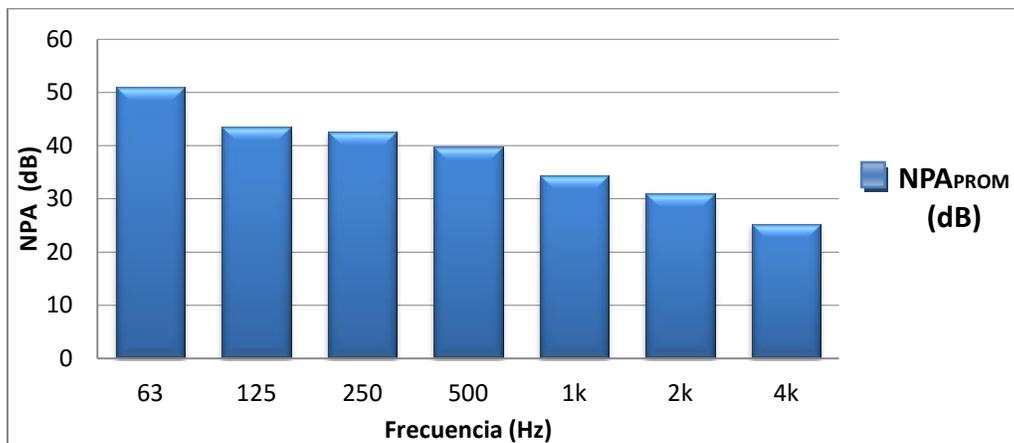


Figura 2.10. Espectro acústico: promedio de ruido de fondo, Caso 1.

▪ Caso 2

Una vez evaluado el ruido de fondo con las condiciones anteriores (Caso 1), se procedió a hacer una medición del ruido de fondo dentro de la Sala I con la Sala IV en funcionamiento, es decir la Sala IV con una película en reproducción al volumen habitual, en este caso la el Sótano 2 no estaba vacío. Se tomaron estas condiciones ya que las condiciones de ruido de fondo en el caso 1 son poco probables, y al realizar las mediciones con un factor adicional, en este caso la Sala IV en funcionamiento y personas en general en la sección, modifican considerablemente el NPA y por lo tanto ya no se cumple con los criterios de ruido recomendados (curvas NC).

El procedimiento de medición, registro y análisis es el mismo que en el primer caso.

En la **Tabla 2.4** se observa solo el promedio del ruido de fondo en NPA por banda de octava.

Tabla 2.4. Ruido de fondo, Caso 2.
(Sala IV en funcionamiento: reproducción de película).

Frecuencia (Hz)	NPA2 _{PROM} (dB)
63	51.14
125	45.92
250	51.90
500	56.06
1k	53.73
2k	44.58
4k	34.99

En la **Figura 2.11** se muestra el espectro acústico promedio del ruido de fondo en la Sala I, de acuerdo a las condiciones del caso 2.

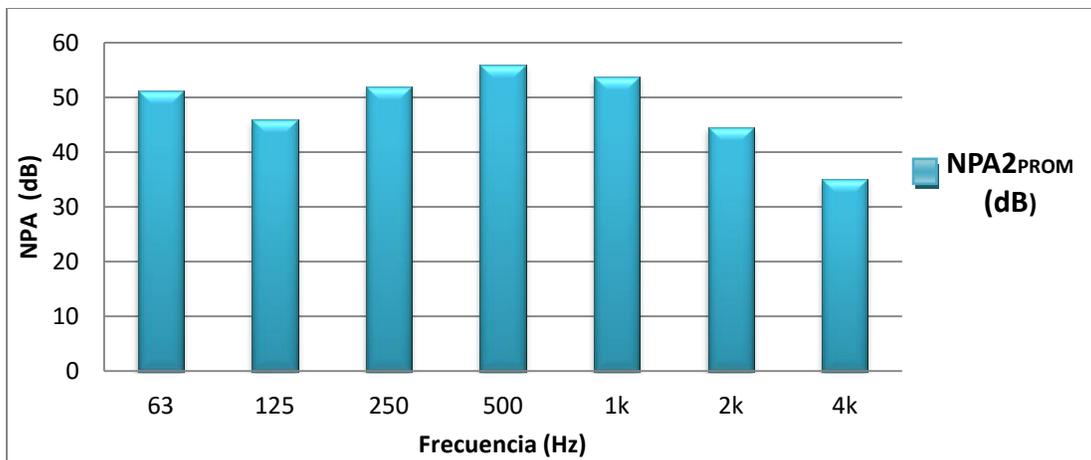


Figura 2.11. Espectro acústico: promedio de ruido de fondo, Caso 2.

2.5.1 Comparación de valores obtenidos en la Sala I vs la curva NC recomendada

De acuerdo con los criterios de ruido de las curvas NC en relación con el uso del espacio, se seleccionó que la Sala I sea del tipo de recinto de una Sala de conferencia o aulas, como se muestra en la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.5. Curva de criterio de nivel de ruido recomendado para recintos acústicos.

Tipos de recintos	Curva NC recomendada	Equivalencia en dBA
Salas de conferencias / aulas	20-30	33-42

Una vez seleccionado el rango de la curva NC, se tomó el límite máximo recomendado, en este caso el NC= 30; se procede a compararlo con los valores medidos de ruido de fondo dentro de la Sala I, como se muestra en la **Tabla 2.6:**

Tabla 2.6. Comparación de valores NC recomendados y ruido de fondo medido.

Frecuencia central banda de octava (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NC-30 (dB)	57	48	41	35	31	29	28	27
NPA (dB)	50.99	43.44	42.68	39.79	34.38	30.99	25.28	21.49
NPA2 (dB)	51.14	45.92	51.90	56.06	53.73	44.58	34.99	26.38

Se observa la comparación gráfica del criterio de ruido NC-30 y del primer y segundo caso en la **Figura 2.12**. Se visualiza que ninguno de los dos casos cumple con el criterio de ruido establecido para Salas de conferencias (NC-30), por lo que únicamente se tomara a modo de referencia el caso 1, debido a que las condiciones de este caso son poco probables, ya que la mayoría de las veces que se utiliza la Sala I, el sótano 2 está ocupado por otras personas, ya sea en otras salas, en los pasillos, el personal encargado de la administración o de mantenimiento, por lo tanto a fin de diseño y análisis se realizará la evaluación y/o la propuesta en base a los resultados obtenidos con el caso 2 (NPA2).

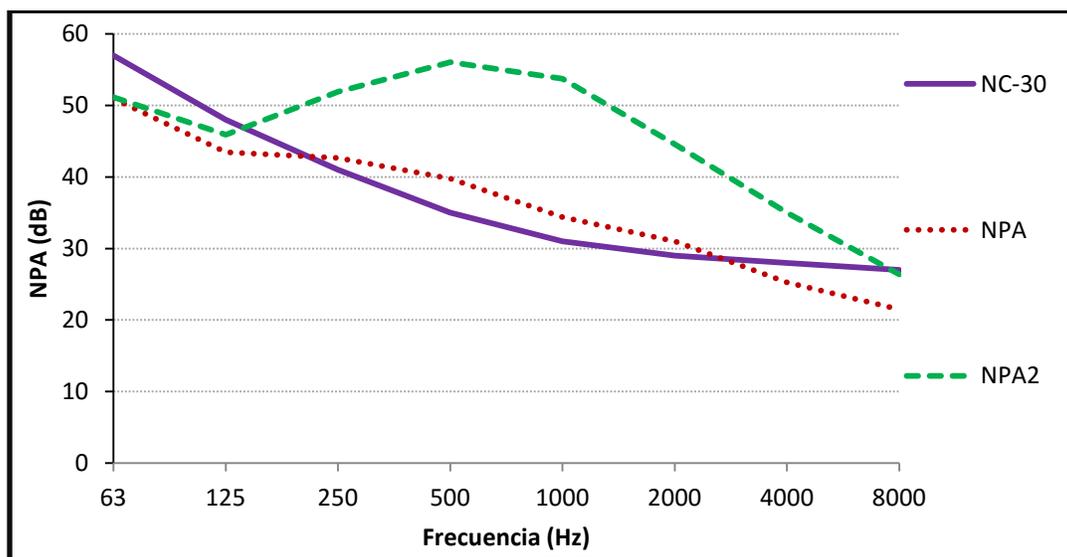


Figura 2.12. Comparación de la curva NC-30 vs Caso 1 (NPA) y Caso 2 (NPA2)

Resultados:

Se observa que la Sala I no cumple con los valores recomendados de las curvas de criterio de ruido NC-30, por lo tanto se recomienda realizar un aislamiento acústico.

2.6 Análisis de tiempo de reverberación

Se tomó como referencia la norma internacional ISO 3382 para medir el tiempo de reverberación dentro de la Sala I. Las mediciones del tiempo de reverberación se realizaron con el método de interrupción de ruido (*interrupted noise method*).

Se utilizó el sonómetro analizador de espectro PHONIC PAA3, ya que tiene la función de medir el tiempo de reverberación (T), debido a que este sonómetro analizador de espectro no es capaz de filtrar los ruidos por bandas de octava, se procedió a realizar las mediciones con ruido rosa filtrado para poder evaluar y analizar cada dato por banda de octava. Las mediciones se realizaron por banda de octava de 125 Hz a 4kHz. Se utilizó una fuente omnidireccional, un amplificador y una laptop para reproducir el ruido rosa filtrado, así como un tripié para sostener al sonómetro (**Anexo A, Figura A8**).

Al realizar la medición la única condición fue que la Sala I estuviera vacía. Se establecieron los puntos de medición dentro de la Sala I, debido a que el mínimo de puntos es de 3 o 4 dentro del área en este caso se establecieron 4 puntos como se muestra en la **Figura 2.13**. Los puntos de medición fueron ubicados donde normalmente las personas están presentes, se distribuyeron geométricamente en el recinto, separados mínimo 2 metros entre los puntos y 1.2 metros de altura con relación al piso.

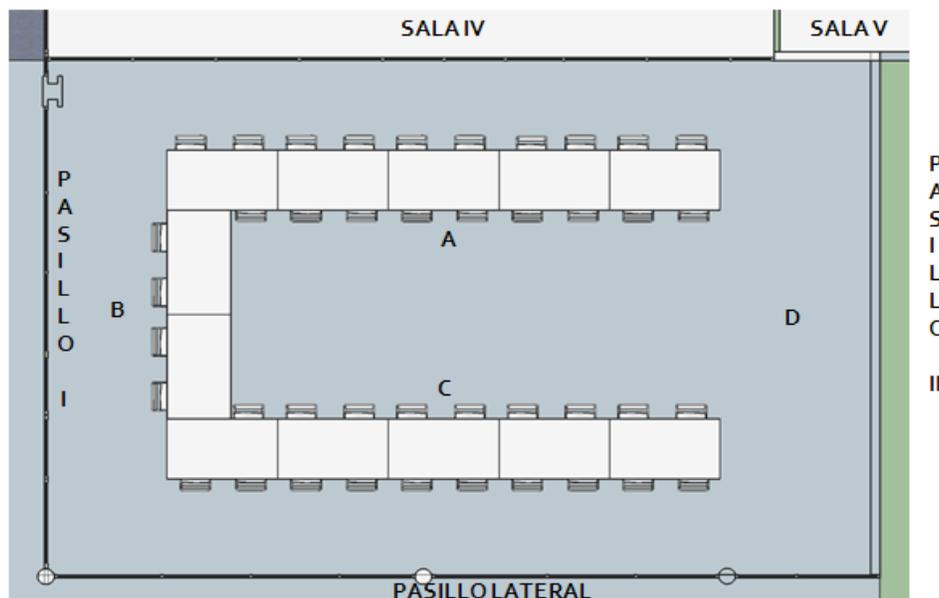


Figura 2.13. Vista en planta: distribución de los puntos de medición, Sala I.

Se observa en la **Tabla 2.7** los resultados de la medición del tiempo de reverberación en el punto A. Como se mencionó anteriormente, se tomaron 3 mediciones por punto (T_1 , T_2 y T_3) (**Anexo A, Figura A9**) y se obtuvo el promedio con la **Ecuación 18** en cada punto (A – D).

$$\bar{T} = \frac{\sum_{n=1}^3 T_i}{3} \quad (\text{Ec. 18})$$

Tabla 2.7. Tiempo de reverberación medido en el punto A.

Frecuencia (Hz)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	\bar{T}_A (s)
125	1.25	1.26	1.25	1.25
250	1.2	1.21	1.31	1.24
500	1.08	1.14	1.08	1.10
1k	1.13	1.13	1.1	1.12
2k	1.1	1	1	1.03
4k	0.87	0.87	0.87	0.87

Se realizó el mismo procedimiento que en la **Tabla 2.7** para los puntos de medición A, B, C y D, como se muestra en las tablas **Tabla 2.8, 2.9, y 2.10**.

Tabla 2.8. Tiempo de reverberación medido en el punto B.

Frecuencia (Hz)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	\bar{T}_B (s)
125	1.39	1.31	1.24	1.31
250	1.23	1.14	1.25	1.21
500	1.12	1.04	1.1	1.09
1k	1.14	1.14	1.08	1.12
2k	1.02	1.03	1.01	1.02
4k	0.91	0.91	0.91	0.91

Tabla 2.9. Tiempo de reverberación medido en el punto C.

Frecuencia (Hz)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	\bar{T}_C (s)
125	1.23	1.2	1.21	1.21
250	1.3	1.22	1.28	1.27
500	1.19	1.13	1.22	1.18
1k	1.17	1.04	1.04	1.08
2k	1.03	1.01	1.03	1.02
4k	0.93	0.89	0.9	0.91

Tabla 2.10. Tiempo de reverberación medido en el punto D.

Frecuencia (Hz)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	\bar{T}_D (s)
125	1.34	1.26	1.29	1.30
250	1.25	1.21	1.13	1.20
500	1.12	1.06	1.17	1.12
1k	1.1	1.07	1.08	1.08
2k	1	1.03	1.02	1.02
4k	0.9	0.89	0.88	0.89

Una vez obtenido el tiempo de reverberación promedio T en los 4 puntos de medición, se procedió a calcular el tiempo de reverberación promedio total en la Sala I; en la **Tabla 2.11** se observan los resultados.

Tabla 2.11. Tiempo de reverberación Promedio de los puntos A, B, C y D.

Frecuencia (Hz)	\bar{T} (s)
125	1.27
250	1.23
500	1.12
1k	1.10
2k	1.02
4k	0.89

En la **Figura 2.14** se observa el tiempo de reverberación promedio correspondiente a las mediciones.

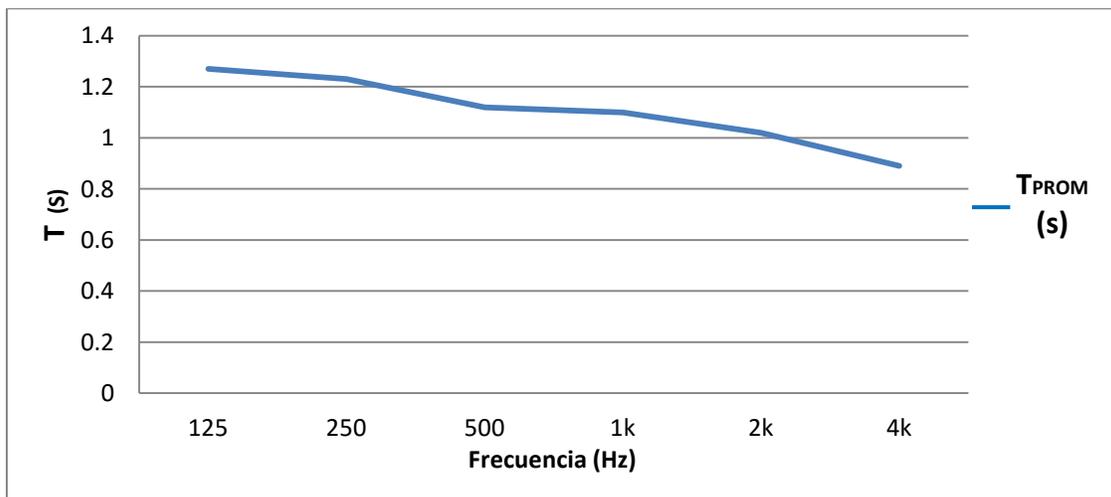


Figura 2.14. Tiempo de reverberación promedio \bar{T} también denotada T_{PROM} de los puntos A, B, C y D.

Una vez obtenido el tiempo de reverberación dentro de la Sala I, se procedió a calcular el tiempo de reverberación óptimo con respecto al volumen total del recinto para fines de mejoras en el diseño, en este caso para acondicionamiento acústico y determinar si el valor medido cumple con este parámetro.

El tiempo de reverberación óptimo se refiere usualmente al valor recomendado de tiempo de reverberación para cada recinto a la frecuencia de 500 Hz, considerando su uso y su volumen.

Con base en la **Figura 2.15** de Metha y Rocafort (1999), se logró determinar el tiempo de reverberación con relación al volumen real de la Sala I a 500 Hz, así como para obtener el tiempo de reverberación óptimo.

Primero se ubicó el uso que se le va a dar a la Sala I, en este caso se ubica la recta "Sala de conferencias" en la **Figura 2.15**, una vez ubicada esta recta se procede a realizar la conversión de metros cúbicos a miles de metros cúbicos de acuerdo a este autor, para así poder ubicarlo en el volumen del recinto (eje x). Después se traza una línea vertical desde el eje de las x hasta tocar la línea "Sala de conferencias", una vez ubicado este punto sobre esta línea, se procede a trazar una línea horizontal hacia T_{500} (eje y), con esto se ubica el tiempo de reverberación óptimo a 500 Hz.

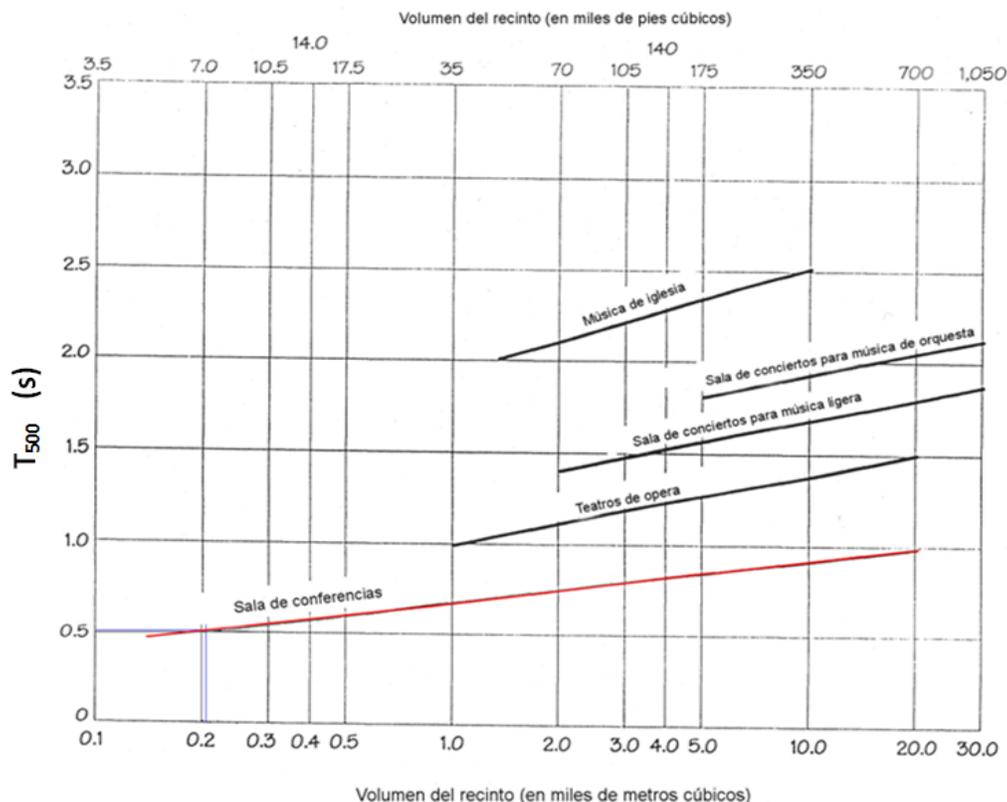


Figura 2.15. Tóptimo Metha M. Johnson, Rocafort J.
Para el tiempo de reverberación con relación al volumen a 500 Hz.



En la **Figura 2.15** se determinó que 0.5 segundos equivale a 2.8 cm, se hace la relación en 2.85 cm, obteniendo como resultado un tiempo de reverberación en 500 Hz de 0.508 segundos, con el volumen de 206.97 m³.

Se realizó el procedimiento anterior pero ahora con el tóptimo recomendado por Smith B. J., Peters R. J. y Owen S. Se determinó en el tóptimo que 0.8 segundos equivale a 2.9 cm, se hace la relación en 2.1 cm, obteniendo como resultado un tiempo de reverberación en 500 Hz de 0.579 segundos, con el volumen de 206.97 m³.

De acuerdo con las ecuaciones de tiempo de reverberación óptimo de Michael Rettinger (**Punto 1.8.5.3**) tenemos para una Sala de conferencias (**Tabla 1.5**) la siguiente ecuación:

$0.2 \log V - 0.1$, siendo $V = 206.97 \text{ m}^3$ convertido a pies cúbicos tenemos: $V = 7309.1 \text{ ft}^3$, se obtuvo un tiempo de reverberación óptimo de 0.672 segundos.

Promediando los tres valores de tiempo óptimo de reverberación tenemos:

- $T_{mid}(500) = 0.586 \cong 0.59 \text{ s}$

Mehta y Rocafort (1999) conceden una tolerancia de $\pm 20\%$ en el valor del tiempo de reverberación óptimo a 500 Hz, lo cual puede traducirse como un criterio de aceptabilidad en el diseño, que puede ampliarse a las demás frecuencias.

Tolerancia del 20%, es decir $0.59 \text{ s} \pm 20\%$, con lo cual el +20% es 0.708 s y el -20% es 0.472 s, este intervalo de tolerancia es el que se utilizó.

Para fines de diseño, se considera el tiempo de reverberación óptimo para las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, debido a que los fabricantes especifican los coeficientes de absorción de los materiales a estas frecuencias.

Un criterio que puede emplearse para definir el comportamiento deseado del tiempo de reverberación óptimo en función de la frecuencia para los casos de lenguaje, es el de Kinsler L. y Frey A., el cual es mostrado en la **Figura 2.16**.

Para un tiempo de reverberación normalizado a 500 Hz observamos que:

$$\frac{T}{T_{500}} = 1$$

Se tomó como referencia esta grafica para lenguaje, debido que el recinto Sala I es para el uso de la voz.

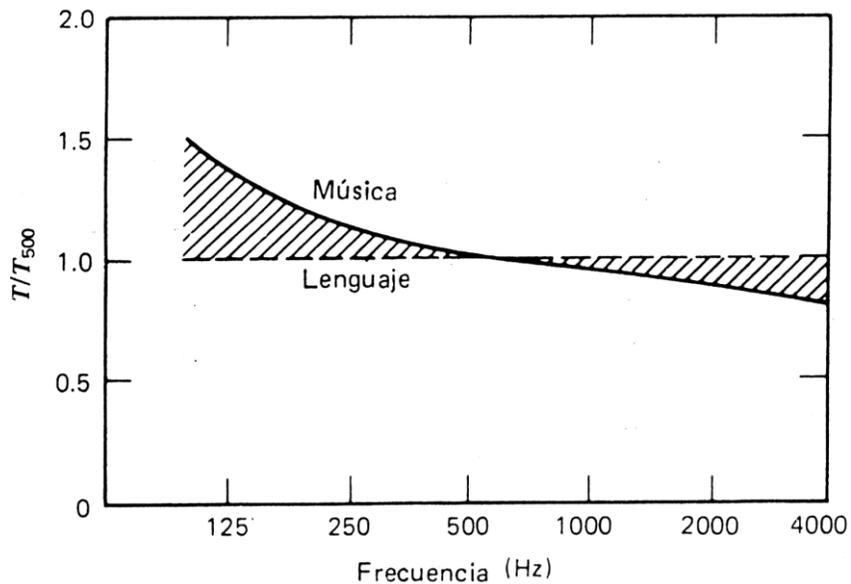


Figura 2.16. Tiempo de reverberación óptimo en función de la frecuencia (Kinsler *et al.*, 1993).

En la **Figura 2.17** se observa la comparación entre el tóptimo de tiempo de reverberación medido y el tiempo óptimo en cada banda de octava.

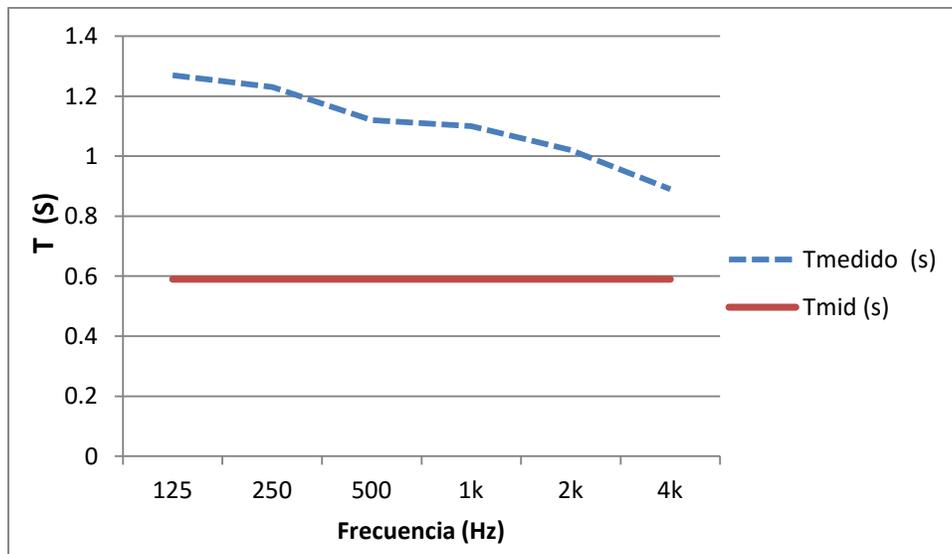


Figura 2.17. T_{medido} y T_{mid} (tiempo óptimo).

Es necesario aproximar el tiempo de reverberación T_{medido} al tiempo de reverberación óptimo T_{mid} con una tolerancia de $\pm 20\%$ para fines de diseño de acondicionamiento acústico, ya que según Lawrence Kinsler para recintos destinados al uso de la voz, es preferible que el comportamiento del tiempo de reverberación se mantenga uniforme con respecto a la frecuencia.



Además se trata de recintos destinados a la voz, por lo que es conveniente que los valores del tiempo de reverberación sean bajos, a fin de conseguir una buena inteligibilidad.

Recordando el **Punto 1.8.5.5** para la elección de la ecuación para el cálculo del tiempo de reverberación tenemos los siguientes criterios:

Si el coeficiente de absorción promedio es menor que 0.15 se recomienda usar la ecuación de Sabine. Si es mayor que 0.15 se recomienda la de Norris-Eyring.

Si el coeficiente de absorción promedio es menor que 0.2 se sugiere usar la ecuación de Sabine. Si es mayor que 0.2 se sugiere la de Norris-Eyring.

2.6.1 Cálculo del tiempo de reverberación con condiciones iniciales (actuales)

En la **Tabla 2.12** se observa la distribución de los materiales dentro de la Sala I, así como sus coeficientes de absorción por banda de octava. De acuerdo con la información obtenida, se procede a calcular el tiempo de reverberación con la fórmula de Sabine y Norris - Eyring, usando la **Ecuación 3** y la **Ecuación 9**, realizar el cálculo de absorción total mediante la **Ecuación 4**, así como es indispensable obtener el coeficiente de absorción promedio con la **Ecuación 6** por banda de octava, ya que este dato se usa para elegir que ecuación utilizar para el cálculo de T .

Tabla 2.12. Cálculo del tiempo de reverberación en condiciones iniciales de acuerdo a los coeficientes de absorción de la Sala I.

		Frecuencia (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Ubicación	Material	Área	α	α	α	α	α	α
Muro Sala IV	Vidrio 5 mm	20.85	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Muro Sala IV	Mármol	1.99	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1
Muro Sala V	Tablaroca	3.04	0.15	0.1	0.05	0.04	0.07	0.09
Muro Pasillo Lateral	Vidrio 5 mm	27.59	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Muro Pasillo II	Tablaroca	17.17	0.15	0.1	0.05	0.04	0.07	0.09
Muro Pasillo I	Vidrio 5 mm	18.30	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Techo	Plafón	84.82	0.15	0.1	0.05	0.04	0.07	0.09
Techo	Rejilla ventilación	0.20	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
Piso	Mármol	84.82	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1

Tabla 2.12. Cálculo del tiempo de reverberación en condiciones iniciales de acuerdo a los coeficientes de absorción de la Sala I (*continuación*).

	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
	α	α	α	α	α	α
Absorción total	47.89	35.97	26.03	29.64	29.45	20.85
\bar{T} Sabine	0.70	0.93	1.28	1.12	1.13	1.60
Coefficiente de absorción promedio	0.19	0.14	0.10	0.11	0.11	0.08
\bar{T} Norris-Eyring	0.63	0.86	1.21	1.06	1.07	1.53

En la **Tabla 2.13** se observa el T calculado con los coeficientes de absorción de la **Tabla 2.12** de acuerdo con la fórmula de Sabine y Norris-Eyring, el tiempo óptimo y finalmente el \bar{T} medido (**Tabla 2.11**), esto para visualizar la diferencia entre ellos.

Tabla 2.13. Comparación del tiempo de reverberación medido, calculado y el tiempo óptimo para Sala I.

Frecuencia (Hz)	T Sabine (s)	T Norris-Eyring (s)	T_{mid} (s)	\bar{T}_{medido} (s)
125	0.70	0.63	0.59	1.27
250	0.93	0.86	0.59	1.23
500	1.28	1.21	0.59	1.12
1k	1.12	1.06	0.59	1.1
2k	1.13	1.07	0.59	1.02
4k	1.60	1.53	0.59	0.89

Se observa en la **Tabla 2.13** que el tiempo de reverberación medido y el calculado no cumplen con el $\pm 20\%$ de tolerancia (el tiempo óptimo es de 0.59 s, el +20% es 0.708 s y -20% es 0.472 s) para obtener el tiempo óptimo; por lo tanto se propone en el siguiente capítulo un tratamiento acústico para estar dentro del rango de tiempo de reverberación óptimo con un tratamiento acústico.

- Con los valores medidos del tiempo de reverberación promedio en la Sala I, obtenemos la absorción total del recinto receptor por banda de octava:



De acuerdo con la **Ecuación 3** para el tiempo de reverberación,

$$T = \frac{0.161 V}{A_t} \quad (\text{Ec. 3})$$

Se procede a despejar A_t , de la cual se obtiene la **Ecuación 4**:

$$A_t = \frac{0.161 V}{T} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

A_t = absorción total del recinto receptor de acuerdo a T (sabines o m^2)

V = volumen del recinto receptor (m^3)

T = tiempo de reverberación medido (s)

Obsérvese en la **Tabla 2.14** la absorción total del recinto receptor por banda de octava de acuerdo a los resultados obtenidos con los tiempos de reverberación medidos, utilizando **Ecuación 4**.

Tabla 2.14. Absorción total de la Sala I

Frecuencia (Hz)	\bar{T} (s)	A_t (m^2)
125	1.27	26.26
250	1.23	27.15
500	1.12	29.73
1k	1.10	30.25
2k	1.02	32.56
4k	0.89	37.27



2.7 Análisis de la inteligibilidad de la palabra

De acuerdo con los datos existentes no fue necesario realizar una prueba de inteligibilidad físicamente ya que se cuenta con valores medidos que se utilizaron para realizar este cálculo, de acuerdo a la **Ecuación 8 y 9 del Punto 1.8.7.2**, se procede a calcular:

$$\%ALCons = \frac{200 r^2 T^2}{V Q} \quad (\text{Para: } r \leq 3,16 D_c) \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\%ALCons = 9 T \quad (\text{Para: } r > 3,16 D_c) \quad (\text{Ec.9})$$

De acuerdo a la absorción total de la Sala I obtenida con los datos medidos, se procede a calcular el coeficiente de absorción promedio ($\bar{\alpha}$) con la **Ecuación 3**, realizando los siguientes despejes para obtenerlo:

$$T = \frac{0,161 V}{A_t} = \frac{0,161 V}{S_t \bar{\alpha}_i}$$

$$A_t = \frac{0.161 V}{T}$$

$$S_t \bar{\alpha} = A_t$$

Donde:

$A_t = 32.56$ en $2k$ y $S_t = 256.29 \text{ m}^2$, recordando la **Ecuación 6**, se obtiene el siguiente resultado:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_t}{S_t} = \frac{32.56}{256.29} = 0.12 \quad (\text{Ec.6})$$



Una vez obtenido el coeficiente de absorción en 2kHz, se procede a realizar los siguientes cálculos para cuantificar la inteligibilidad de la palabra dentro de la Sala I con las **Ecuaciones 7 y 8**. De acuerdo a los siguientes criterios se realizará la evaluación de la inteligibilidad de la palabra:

Donde:

1.4% - 0%	Excelente
4.8% - 1.6 %	Buena
11.4% 5.3%	Aceptable
24.2% -12%	Pobre
46.5% - 27%	Mala

Cálculos para obtener % *Alcons* con el coeficiente de absorción promedio calculado de las mediciones del tiempo de reverberación (medido) y la absorción total de la Sala I (medido):

- $r \leq 3.16 Dc$

Datos:

V =	206.97 m ³
S_t =	256.29 m ²
\bar{T} =	1.02 s, en 2k
$\bar{\alpha}$ =	0.12 en 2k
Q =	2
R =	34.95
Dc =	1.17 m
r =	3.70 m

- **Resultado para una $r \leq 3.70$**

Tabla 2.15. %*Alcons* con el coeficiente de absorción promedio y tiempo de reverberación medido $r \leq 3.16 Dc$.

r =	1	2	3.7
%ALcons=	0.50	2.01	6.88



▪ $r \geq 3.16 Dc$

Tabla 2.16. %Alcons con el coeficiente de absorción promedio y tiempo de reverberación medido para $r \geq 3.16 Dc$.

%ALcons=	9.18
----------	------

Cálculos para obtener % Alcons con el tiempo de reverberación actual (calculado) y el coeficiente de absorción promedio calculado, obsérvese **Tablas 2.16 y 2.17.**

▪ $r \leq 3.16 Dc$

$$\begin{aligned} V &= 206.97 \text{ m}^3 \\ S_t &= 256.29 \text{ m}^2 \\ \bar{T} &= 1.07 \text{ s, en 2k} \\ \bar{\alpha} &= 0.11 \text{ en 2k} \\ Q &= 2 \\ R &= 31.68 \\ Dc &= 1.11 \text{ m} \\ r &= 3.52 \text{ m} \end{aligned}$$

Tabla 2.17. %Alcons con el coeficiente de absorción promedio y el tiempo de reverberación calculado $r \leq 3.16 Dc$.

r =	1	2	3.52
%ALCons=	0.55	2.21	6.85

▪ $r \geq 3.16 Dc$

Tabla 2.18. %Alcons con el coeficiente de absorción promedio y el tiempo de reverberación calculado para $r \geq 3.16 Dc$.

%ALcons=	9.63
----------	------

Resultado:

Se toman los valores de tiempo de reverberación medidos (**Tabla 2.11**) puesto se considera más exacta, la medición se realizó con las condiciones reales (físicas) de la Sala I y el tiempo de reverberación calculado (**Tabla 2.12**) es impreciso debido a que el coeficiente de absorción de los materiales puede variar, puesto la calidad de los existentes (materiales físicos de la Sala I) y los medidos en el laboratorio no son los mismos.



De acuerdo al criterio de evaluación de la inteligibilidad (**Tabla 2.15 y 2.16**) se concluye que el nivel de inteligibilidad está dentro del nivel aceptable de acuerdo a la **Tabla 1.5**, en este caso el resultado obtenido es dentro del parámetro de 11.4% a 5.3%, es decir que la inteligibilidad es apenas aceptable en la Sala I con respecto a la distancia para ambos casos, por lo tanto se realizará un tratamiento acústico para mejorar el tiempo de reverberación dentro del recinto, para así mejorar la inteligibilidad a mayor distancia, ya que es de suma importancia, como se ha mencionado anteriormente, la Sala I principalmente funge para un recinto dedicado para el uso de la voz.

2.8 Pérdida por transmisión

2.8.1 Pérdida por transmisión medida

Se distribuyeron los puntos de medición dentro de la Sala I donde normalmente las personas están presentes cuando la sala está en uso, cada punto de medición se distingue con una letra (**Figura 2.9**). Una vez identificados los puntos dentro de la Sala I (**Figura 2.3**), se procedió a identificar en la Sala I los muros constructivos que colindan con las salas adyacentes a esta, los cuales son los siguientes:

- Muro Sala IV - Sala I (**Figura 2.8**)
- Muro Pasillo I - Sala I (**Figura 2.5**)
- Muro Pasillo II - Sala I (**Figura 2.6**)
- Muro Pasillo lateral - Sala I (**Figura 2.7**)
- Muro Sala IV - Sala I (**Figura 2.8**)

Una vez identificados los muros constructivos, se seleccionó el recinto fuente y el recinto receptor, el recinto fuente es el encargado de transmitir la señal, de audio y/o de ruido rosa, y el recinto receptor es el que recibe la señal a través del muro constructivo correspondiente. Se seleccionó la Sala I de acuerdo a la **Ecuación 15** del **Punto 1.10.3**, se obtiene la pérdida por transmisión:

$$TL = L_{P1} - L_{P2} + 10 \log \frac{S_t}{A_t} \quad (\text{Ec. 15})$$



Donde:

$R' = TL$ = pérdida por transmisión (dB)

L_{p1} = nivel de presión acústica promedio en el recinto fuente (dB)

L_{p2} = nivel de presión acústica promedio en el recinto receptor (dB)

S_t = superficie del muro constructivo (m^2)

A_t = área equivalente de absorción en el recinto receptor

La **Ecuación 15** para calcular TL (pérdida por transmisión) está en función al volumen total del recinto, que se observa con mayor énfasis en la fórmula para calcular A_t (absorción total del recinto), por lo tanto, es conveniente seleccionar a la Sala I como recinto receptor, ya que el volumen permanecerá constante y no será necesario calcular los otros volúmenes de las de los muros constructivos seleccionados.

Una vez seleccionada la Sala I como recinto receptor y ubicados los puntos dentro de ésta, se realizaron las primeras mediciones de pérdida por transmisión en el muro Sala IV - Sala I, en la Sala IV se ubicaron 4 puntos de medición donde normalmente se encuentran las personas cuando la Sala IV está en funcionamiento, se ubicó menor número de puntos de medición debido a que la Sala IV tiene un volumen menor que la Sala I. Ya realizada la distribución de los puntos en ambas salas (Sala I y Sala IV) se procedió a realizar las mediciones; las mediciones se realizaron con el sonómetro NORSONIC 132, la condición fue que la Sala I estuviera vacía. En la Sala IV, se realizaron dos condiciones como anteriormente se mencionó.

Condición 1:

Se reprodujo ruido rosa dentro de la Sala IV vacía, con un altavoz dodecaedro y un amplificador conectado a una computadora. Se realizó una medición por banda de octava de 125 a 4k Hz en cada punto, la medición se realizó utilizando la función del NORSONIC 132 para medir el Nivel equivalente (N_{eq}), estableciendo un tiempo de 1 minuto de mediciones continuas (una medición de ruido fluctuante que se realiza sin interrupción durante todo el periodo de observación [NOM- 081-ECOL-1994]), el cual se observa en la **Tabla 2.19** por cada punto de medición (NPA_A , NPA_B , NPA_C y NPA_D).

Tabla 2.19. Nivel de presión acústica en Sala IV, Condición 1
(recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	NPA _A (dB)	NPA _B (dB)	NPA _C (dB)	NPA _D (dB)
125	80.1	79.5	79.8	75.1
250	90.3	88	88.6	86.4
500	80.7	78.8	75.3	76.1
1k	80.5	75.8	72.9	72.2
2k	77.3	71.1	67.7	67.2
4k	78.8	70	66.5	65.8

Una vez registrados los resultados por banda de octava en cada punto de la sala IV se procedió a medir el nivel de presión acústica del otro lado del muro contractivo (Sala I), del cual se obtuvieron los siguientes valores por banda de octava que muestra **Tabla 2.20**.

Tabla 2.20. Nivel de presión acústica en Sala I, Condición 1
(recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	NPA _A (dB)	NPA _B (dB)	NPA _C (dB)	NPA _D (dB)	NPA _E (dB)	NPA _F (dB)
125	70.2	71.7	70.4	70.0	69.0	71.03
250	77.5	78.0	76.8	76.5	76.1	78.3
500	66.4	66.5	65.8	65.5	64.6	65.4
1k	61.5	62.7	61.2	61	60.6	61
2k	55.4	55.4	53.7	54.3	53.5	53.7
4k	53.5	55.2	51.1	51.7	49.9	50.4

Al tener el nivel de presión acústica en cada punto de medición por banda de octava (evaluación temporal), se procede a calcular el nivel de presión acústica promedio por banda de octava (evaluación espacial), para la cual se utilizó la **Ecuación 19**:

$$\overline{NPA} = 10 \log \left[\frac{1}{n} \left(10^{NPA_1/10} + 10^{NPA_2/10} + \dots + 10^{NPA_n/10} \right) \right] \quad (\text{Ec. 19})$$

\overline{NPA} = Nivel de presión acústica promedio (dB)

NPA_n = Nivel de presión acústica por punto de medición (dB)

n= Número de puntos de medición

En la **Tabla 2.21** se observa el nivel de presión acústica promedio por banda de octava calculado por la formula anterior en la Sala IV y en la Sala I.

Tabla 2.21. Nivel de presión acústica promedio medido en la Sala IV y Sala I, condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Sala IV (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)
125	79.02	70.47
250	88.55	77.27
500	78.26	65.75
1k	76.68	61.39
2k	72.88	54.41
4k	73.72	52.39

De igual manera se realizó el mismo procedimiento para todos los muros constructivos seleccionados aplicando la condición 1, en las siguientes tablas se observa el nivel de presión acústica promedio por cada muro constructivo:

Tabla 2.22. Nivel de presión acústica promedio medido en el Pasillo I y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Pasillo I (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)
125	78.31	63.89
250	86.37	71.66
500	79.56	63.55
1k	77.83	60.18
2k	74.28	53.74
4k	73.11	50.47

Tabla 2.23. Nivel de presión acústica promedio medido en Pasillo lateral y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 P. Lateral (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)
125	81.22	65.57
250	87.21	70.58
500	79.80	61.29
1k	80.06	59.14
2k	75.57	51.70
4k	74.91	47.83

Tabla 2.24. Nivel de presión acústica promedio medido en Pasillo II y Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Pasillo II (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)
125	83.23	65.31
250	87.38	68.52
500	81.02	57.56
1k	82.63	55.36
2k	79.22	51.18
4k	77.65	47.83

Tabla 2.25. Nivel de presión acústica promedio medido en Sala IV y Sala I, condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Sala V (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)
125	85.72	68.73
250	93.25	72.71
500	83.16	59.56
1k	82.07	53.79
2k	78.32	51.79
4k	76.74	48.38

Condición 2:

El recinto fuente en este caso es una señal de audio. Por ejemplo para la Sala IV la señal de audio fue la reproducción de un video con el volumen que normalmente es reproducido y se realizó como en la primera condición la medición por banda de octava de 125 a 4 kHz en cada punto, la medición para esta Sala en específico se realizó utilizando la función del NORSONIC 132 para medir el Nivel equivalente (N_{eq}), estableciendo un tiempo de 1 minuto de mediciones continuas (una medición de ruido fluctuante que se realiza sin interrupción durante todo el periodo de observación (NOM-081 – ECOL-1994), el cual se observa en la **Tabla 2.26** por cada punto de medición (NPA_A , NPA_B , NPA_C y NPA_D).

Tabla 2.26. Nivel de presión acústica en la Sala IV, Condición 2
(recinto fuente excitado con una señal de audio, en este caso con la reproducción de una película).

Frecuencia (Hz)	NPA _A (dB)	NPA _B (dB)	NPA _C (dB)	NPA _D (dB)
125	59.3	57.3	55.7	51.2
250	62.8	64.4	61.3	64.1
500	76.6	69.8	68.4	69.9
1k	71.7	66	63.8	62.7
2k	60.8	57.4	52.6	54.7
4k	52.6	49.9	46	45.6

De acuerdo a la **Ecuación 19** se calcula el promedio del nivel de presión acústica en cada punto, como se observa en la **Tabla 2.27**:

Tabla 2.27. Nivel de presión acústica promedio en la Sala IV, condición 2
(recinto fuente excitado con una señal de audio).

Frecuencia (Hz)	NPA ₁ Sala IV (dB)
125	56.75
250	63.31
500	72.55
1k	67.60
2k	57.46
4k	49.49

Para los muros constructivos restantes que son el Pasillo I, II y lateral y Sala V, la señal de audio es una señal de voz. Se utilizó el PHONIC PAA3, se midió el nivel de presión acústica en cada uno de los puntos seleccionados en la parte exterior de la Sala I que colinda con el muro constructivo seleccionado, debido a que el PHONIC PAA3 mide el NPA en tercios de octava fue necesario realizar la conversión a octavas como muestra el siguiente ejemplo:

Para obtener el valor en octavas de NPA en 125 HZ se toma el valor de NPA en 100 Hz y el NPA en 160 Hz (véase **Tabla 2.28**), es decir se toma el NPA en tercios de octava un valor antes y uno después de la frecuencia seleccionada en banda de octava (125, 250, 500, 1k, 2k, 8k) y se realiza la suma de NPA, como se muestra en la **Ecuación 20**.

$$NPA_{t(125)} = 10 \log \left(10^{NPA_{100}/10} + 10^{NPA_{125}/10} + 10^{NPA_{160}/10} \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

$NPA_{t(125)}$ = Nivel de presión acústica en 125 Hz en octavas

NPA_{100} = Nivel de presión acústica en 125 Hz en tercios de octavas

NPA_{125} = Nivel de presión acústica en 125 Hz en tercios de octavas

NPA_{160} = nivel de presión acústica en 125 Hz en tercios de octavas

De esta manera se realiza la conversión para cada banda de octava en los muros constructivos restantes como se muestra en **Tabla 2.27**, para el muro del Pasillo I:

Tabla 2.28. Conversión de \overline{NPA}_1 en el Pasillo I en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Pasillo I (dB)	\overline{NPA}_{t1} Pasillo I (dB)
100	44.1	
125	49.9	57.80
160	56.8	
200	59.4	
250	65.1	66.65
315	57.1	
400	63	
500	66.2	68.98
630	62.4	
800	63.1	
1000	54.7	64.07
1025	53.4	
1006	53.9	
2000	51.5	56.91
2005	50.2	
3015	48.9	
4000	43.8	50.63
5000	41.5	

Señal de audio: de 8 a 10 personas distribuidas en el Pasillo I hablando.

De la misma manera se realiza la conversión de tercios de octava a octava para los muros constructivos restantes, a continuación se muestran los resultados:

Tabla 2.29. Conversión de \overline{NPA}_1 en el Pasillo lateral en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_{t1} P.Lateral (dB)
125	56.50
250	56.64
500	58.67
1000	49.99
2000	48.45
4000	43.01

Señal de audio: de 4 a 6 personas distribuidas en el Pasillo lateral hablando.

Tabla 2.30. Conversión de \overline{NPA}_1 en el Pasillo II en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_{t1} Pasillo II (dB)
125	52.61
250	52.16
500	50.98
1000	45.72
2000	44.46
4000	42.12

Señal de audio: de 2 personas en el Pasillo II hablando.

Tabla 2.31. Conversión de \overline{NPA}_1 en Sala V en tercios de octava a \overline{NPA}_{t1} octava.

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_{t1} Sala V (dB)
125	47.23
250	47.76
500	51.81
1000	48.36
2000	48.99
4000	46.65

Señal de audio: de 2 a 4 personas sentadas hablando dentro de la Sala.

2.8.2 Evaluación de aislamiento acústico

Para analizar si la Sala I requiere algún tratamiento acústico para aislamiento es necesario obtener la pérdida de transmisión por muro constructivo utilizando la **Ecuación 15**, la cual se requiere para obtener los siguientes parámetros:

- $TL_{existente}$
- $TL_{necesaria}$

Para el cálculo de $TL_{existente}$ se realiza con los valores medidos por banda de octava (recinto fuente excitado con ruido rosa) de todos los muros constructivos, por ejemplo en el primer muro constructivo que es Sala IV – Sala I, es decir NPA_1 (Sala IV) y NPA_2 (Sala I), se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2.32. Pérdida por transmisión en muro constructivo Sala IV – Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Sala IV (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)	$\overline{NPA}_1 - \overline{NPA}_2$ (dB)	$TL_{existente}$ Sala IV (dB)
125	79.02	70.47	8.55	7.55
250	88.55	77.27	11.28	10.13
500	78.26	65.75	12.51	10.97
1k	76.68	61.39	15.29	13.68
2k	72.88	54.41	18.48	16.54
4k	73.72	52.39	21.33	18.81

Tabla 2.33. Pérdida por transmisión en muro constructivo Pasillo I – Sala I, Condición 1 (recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 P.I (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)	$\overline{NPA}_1 - \overline{NPA}_2$ (dB)	$TL_{existente}$ Pasillo I (dB)
125	78.31	63.89	14.42	12.85
250	86.37	71.66	14.70	12.99
500	79.56	63.55	16.01	13.90
1k	77.83	60.18	17.65	15.47
2k	74.28	53.74	20.54	18.04
4k	73.11	50.47	22.64	19.55

Tabla 2.34. Pérdida por transmisión en muro constructivo Pasillo lateral – Sala I, Condición 1
(recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 P. Lateral (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)	$\overline{NPA}_1 - \overline{NPA}_2$ (dB)	$TL_{existente}$ Pasillo lateral (dB)
125	81.22	65.57	15.65	15.87
250	87.21	70.58	16.64	16.71
500	79.80	61.29	18.52	18.19
1k	80.06	59.14	20.92	20.52
2k	75.57	51.70	23.87	23.15
4k	74.91	47.83	27.08	25.78

Tabla 2.35. Pérdida por transmisión en muro constructivo Pasillo II– Sala I, Condición 1
(recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 P.I (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)	$\overline{NPA}_1 - \overline{NPA}_2$ (dB)	$TL_{existente}$ Pasillo II (dB)
125	83.23	65.31	17.91	16.07
250	87.38	68.52	18.86	16.87
500	81.02	57.56	23.45	21.07
1k	82.63	55.36	27.27	24.81
2k	79.22	51.18	28.03	25.26
4k	77.65	47.83	29.82	26.46

Tabla 2.36. Pérdida por transmisión en muro constructivo Sala V – Sala I, Condición 1
(recinto fuente excitado con ruido rosa).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 P.I (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)	$\overline{NPA}_1 - \overline{NPA}_2$ (dB)	$TL_{existente}$ Sala V (dB)
125	85.72	68.73	16.99	7.22
250	93.25	72.71	20.54	10.63
500	83.16	59.56	23.61	13.30
1k	82.07	53.79	28.28	17.90
2k	78.32	51.79	26.53	15.82
4k	76.74	48.38	28.36	17.07

Para calcular la pérdida por transmisión necesaria se utilizó la **Ecuación 16**, que como se observa es la misma que para el cálculo de la pérdida por transmisión existente pero con diferentes condiciones que son **Figura 2.18**:

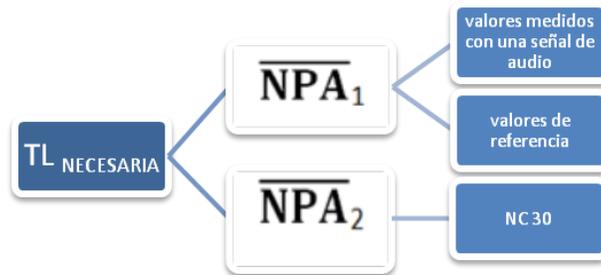


Figura 2.18. Condición para calcular $TL_{necesaria}$

Donde el NC-30 (criterio de ruido) fue el seleccionado para el control de ruido de acuerdo al uso de la Sala I (**Tabla 2.37**). De esta manera se obtienen los siguientes resultados:

Para el muro constructivo de Sala IV- Sala I, \overline{NPA}_1 es el nivel de presión acústica medido con la condición 2 (señal de audio), es decir, el recinto fuente (Sala IV) reproduciendo un video al volumen que normalmente es utilizado. El \overline{NPA}_2 son los valores de la curva del criterio de ruido NC-30, como se observa en la **Tabla 2.37**:

Tabla 2.37. Pérdida por transmisión necesaria del muro constructivo de Sala IV- Sala I, con \overline{NPA}_1 como señal de audio (reproducción de video, Condición 2).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Sala IV (dB)	\overline{NPA}_2 Sala I (dB)	$\overline{NPA}_1 - \overline{NPA}_2$ (dB)	$TL_{necesaria}$ Sala IV (dB)
125	56.75	48.00	8.75	7.75
250	63.31	41.00	22.31	21.16
500	72.55	35.00	37.55	36.01
1k	67.60	31.00	36.60	34.98
2k	57.49	29.00	28.49	26.55
4k	49.49	28.00	21.49	18.97

Para obtener la pérdida de transmisión necesaria con valores ya existentes se tomó como referencia los datos de nivel de ruido por banda de octava de la literatura (Egan, 2007).



Se tomaron los casos más parecidos a las condiciones actuales del recinto y sus salas y pasillos contiguos, estos fueron: Audiovisual para Sala IV, Recibidor/recepción para el Pasillo I y Pasillo II, biblioteca para el Pasillo lateral y Salón de clases para Sala V.

Estos valores se sustituyen en \overline{NPA}_1 , el nivel de ruido seleccionado fue de acuerdo a la actividad más parecida en el recinto fuente. En la tabla anterior \overline{NPA}_1 está dada por la curva NC-30, como se observa en la **Tabla 2.38**.

Tabla 2.38. Pérdida por transmisión necesaria del muro constructivo de Sala IV- Sala I, con \overline{NPA}_1 como señal de audio (valores de referencia, condición 2).

Frecuencia (Hz)	\overline{NPA}_1 Sala IV (dB)	\overline{NPA}_2 Sala IV (dB)	$\overline{NPA}_1 - \overline{NPA}_2$ (dB)	$TL_{necesaria}$ Referencia Sala IV (dB)
125	74.00	48.00	26.00	25.00
250	78.00	41.00	37.00	35.85
500	80.00	35.00	45.00	43.46
1k	79.00	31.00	48.00	46.38
2k	75.00	29.00	46.00	44.06
4k	68.00	28.00	40.00	37.48

Para los muros constructivos restantes se realiza el mismo procedimiento de las **Tablas 2.37 y 2.38**, es decir, de acuerdo a la condición 2 sustituir \overline{NPA}_1 con los valores de audio medidos y posteriormente con los de referencia.

Una vez obtenidos los valores de pérdida por transmisión existentes (Condición 1) y necesarios (Condición 2) con los valores medidos y con valores de referencia se procede a hacer la comparación con las siguientes condiciones:

Si $TL_{necesaria} < TL_{existente} \rightarrow$ el recinto no requiere tratamiento de aislamiento acústico

Si $TL_{necesaria} > TL_{existente} \rightarrow$ el recinto requiere un tratamiento de aislamiento acústico

A continuación se presentan los datos obtenidos de la pérdida por transmisión de cada muro constructivo para determinar si se necesita un tratamiento de aislamiento acústico.

Tabla 2.39. Comparación $TL_{necesaria}$, $TL_{necesaria}$ referencia y $TL_{existente}$ en Sala IV - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{existente}$ Sala IV (dB)	$TL_{necesaria}$ Sala IV (dB)	$TL_{necesaria}$ referencia Sala IV (dB)
125	7.55	7.75	25.00
250	10.13	21.16	35.85
500	10.97	36.01	43.46
1k	13.68	34.98	46.38
2k	16.54	26.55	44.06
4k	18.81	18.97	37.48

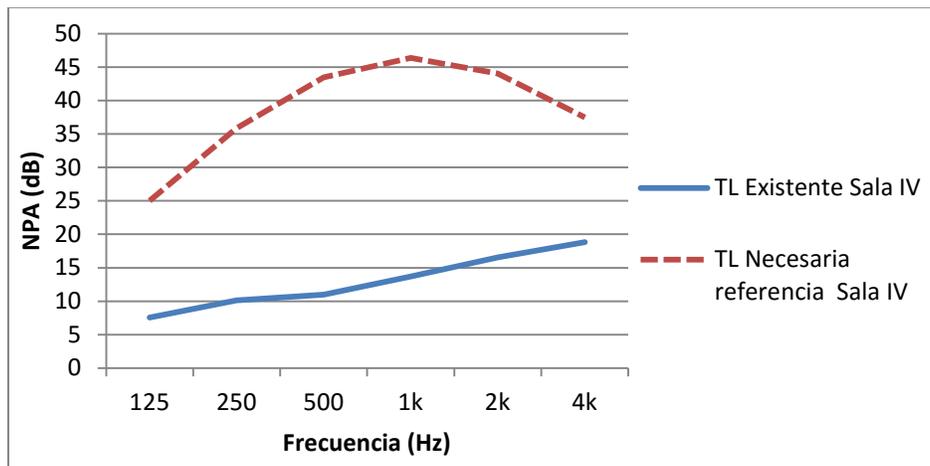


Figura 2.19. Comparación $TL_{necesaria}$ referencia y $TL_{existente}$ en Sala IV - Sala I.

Tabla 2.40. Comparación $TL_{necesaria}$, $TL_{necesaria}$ y $TL_{existente}$ en Pasillo I - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{existente}$ Pasillo I (dB)	$TL_{necesaria}$ Pasillo I (dB)	$TL_{necesaria}$ referencia Pasillo I (dB)
125	12.85	8.23	16.43
250	12.99	23.94	29.29
500	13.90	31.87	39.89
1k	15.47	30.89	40.82
2k	18.04	25.41	36.50
4k	19.55	19.54	28.91

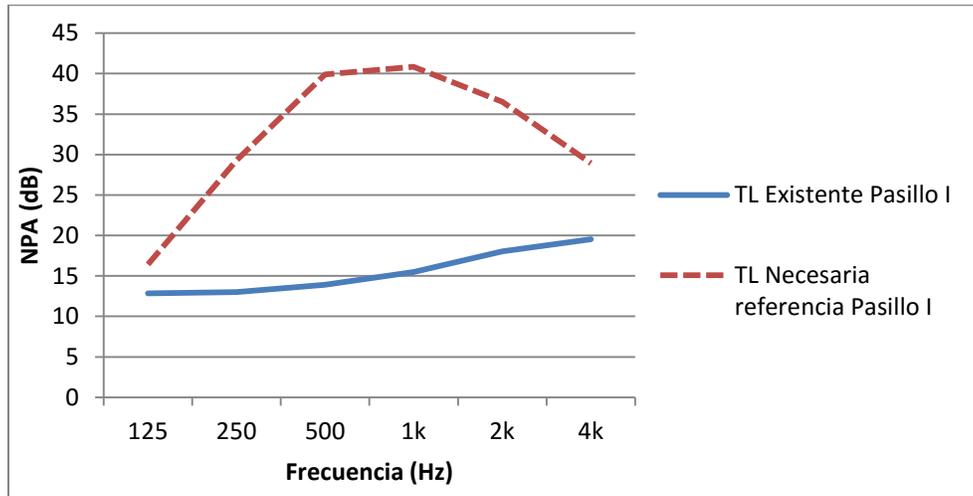


Figura 2.20. Comparación $TL_{necesaria}$ referencia y $TL_{existente}$ en Pasillo I - Sala I.

Tabla 2.41. Comparación $TL_{necesaria}$, $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{existente}$ en Pasillo lateral - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{existente}$ Pasillo lateral (dB)	$TL_{necesaria}$ Pasillo lateral (dB)	$TL_{necesaria}$ referencia Pasillo lateral (dB)
125	15.87	8.72	15.22
250	16.71	15.71	25.07
500	18.19	23.35	31.68
1k	20.52	18.59	32.60
2k	23.15	18.73	28.28
4k	25.78	13.70	20.69

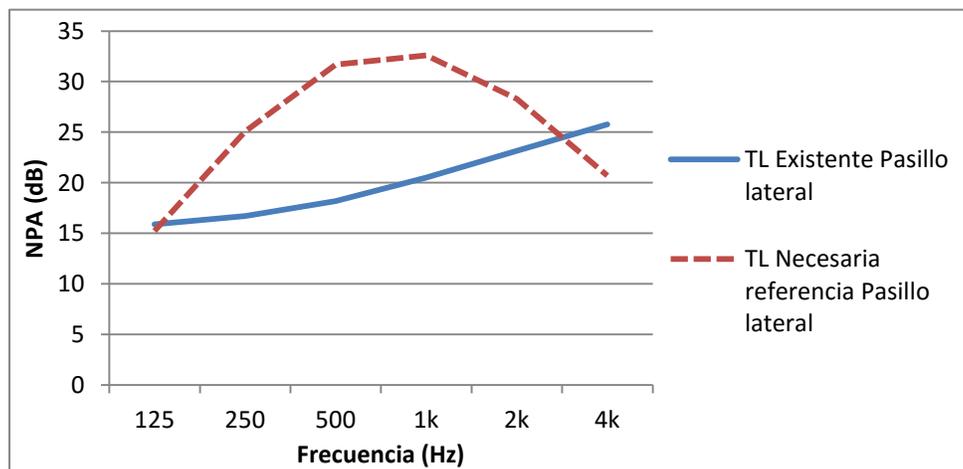


Figura 2.21. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{existente}$ en Pasillo lateral - Sala I.

Tabla 2.42. Comparación $TL_{necesaria}$, $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{existente}$ en Pasillo II - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{existente}$ Pasillo II (dB)	$TL_{necesaria}$ Pasillo II (dB)	$TL_{necesaria}$ referencia Pasillo II (dB)
125	16.07	2.77	7.16
250	16.87	9.17	19.01
500	21.07	13.60	25.62
1k	24.81	12.26	23.54
2k	25.26	12.68	16.22
4k	26.46	10.78	8.63

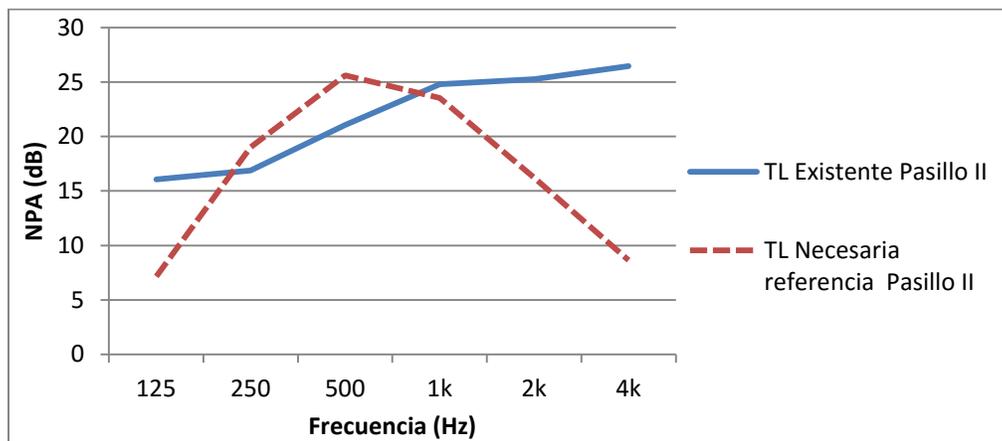


Figura 2.22. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{existente}$, En el Pasillo II - Sala I.

Tabla 2.43. Comparación $TL_{necesaria}$, $TL_{necesaria}$ referencia y $TL_{existente}$, en la Sala V - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{existente}$ Sala V (dB)	$TL_{necesaria}$ Sala V (dB)	$TL_{necesaria}$ referencia Sala V (dB)
125	7.22	-10.54	8.23
250	10.63	-3.15	21.09
500	13.30	6.50	31.69
1k	17.90	6.98	32.62
2k	15.82	9.29	28.30
4k	17.07	7.36	20.71

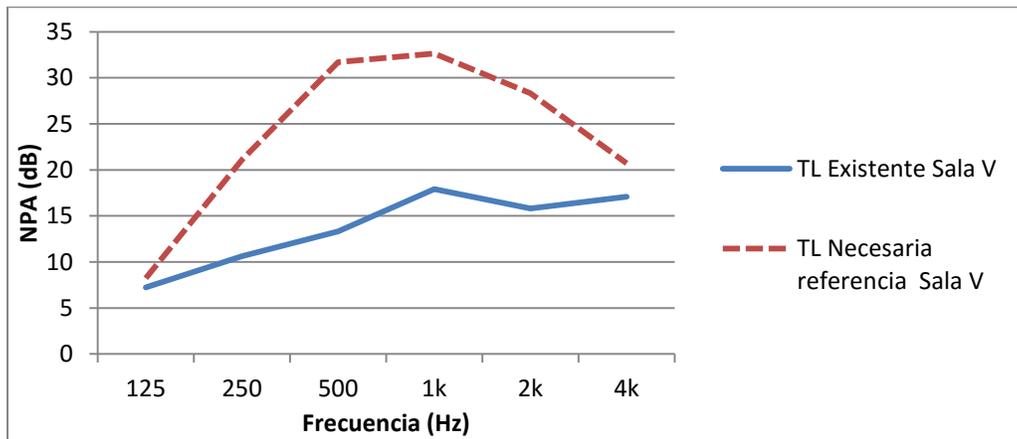


Figura 2.23. Comparación $TL_{necesaria}$ referencia y $TL_{existente}$, en Sala V - Sala I.

Resultados:

Se consideró la pérdida de transmisión necesaria medida y la pérdida de transmisión de referencia (literatura) para evaluar el aislamiento, puesto que las condiciones de evaluación al realizar las mediciones podrían variar de acuerdo al número de personas, humor, ánimo, evento, hora, etc. Por lo cual se consideran los casos críticos como modo de prevención, por lo tanto como se observa en las graficas se hace la comparación con la $TL_{necesaria}$ de referencia.

Observamos que para el muro constructivo Sala IV – Sala I, Pasillo I - Sala I, Sala V - Sala I, (**Figura 2.19, 2.20, 2.21 y 2.23**) de acuerdo a las condiciones (Si $TL_{necesaria} > TL_{existente}$) para evaluar aislamiento, se concluye que se requiere aislamiento.

En el Pasillo lateral - Sala I, en las frecuencias de 4kHz y 125 Hz no se cumple con la condición para realizar un tratamiento de acústico, sin embargo se le aplicará un tratamiento debido a que de 250 a 2 kHz si requiere aislamiento acústico.

Para el muro constructivo Pasillo II – Sala I, (**Figura 2.22**) de acuerdo a la condición (Si $TL_{necesaria} < TL_{existente}$) no se requiere un aislamiento acústico.



Capítulo 3

Propuesta del diseño acústico de la Sala I

3.1 Propuesta de acondicionamiento acústico

De acuerdo al **Punto 2.6**, se concluyó que la Sala I necesita un tratamiento acústico, para el cual se requiere que los tiempo de reverberación se encuentren dentro del rango de tolerancia de $\pm 20\%$ como se observa a continuación en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Tolerancia de $\pm 20\%$ del tiempo óptimo de reverberación para la Sala I.

<p>El tiempo de reverberación óptimo es de 0.59 segundos El límite máximo (+20%) es de 0.708 s y el límite mínimo (-20%) es de 0.472 s.</p>
--

En la **Tabla 3.2** se realizó una combinación de materiales absorbentes y reflectantes de acuerdo a su coeficiente de absorción α , que está dado en las tablas normalizadas de la literatura. Se realizó la elección de los materiales de acuerdo a la necesidad de cumplir con el criterio de la **Tabla 3.1**.

Una vez elegidos los materiales absorbentes y reflectantes, se procede a calcular la absorción total, ecuación de Sabine (**Ecuación 3**), coeficiente de absorción promedio (**Ecuación 4**) y la ecuación de Norris-Eyring (**Ecuación 7**). En la **Tabla 3.2** se observa la propuesta de los materiales, con su coeficiente de absorción y los resultados calculados.

Tabla 3.2. Propuesta del tiempo de reverberación.

				Frecuencia (Hz)					
				125	250	500	1k	2k	4k
Material y ubicación	Material	Ref	Área m ²	α	α	α	α	α	α
Muro Sala I – Sala IV vidrio	Cortina de terciopelo ligero, colgadas en contacto directo con la pared	3	22.85	0.03	0.04	0.011	0.17	0.24	0.35
Muro Sala I – Sala V tablaroca	Corcho aglomerado (2 cm)	2	3.04	0.12	0.28	0.85	0.82	0.78	0.22
Muro Sala I - Pasillo lateral vidrio	Cortina de terciopelo ligero, colgadas en contacto directo con la pared	3	27.59	0.03	0.04	0.011	0.17	0.24	0.35

Tabla 3.2. Propuesta del tiempo de reverberación (continuación)

				Frecuencia (Hz)					
				125	250	500	1k	2k	4k
Material y ubicación	Material	Ref	Área m ²	α	α	α	α	α	α
Muro Sala I - Pasillo II tablaroca	Tabla de yeso	1	5.00	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Muro Sala I - Pasillo II tablaroca	Fibra de vidrio 10 cm	2	12.17	0.75	0.96	0.96	0.9	0.84	0.74
Muro Sala I - Pasillo I vidrio	Moqueta 0.8 cm	2	18.30	0.13	0.06	0.13	0.20	0.46	0.70
Techo plafón	Corcho aglomerado 2 cm	2	10.00	0.12	0.28	0.85	0.82	0.78	0.22
Techo plafón	Panel de pino 1.19 cm	2	74.62	0.098	0.11	0.061	0.081	0.082	0.11
Techo	Rejilla de ventilación	2	0.20	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
Piso mármol	Madera de 3 cm con 5 cm de cámara de aire	2	84.62	0.25	0.34	0.18	0.1	0.1	0.07
Absorción total				44.54	55.95	45.79	48.32	55.43	55.82
\bar{T} Calculado Sabine (s)				0.75	0.60	0.73	0.69	0.60	0.60
Coefficiente de absorción promedio				0.17	0.22	0.18	0.19	0.21	0.22
\bar{T} Calculado Norris-Eyring (s)				0.68	0.53	0.66	0.62	0.53	0.53

[1] Egan, D., 2007.

[2] Recuero, M., 2000.

[3] García, G, *et al.*, 2013.

Tomando como referencia el **Punto 1.8.5.5** para realizar la elección de la ecuación para el cálculo del tiempo de reverberación (Rettinger M., 1977):

Si el coeficiente de absorción promedio es menor que 0.15 se recomienda usar la ecuación de Sabine, si es mayor que 0.15 se recomienda la ecuación de Norris-Eyring.

Por lo tanto, se considera la ecuación de Norris-Eyring para obtener el tiempo de reverberación de la Sala I, por lo visto en la **Tabla 3.2** ya que el coeficiente de absorción promedio es mayor a 0.15 en las frecuencias de 125 a 4 kHz.

En la **Tabla 3.3** se observa la comparación del tiempo de reverberación (Norris-Eyring) de acuerdo a lo anterior contra el tiempo de reverberación óptimo.

Tabla 3.3. Comparación de resultados de acuerdo a la ecuación de Norris- Eyring y el tiempo óptimo con el $\pm 20\%$.

Frecuencia (Hz)	T Norris-Eyring (s)	T_{mid} (s)	20%	-20%
125	0.68	0.59	0.7	0.47
250	0.53	0.59	0.7	0.47
500	0.66	0.59	0.7	0.47
1000	0.62	0.59	0.7	0.47
2000	0.53	0.59	0.7	0.47
4000	0.53	0.59	0.7	0.47

De acuerdo con la **Figura 3.1** se comprueba que el tratamiento acústico aplicado esta dentro de la tolerancia requerida (tiempo de reverberación óptimo) para una sala destinada a voz, en este caso la Sala I.

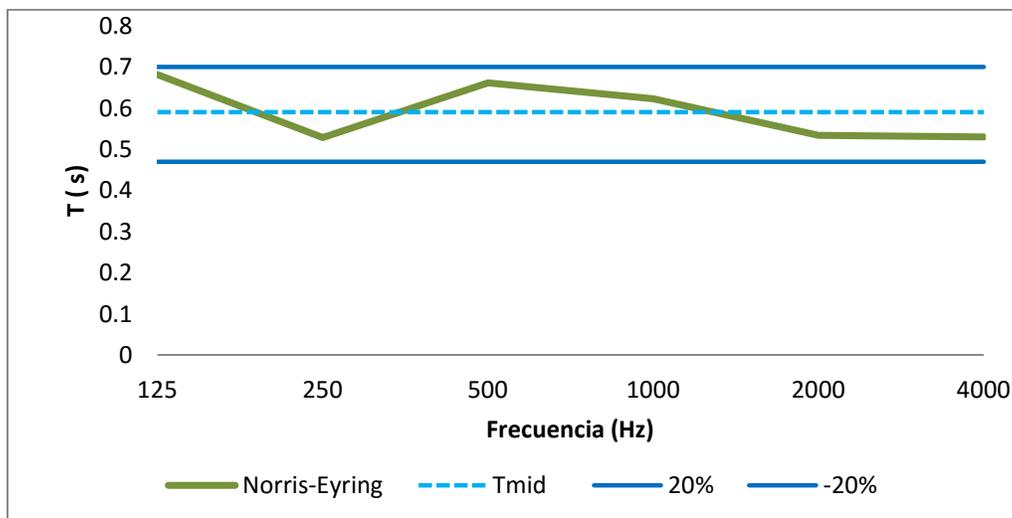


Figura 3.1. Comparación del tiempo de reverberación de acuerdo a la ecuación de Norris-Eyring por banda de octava con el $\pm 20\%$ de tolerancia.



3.2 Análisis de inteligibilidad

3.2.1 Análisis de inteligibilidad por pérdida de articulación de consonantes "%ALcons"

Al mejorar el tiempo de reverberación automáticamente mejora la inteligibilidad de la palabra, recordando que en este caso entre más bajo sea el tiempo de reverberación mejor será la inteligibilidad de la palabra, a continuación se muestran los datos con el tratamiento acústico para calcular la inteligibilidad.

Datos:

V =	206.97 m ³
S_t =	256.29 m ²
T̄ =	0.53 s
ᾱ =	0.21
Q =	2
R =	68.13
D_c =	1.63 m
r =	5.16 m

Recordando las Ecuaciones 8 y 9.

- $r \geq 3.16 D_c$

Tabla 3.4. %ALcons con tratamiento acústico, $r \leq 3.16 D_c$

r =	1	2	3	4	5	5.16
%ALCons=	0.14	0.54	1.22	2.17	3.39	3.61

- $r \geq 3.16 D_c$

Tabla 3.5. %ALcons con tratamiento acústico, $r \geq 3.16 D_c$

%ALcons=	4.77
-----------------	-------------

Donde:

4.8% - 1.6 % Buena

Se observa que la Sala I sin tratamiento acústico contaba con una inteligibilidad aceptable, y con el tratamiento acústico propuesto se visualiza que de aceptable pasó a ser bueno, esto fue al disminuir el tiempo de reverberación principalmente en la frecuencia de 2 kHz, como se había mencionado anteriormente el %ALcons está relacionado con el tiempo de reverberación.

En la **Tabla 3.6**, se muestra la comparación del %ALcons con respecto al tiempo de reverberación sin tratamiento acústico y con tratamiento acústico.

Tabla 3.6. Comparación de % *Alcons* para $r \leq 3.16 D_c$ y $r \geq 3.16 D_c$

	Sin tratamiento acústico	Tratamiento acústico
r =	3.7 m	5.16 m
%ALcons = r ≤	6.88%	3.61%
%ALcons = r ≥	9.18 %	4.77 %

En la **Tabla 3.6**, también se observa que de acuerdo al parámetro $r \leq 3.16D_c$ hay una mejora considerable de la inteligibilidad, ya que el porcentaje de pérdida de articulación de consonantes se reduce a mayor distancia, es decir, sin tratamiento acústico a una distancia de 3.7 m se tiene un %ALcons de 6.88%, se observa una gran mejora con relación a la distancia puesto que a 5.16 m se tiene un %ALcons de 3.61%.

Con respecto al parámetro $r \geq 3.16D_c$ hay una notable mejora con relación a distancias mayores que al parámetro anterior, como se observa en la **Tabla 3.6** de un %ALcons de 9.18% a tan solo 3.7 m, con el tratamiento acústico propuesto se tiene %ALcons de 4.77% a la distancia de 5.16 m, es decir el porcentaje de pérdida de articulación de consonantes decrece significativamente en la Sala I.

También se realizó el cálculo del %ALcons con la propuesta del tratamiento acústico, pero con la diferencia de que se tomó la misma distancia que sin el tratamiento, es decir a 3.7 m, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Sin tratamiento acústico %ALcons = 6.88%
Contratamiento acústico %ALcons = 1.86 %

En la comparación anterior se observa el %ALcons que de aceptable pasa a excelente a la distancia de 3.7 m.



3.2.2 Análisis de inteligibilidad por STI

De acuerdo a la relación que existe entre STI y %ALcons respecto al **Punto 1.8.8** se procede a calcular el STI, esto debido a que no se cuenta con equipo para medir el STI, por lo tanto su valor se calculará a partir de los valores de %ALcons.

Se procede a sustituir los valores obtenidos de %ALcons de la **Tabla 3.6** en la **Ecuación 13**, dando como resultado a las ecuaciones los siguientes resultados:

Sin tratamiento acústico

$$r \leq 3.7m$$

$$STI = -0.1845 \ln(6.88\%) + 0.9842 = 0.6283$$

$$r \geq 3.7m$$

$$STI = -0.1845 \ln(9.18\%) + 0.9842 = 0.5751$$

Con tratamiento acústico

$$r \leq 5.16 m$$

$$STI = -0.1845 \ln(3.61\%) + 0.9842 = 0.7473$$

$$r \geq 5.16 m$$

$$STI = -0.1845 \ln(4.77\%) + 0.9842 = 0.6959$$

Una vez obtenidos los resultados anteriores, conforme a la **Tabla 1.7**, se tienen los siguientes resultados con respecto a la valoración subjetiva:

- **Sin tratamiento acústico**

Se obtuvo un STI de 0.62 el cual está dentro del parámetro de $0.6 < STI < 0.75$, lo que nos da una respuesta "buena" y un STI de 0.57 dentro del parámetro de $0.45 < STI < 0.6$, lo que nos da una respuesta "regular".

- **Con tratamiento acústico**

Se obtuvo un STI de 0.74 y 0.69 el cual está dentro del parámetro de $0.6 < STI < 0.75$, lo que nos da una respuesta "buena".

Resultados:

Por los resultados de los dos métodos de evaluación de inteligibilidad anteriormente aplicados (%ALcons y STI), se observa una mejoría en la inteligibilidad de la Sala I de la BNCT, con lo cual podemos concluir con los resultados obtenidos que el acondicionamiento acústico propuesto brinda resultados acústicos benéficos para los usuarios de la Sala I, es decir, mejora la claridad y la percepción de la palabra en todo el recinto.

3.3 Propuesta de aislamiento acústico

Se propusieron arreglos de diferentes materiales para que cumplan con la siguiente condición:

- $TL_{propuesta} > TL_{necesaria}$

Una vez que se cumpla con la condición anterior, se cumple con el criterio de ruido seleccionado NC-30.

A continuación se muestra de la **Tabla 3.7** a la **Tabla 3.10** las propuestas de arreglos de materiales ($TL_{propuesta}$) para cumplir con la curva de criterio de ruido NC-30, así como su visualización grafica para comprobar y comparar que efectivamente con el arreglo de materiales propuestos se cumple con el nivel de ruido ya mencionado.

En el muro constructivo Sala IV - Sala I se propone $TL_{propuesta}$ está conformada por un arreglo 6 mm de vidrio laminado, 100 mm de espacio de aire, 4.7mm de vidrio monolítico (SAFLEX®). Véase en la **Tabla 3.7**.

Tabla 3.7. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{propuesta}$ en Sala IV - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{necesaria}$ referencia Sala IV (dB)	$TL_{propuesta}$ Sala IV (dB)
125	25.00	36
250	35.85	37
500	43.46	48
1k	46.38	51
2k	44.06	50
4k	37.48	58

Obsérvese en la **Figura 3.2** que el arreglo propuesto para el muro constructivo Sala IV-Sala I cumple con la condición que $TL_{propuesta}$ sea mayor que $TL_{necesaria}$.

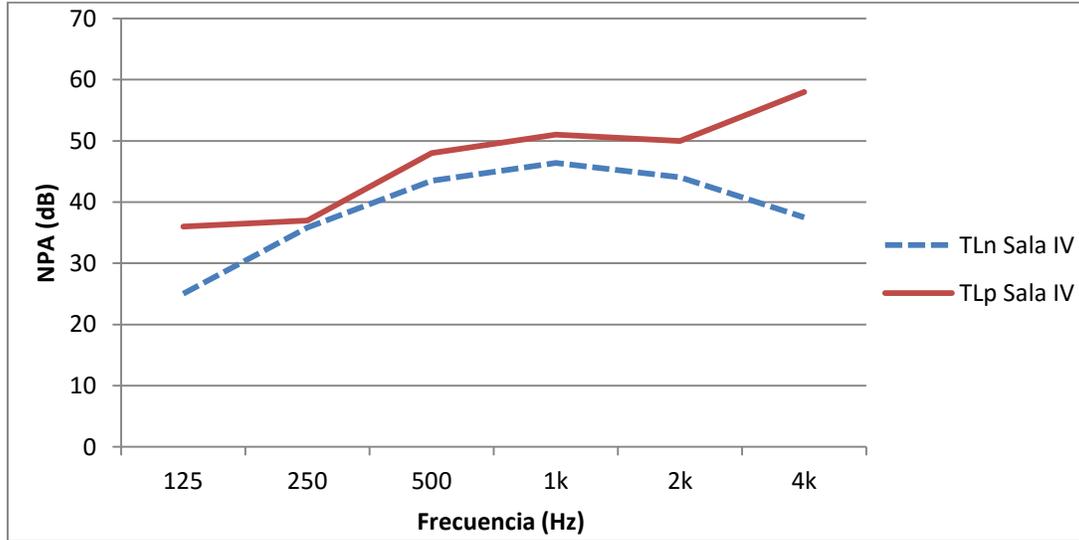


Figura 3.2 Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{propuesta}$ en Sala IV - Sala I.

En el muro constructivo Pasillo I - Sala I se propone $TL_{propuesta}$ está conformada por un arreglo de 3 mm de vidrio, 50 mm de aire y 6 mm de vidrio (Warnock, y Quirt, J.D.). Véase en la **Tabla 3.8**.

Tabla 3.8. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{propuesta}$ en Pasillo I - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{necesaria}$ referencia Pasillo I (dB)	$TL_{propuesta}$ Pasillo I (dB)
125	16.43	26
250	29.29	32
500	39.89	40
1k	40.82	45
2k	36.50	45
4k	28.91	48

En la **Figura 3.3** véase que el arreglo propuesto para el muro constructivo Pasillo I - Sala I cumple con la condición que la $TL_{propuesta}$ sea mayor que $TL_{necesaria}$

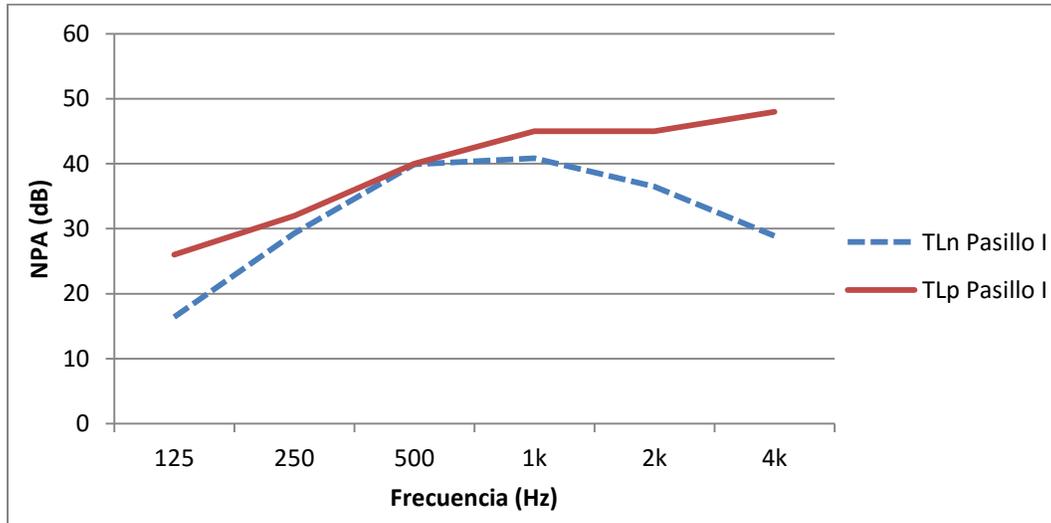


Figura 3.3 Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{propuesta}$ en Pasillo I - Sala I.

En el muro constructivo Pasillo lateral - Sala I se propone $TL_{propuesta}$ está conformada por un arreglo de 6 mm de vidrio, 13 mm de espacio aire y 6 mm de vidrio (Warnock, y Quirt, J.D.). Véase en la **Tabla 3.9**

Tabla 3.9. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia $TL_{propuesta}$ en Pasillo lateral - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{necesaria}$ referencia Pasillo Lateral (dB)	$TL_{propuesta}$ Pasillo Lateral (dB)
125	15.22	29
250	25.07	27
500	31.68	36
1k	32.60	43
2k	28.28	36
4k	20.69	42

En la **Figura 3.4** obsérvese que el arreglo propuesto para el muro constructivo Pasillo lateral - Sala I cumple con la condición que la $TL_{propuesta}$ sea mayor que la $TL_{necesaria}$.

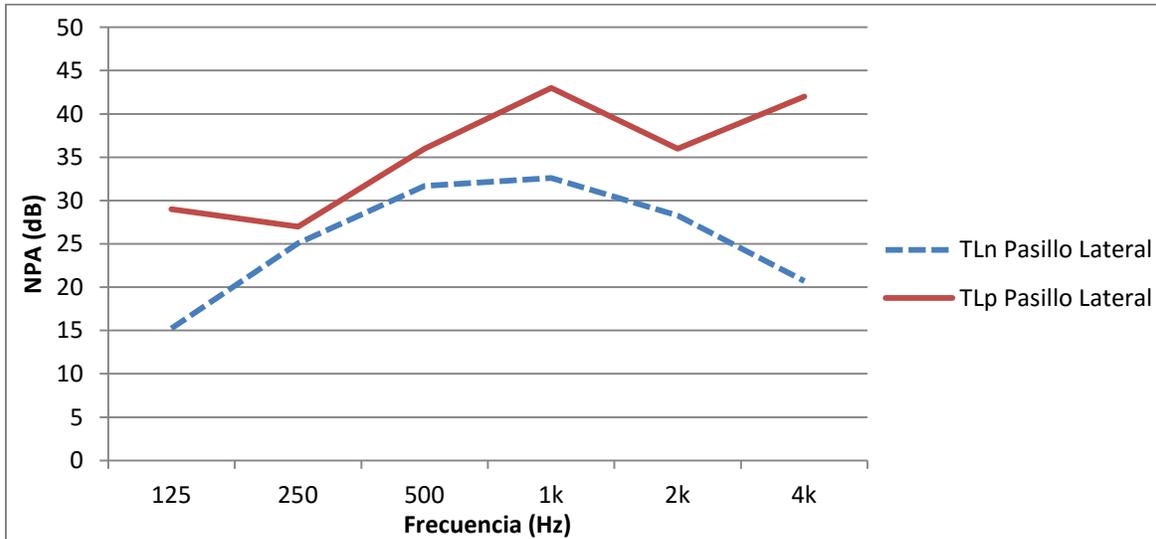


Figura 3.4. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{propuesta}$ en Pasillo Lateral - Sala I.

En el muro constructivo Sala V - Sala I se propone $TL_{propuesta}$ está formada por un arreglo de 16 mm de tablaroca, 25 mm de tablaroca de machihembrado, 16 mm de tablaroca laminado con adhesivo (Warnock, y Quirt, J.D.). Véase la **Tabla 3.10**

Tabla 3.10. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{propuesta}$ en Sala V - Sala I.

Frecuencia (Hz)	$TL_{necesaria}$ referencia Sala V (dB)	TL Propuesta Sala V (dB)
125	8.23	27
250	21.09	31
500	31.69	35
1k	32.62	35
2k	28.30	37
4k	20.71	43

En la **Figura 3.5** obsérvese que el arreglo propuesto para el muro constructivo Sala V– Sala I cumple con la condición que la $TL_{propuesta}$ sea mayor que la $TL_{necesaria}$.

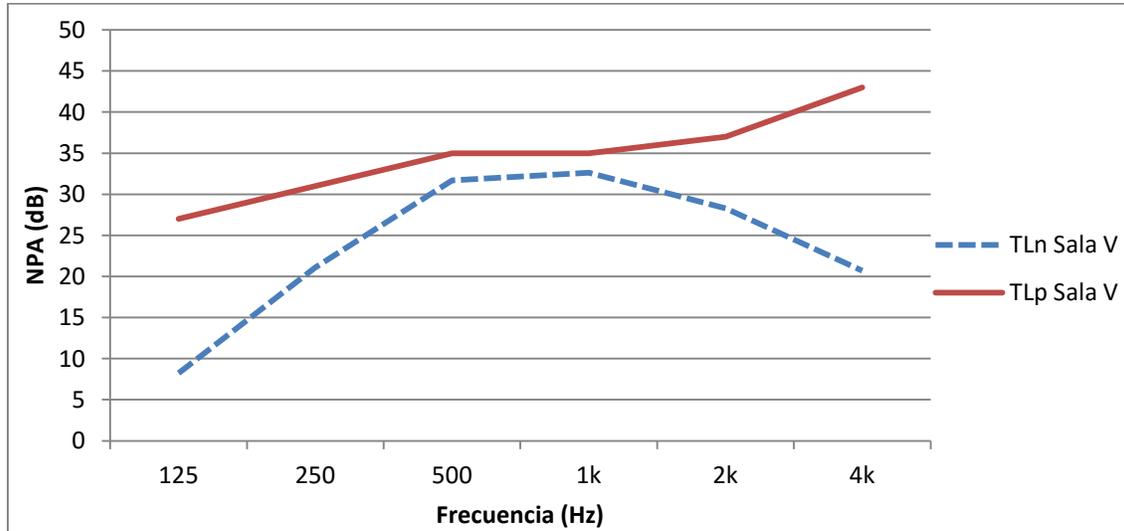


Figura 3.5. Comparación $TL_{necesaria}$ de referencia y $TL_{propuesta}$ en Sala V - Sala I.

De esta manera se concluye que los arreglos anteriores para cada uno de los muros constructivos cumplen con la condición $TL_{propuesta} > TL_{necesaria}$, en conclusión la Sala I cumple con el criterio de ruido NC-30 puesto que en todos los muros constructivos la $TL_{necesaria}$ está por debajo de la $TL_{propuesta}$ en el rango de frecuencias de 125 a 4 kHz.

3.3.1 Nivel de ruido esperado en el recinto receptor

De acuerdo a la propuesta de aislamiento acústico del **Punto 3.3**, se procede a calcular el nivel de ruido esperado en la Sala I con la **Ecuación 17** con respecto al **Punto 1.10.4**, con base en el criterio de ruido de la curva de NC-30 propuesta en la **Tabla 2.6**. Los resultados obtenidos del muro constructivo Sala IV – Sala I son los que se muestran en **Tabla 3.11**:

Tabla 3.11. Nivel de ruido esperado Sala IV - Sala I.

Frecuencia (Hz)	LP ₁ Sala IV (dB)	TLp SALA I (dB)	LP ₁ - TLp (dB)	LP ₂ (dB)
125	74	36	38.00	37.00
250	78	37	41.00	39.85
500	80	48	32.00	30.46
1k	79	51	28.00	26.38
2k	75	50	25.00	23.06
4k	68	58	10.00	7.48

Una vez calculado el LP_2 se procede a compararlo con la curva NC-30, para mayor ejemplificación se muestra en la **Figura 3.2**, que el nivel de ruido en la Sala I cumple con el criterio de ruido esperado.

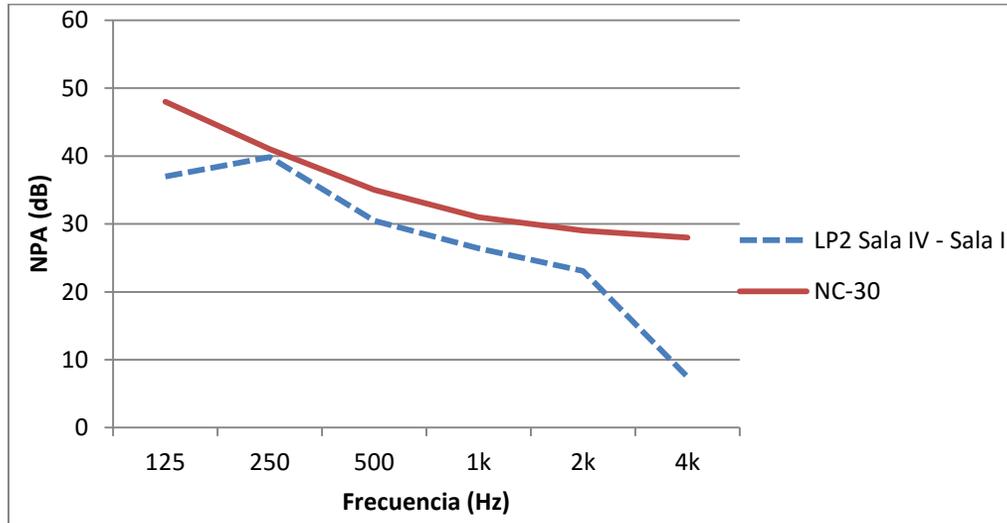


Figura 3.6. $L_{p2} < L_p$ del criterio de ruido NC-30, Sala IV – Sala I

A continuación se muestra el procedimiento anterior del muro constructivo Sala IV – Sala I pero con los muros constructivos restantes de la **Tabla 3.12** a la **Tabla 3.14**, con sus respectivas graficas (**Figuras 3.7, 3.8 y 3.9**) para una mejor visualización y comparación de los resultados obtenidos con la propuesta de aislamiento acústico.

Tabla 3.12 Nivel de ruido esperado en Pasillo I – Sala I.

Frecuencia (Hz)	LP_1 (Pasillo I) (dB)	TLp (Sala I) (dB)	$LP_1 - TLp$ (dB)	LP_2 (dB)
125	66.00	26	40.00	38.43
250	72.00	32	40.00	38.29
500	77.00	40	37.00	34.89
1k	74.00	45	29.00	26.82
2k	68.00	45	23.00	20.50
4k	60.00	48	12.00	8.91

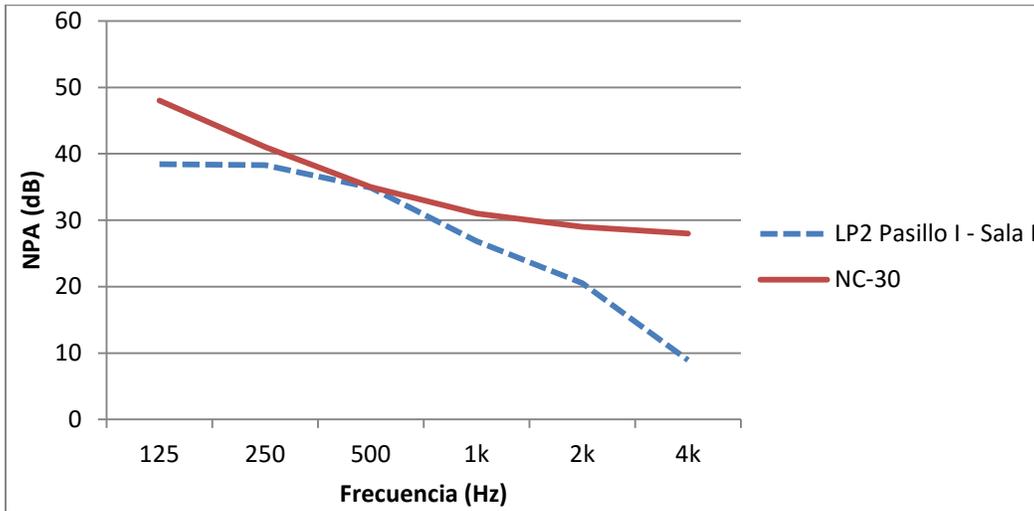


Figura 3.7. $L_{p2} < L_p$ del criterio de ruido NC-30, Sala Pasillo I – Sala I.

Tabla 3.13 Nivel de ruido esperado en Pasillo Lateral - Sala I.

Frecuencia (Hz)	LP ₁ Pasillo lateral (dB)	TLp Sala I (dB)	LP ₁ - TLp (dB)	LP ₂ (dB)
125	63.00	29	34.00	34.22
250	66.00	27	39.00	39.07
500	67.00	36	31.00	30.68
1k	64.00	43	21.00	20.60
2k	58.00	36	22.00	21.28
4k	50.00	42	8.00	6.69

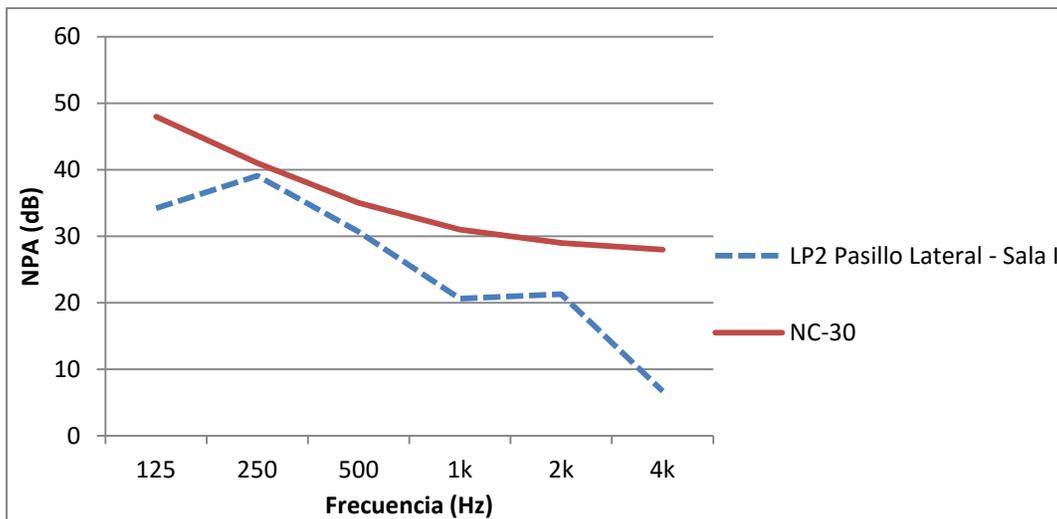


Figura 3.8. $LP_2 < LP$ del criterio de ruido NC-30, Pasillo Lateral - Sala I.

Tabla 3.14 Nivel de ruido esperado en Sala V – Sala I.

Frecuencia (Hz)	LP ₁ Sala V (dB)	TLp Sala I (dB)	LP ₁ - TLp (dB)	LP ₂ (dB)
125	66.00	27	39.00	29.23
250	72.00	31	41.00	31.09
500	77.00	35	42.00	31.69
1k	74.00	35	39.00	28.62
2k	68.00	37	31.00	20.30
4k	60.00	43	17.00	5.71

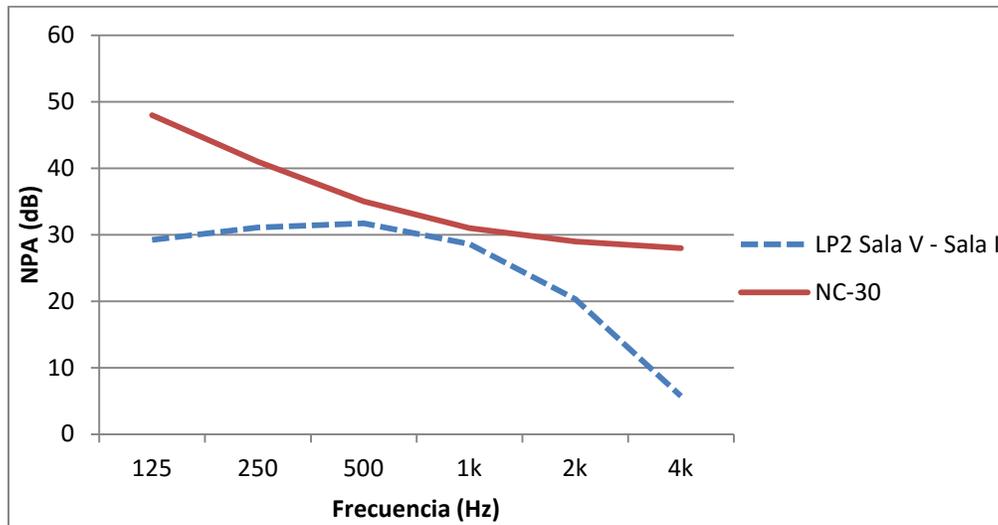


Figura 3.9. LP₂ < LP del criterio de ruido NC-30 en Sala V – Sala I.

Resultado:

Se observa con las tablas (**Tablas 3.12, 3.13 y 3.14**) y gráficamente (**Figuras 3.7, 3.8 y 3.9**) que la pérdida por transmisión propuesta cumple con el criterio de ruido NC-30, por lo tanto el nivel de ruido es el esperado y el adecuado para un recinto destinado al uso de la voz, ya que se encuentra por debajo de la curva del criterio de ruido NC-30.

3.4 Resultados gráficos del diseño acústico de Sala I

En las **Figura 3.10** y **Figura 3.11** se muestra una visualización gráfica de la distribución de los materiales sobre los muros constructivos, piso y techo de la Sala I con respecto a la propuesta de diseño de acondicionamiento y aislamiento acústico en la Sala I desarrollado en el **Capítulo 3**.

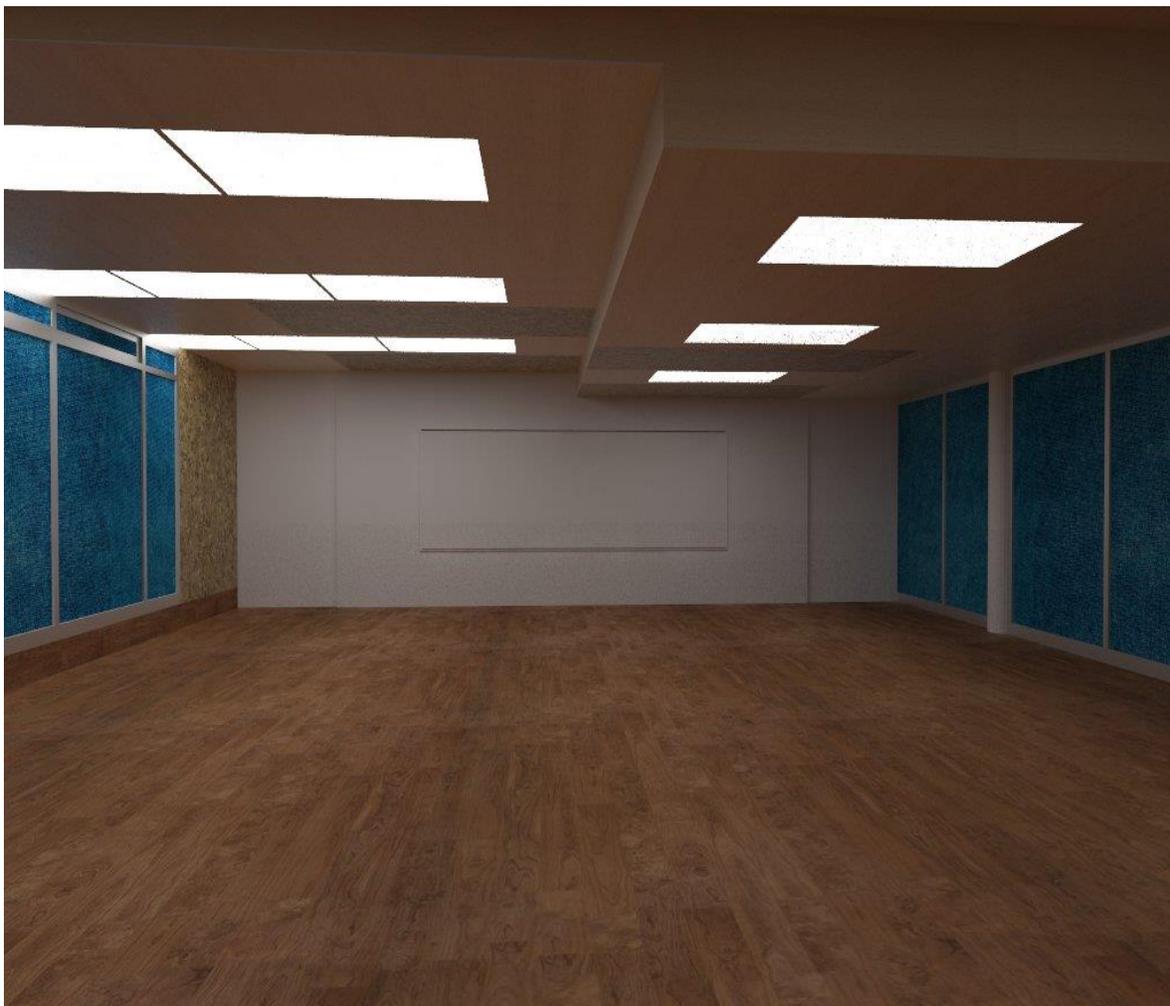


Figura 3.10. Vista en isométrico de propuesta de diseño acústico de Sala I (vista hacia el pizarrón).

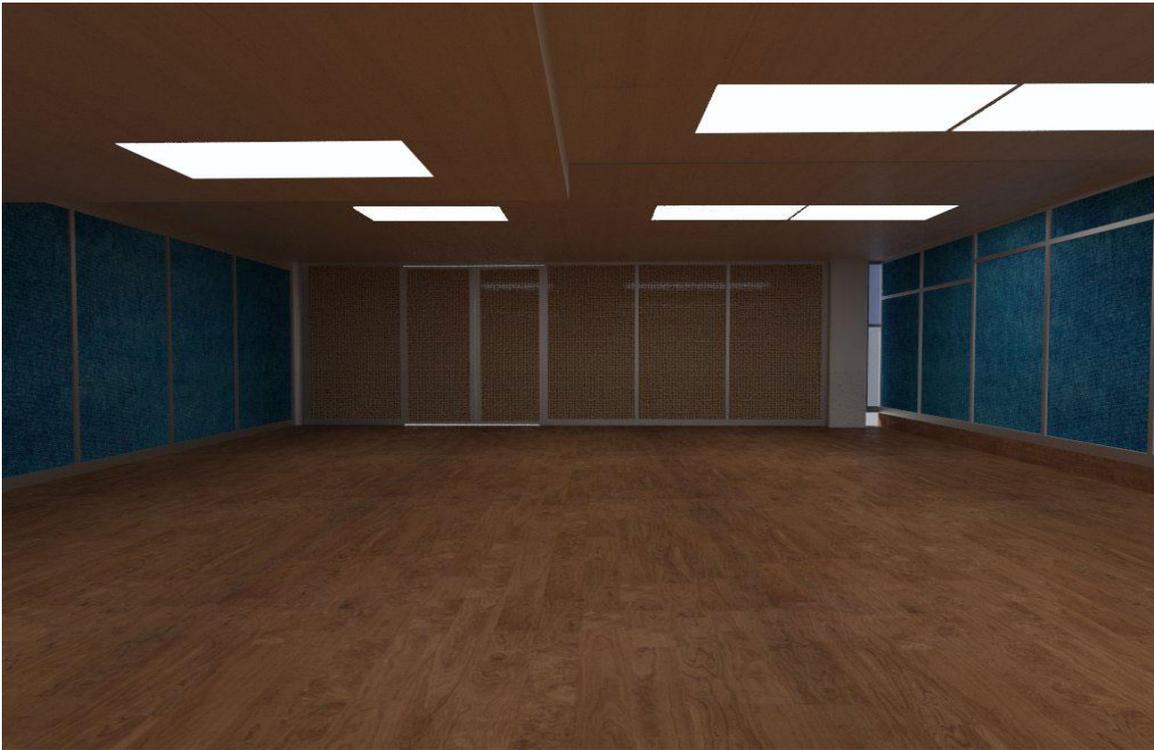


Figura 3.11. Vista en isométrico de propuesta de diseño acústico de Sala I (vista hacia la puerta).

Se muestra en las **Figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18** la visualización grafica de los arreglos de materiales aplicados a los muros constructivos, piso y techo de la Sala I de acuerdo a la propuesta de diseño de acondicionamiento y aislamiento del **Capítulo 3**.

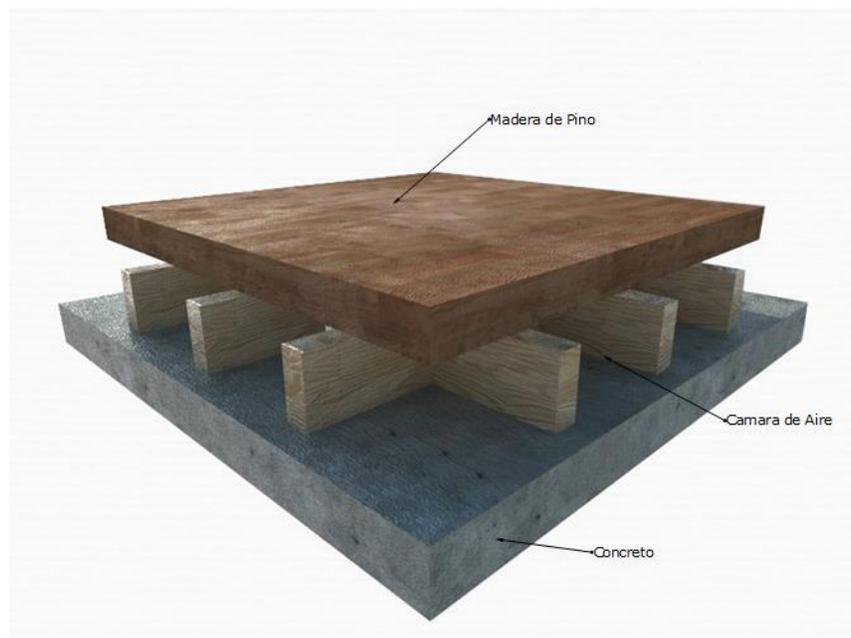


Figura 3.12. Vista en isométrico, zoom de propuesta de acondicionamiento acústico en piso.

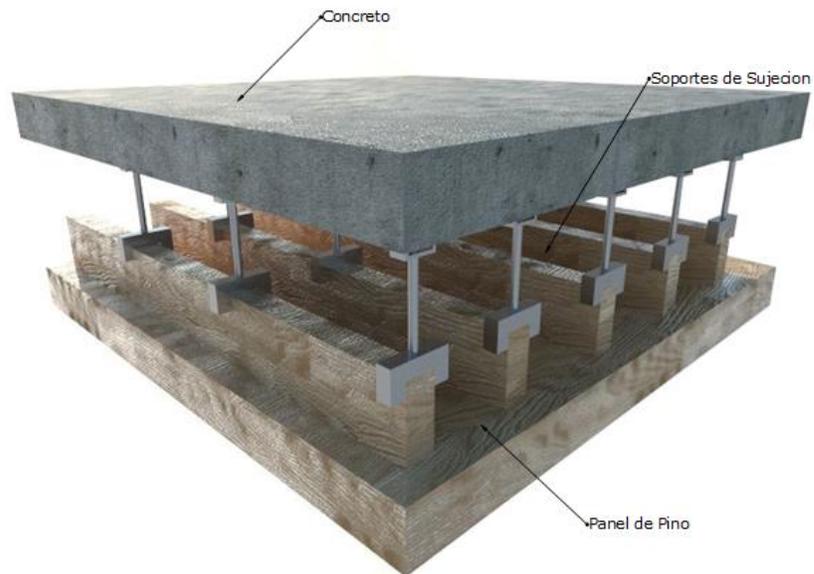


Figura 3.13. Vista en isométrico, zoom de propuesta de acondicionamiento acústico en techo.

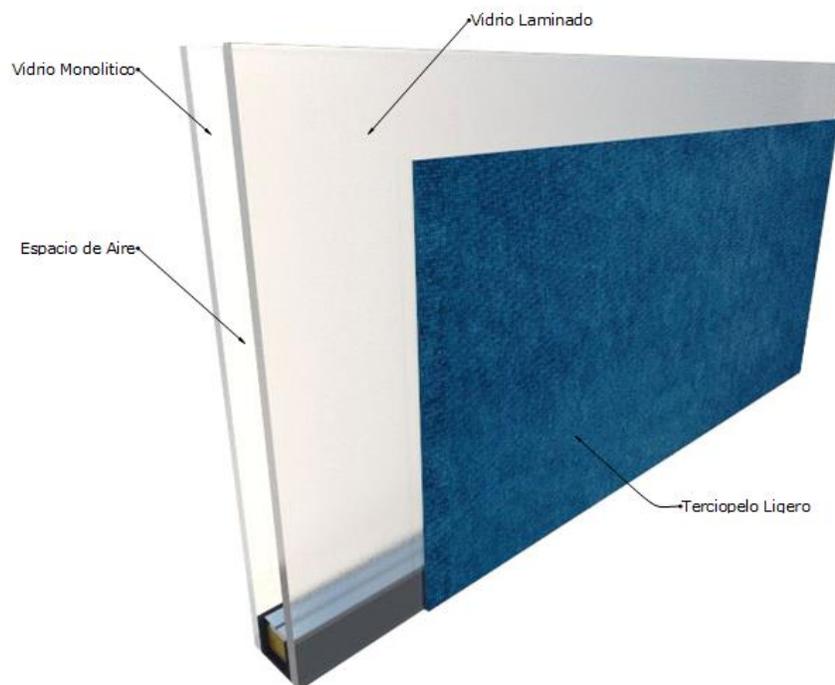


Figura 3.14. Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento (arreglo de vidrios) y acondicionamiento (terciopelo) acústico en muro constructivo Sala IV y muro Pasillo lateral-Sala I.

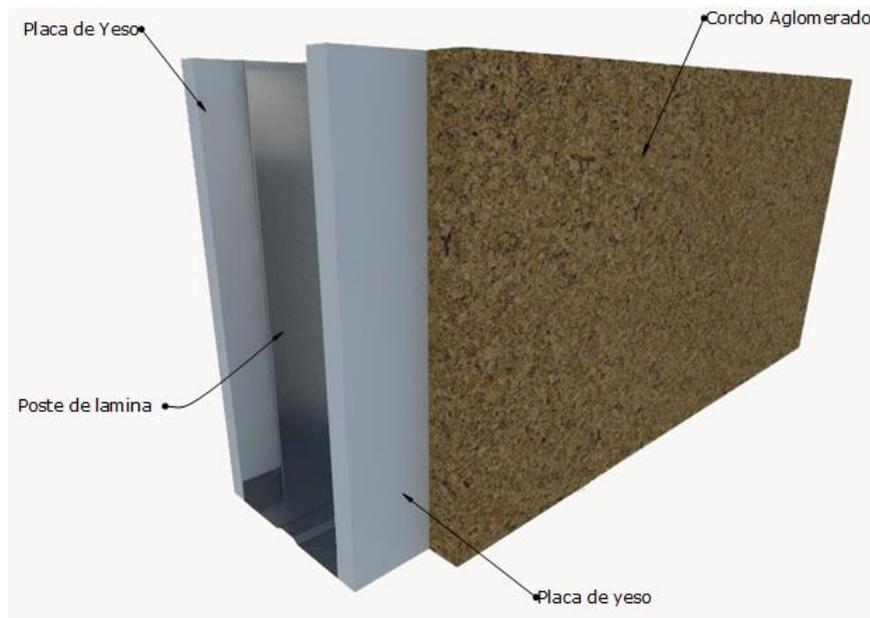


Figura 3.15. Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento (placa de yeso **Figura 3.16**) y (corcho aglomerado) acondicionamiento acústico en muro constructivo Sala V-Sala I.

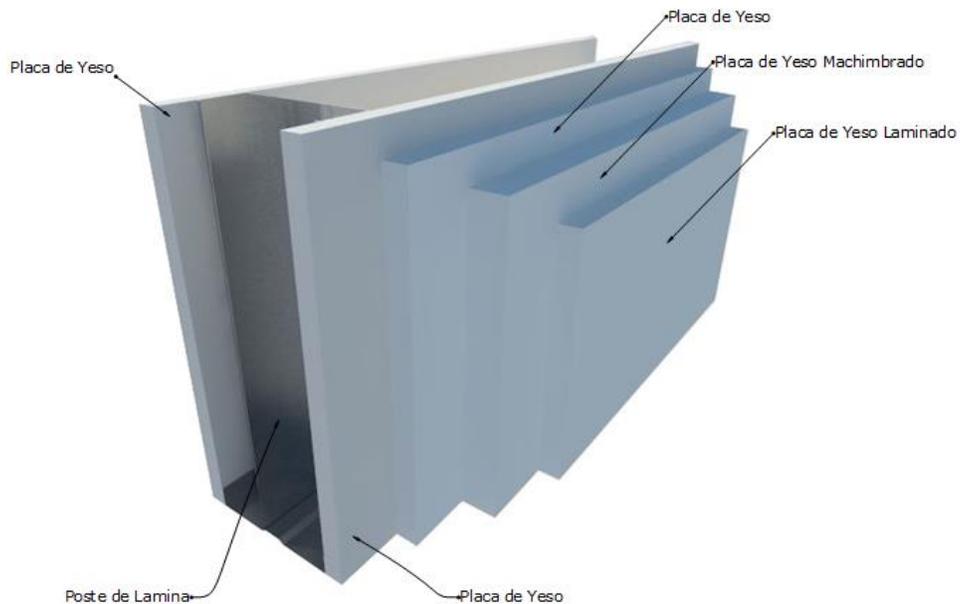


Figura 3.16. Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento acústico (placas de yeso) en muro constructivo Sala V-Sala I.

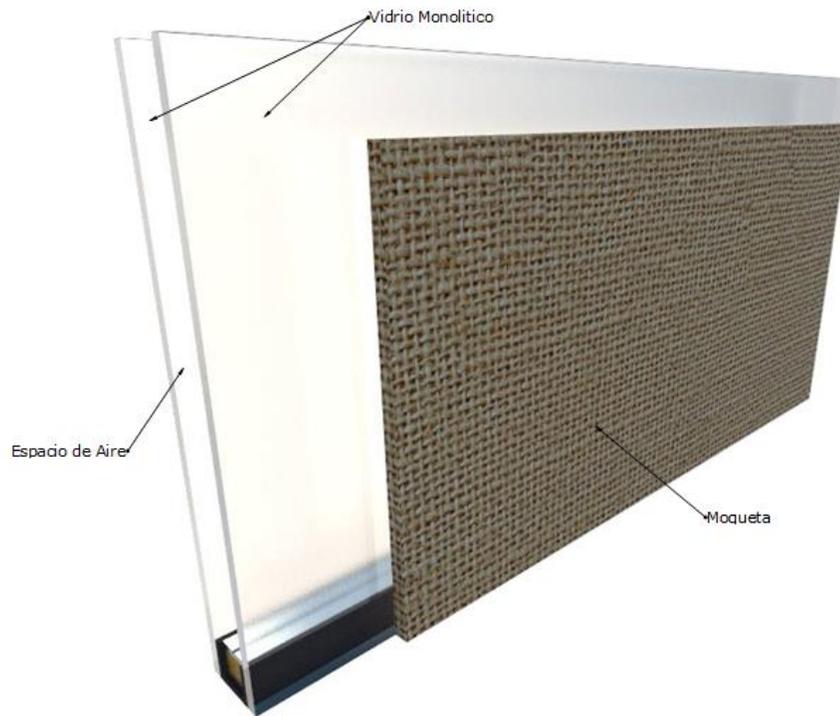


Figura 3.17. Vista en isométrico por capas de propuesta de aislamiento acústico (arreglo de vidrios) y acondicionamiento (moqueta) en muro constructivo Pasillo I-Sala I.



Figura 3.18. Vista en isométrico por capas de propuesta acondicionamiento acústico (fibra de vidrio con velo acústico) en muro constructivo Pasillo II-Sala I.

3.5 Análisis de costos

Para el diseño acústico de la Sala I con base en el **Capítulo 3** se requiere de los materiales seleccionados. A continuación en la **Tabla 3.15** y **Tabla 3.16** se despliega el desglose de los materiales propuestos con su respectivo precio.

Haciendo una clasificación de los materiales con respecto a su aplicación, en la **Tabla 3.15** están desplegados los materiales requeridos únicamente para acondicionamiento y en la **Tabla 3.15** para aislamiento acústico.

Tabla 3.15. Análisis de costos de tratamiento acústico para acondicionamiento.

Material	Superficie (m ²)	Descripción	Precio
Cortina de terciopelo ligero	50.44	(ligero)	\$2,500.00
Corcho aglomerado	13.04	2 cm	\$1,200.00
Tabla de yeso	5.00	1.2 cm	\$680.00
Fibra de vidrio	12.17	10 cm	\$2,890.00
Moqueta	18.30	0.8 cm	\$3,450.00
Panel de pino	74.62	1.19 cm	\$580.00
Madera de 3 cm	84.62	3 cm	\$915.00
Total			\$12,215.00

Tabla 3.16. Análisis de costos de tratamiento acústico para aislamiento.

Material	Superficie (m ²)	Descripción	Precio
Vidrio Laminado	22.85	6 mm	\$8,092.70
Vidrio	45.89	6 mm	\$9,560.40
Vidrio monolítico	22.85	4.7 mm	\$6,855.00
Vidrio	18.3	3 mm	\$2,745.00
Tablaroca	3.04	16 mm	\$520.00
Tablaroca de de machihembrado	3.04	25 mm	\$520.00
Tablaroca laminado con adhesivo	3.04	15 mm	\$640.00
Total			\$28,933.10



Como se espera la instalación de dichos materiales requiere un costo adicional, en la **Tabla 3.17** y **Tabla 3.18** se muestra el desglose del precio de instalación de cada material constructivo.

Tabla 3.17. Análisis de costos de instalación para acondicionamiento.

Instalación	Día	Costo	Total
Cortina de terciopelo ligero	1	\$580.00	\$580.00
Corcho aglomerado	1	\$980.00	\$980.00
Tabla de yeso	1	\$400.00	\$400.00
Fibra de vidrio	1	\$380.00	\$380.00
Moqueta	1	\$540.00	\$540.00
Panel de pino	5	\$490.00	\$2,450.00
Madera de 3 cm	6	\$520.00	\$3,120.00
Total			\$8,450.00

Tabla 3.18. Análisis de costos de instalación para aislamiento.

Instalación	Día	Costo	Total
Vidrio laminado	5	\$550.00	\$2,750.00
Vidrio	5	\$450.00	\$2,250.00
Vidrio monolítico	5	\$450.00	\$2,250.00
Vidrio	5	\$450.00	\$2,250.00
Tablaroca	1	\$140.00	\$140.00
Tablaroca de de machihembrado	1	\$140.00	\$140.00
Tablaroca laminado con adhesivo	1	\$140.00	\$140.00
Total			\$9,920.00



En la **Tabla 3.19** se muestra el costo total aproximado de los materiales para el diseño acústico de la Sala I de la BNCT y su respectiva instalación.

Tabla 3.19. Análisis de costos con respecto a los materiales e instalación.

Total Material	\$41,148.10
Total Instalación	\$18,370.00
Total 1	\$59,518.10

En la **Tabla 3.20** se observa el costo por el diseño acústico (honorarios del ingeniero), en este caso se tomó el 25% sobre el total de los materiales e instalación, de esta manera se observa aproximadamente el costo total del presente proyecto.

Tabla 3.20. Costo total del proyecto.

Costo Total 1	\$59,518.10
Diseño Acústico	\$14,879.53
Costo Total	\$74,397.63



Conclusiones

El diseño acústico de la Sala I de la Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología "Ing. Víctor Bravo Ahuja" del Instituto Politécnico Nacional, por su ubicación geográfica es de suma importancia para la comunidad politécnica, es decir, es una Sala a la cual todo estudiante, docente e incluso un externo puede tener acceso, puesto que en ésta se imparten diferentes tipos de cursos, conferencias y talleres, siendo necesario el contar con un recinto apto para el uso de la voz para toda la comunidad e invitados politécnicos.

En el presente proyecto, se realizó un análisis de las condiciones iniciales de la Sala I, evaluando los tiempos de reverberación, inteligibilidad, ruido de fondo, ruido externo e interno, para obtener un estudio completo de las características acústicas de la dicha sala.

La Sala I principalmente funge para el uso de la voz, por ello, se realizó un análisis para evaluar si es necesario un acondicionamiento acústico, el cual permite estudiar el tiempo de reverberación y con este la inteligibilidad de la palabra. La inteligibilidad determina como transmiten las palabras a toda la audiencia dentro del recinto con respecto a la distancia del orador. Se buscó mejorar la inteligibilidad existente, ya que sí se perciben claras y homogéneas las palabras (información) será mejor el procesamiento y entendimiento del mensaje que trasmite el orador.

Con los métodos de %ALcons y STI se comprobó que efectivamente la percepción de la comunicación verbal mejora notoriamente, pasando de tener una inteligibilidad aceptable a una buena, se refiere con buena, a una mejor claridad de la transmisión oral a mayor distancia del orador, por los dos métodos realizados para evaluar este parámetro, por lo tanto el diseño de acondicionamiento acústico cumplió con los objetivos propuestos.

Para obtener el tiempo de reverberación se propuso una combinación de materiales absorbentes y reflejantes para conseguir el tiempo óptimo, estos materiales se eligieron principalmente para cumplir con la tolerancia de una Sala para voz, concluyendo que al reducir el tiempo de reverberación se mejoró la inteligibilidad de la palabra.

Otro aspecto a evaluar en el diseño fue el aislamiento acústico, que es la pérdida por transmisión del sonido que se transmite entre la Sala I y las Salas contiguas, así como pasillos. El aislamiento se logró con base en una combinación de materiales, en su mayoría vidrio y recubrimientos, que dependen del grosor y densidad para así cumplir con el criterio de ruido seleccionado.

El aislamiento acústico permite al orador como a la audiencia, percibir sin interrupciones la información así como tener confidencialidad en los eventos de dicho recinto.



Un inconveniente en el desarrollo del proyecto fue el capturar la voz de las personas debido a que la voz humana varía de acuerdo a diversos factores, mencionando que su espectro de fluctuación en la frecuencia es muy inestable y amplio, por lo tanto es difícil obtener su NPA ya que como se mencionó la voz varía desde la edad, género, estado anímico, número de personas, tema de conversación, entre otros factores. Debido a esto se optó como mejor opción tomar los valores de la literatura para realizar algunas secciones del proyecto.

Al realizar este proyecto se aplicaron conocimientos teorías, formulas y técnicas de la ingeniería en comunicaciones y electrónica aplicados a la especialidad de acústica principalmente a la materia de acústica arquitectural.

El desarrollar este proyecto abre un panorama diferente a lo que comúnmente se piensa de un recinto, es decir, se muestra que no solo se necesitan "4 paredes" para hacer funcional un recinto y se comprueba con las bases teóricas y resultados obtenidos en este proyecto que un diseño acústico mejora notablemente la inteligibilidad de la palabra y el nivel de ruido esperado en el recinto.

Las mediciones como los cálculos están referenciados a teorías y autores reconocidos, por lo tanto, teóricamente se puede decir que el diseño acústico cumple adecuadamente con los aspectos requeridos, sin embargo, es importante mencionar que al realizar físicamente el proyecto, los resultados podrían variar, ya que algunos de los materiales de acuerdo al proceso de elaboración presentan otros coeficientes debidos a diferentes estándares de calidad o técnicas de fabricación.

La aplicación de la acústica para mejorar la propagación, transmisión y recepción del sonido en el recinto es fundamental para poder aprovechar todas las cualidades que este nos brinda. La elección de materiales es fundamental en cuanto al acondicionamiento y al aislamiento, ya que no se puede seleccionar un material solo por sus características acústicas, también es importante tomar en cuenta las propiedades físicas y visuales, es decir, físicas en el aspecto del tipo de material que se va a colocar, evaluando peso, tamaño, dureza, fragilidad, resistencia, etc., y en cuanto a características visuales, el color, estilo, luz, forma, olor, distribución, el aseo, etc. Otro aspecto importante es el costo de cada material considerando transporte y colocación (mano de obra). Todos estos aspectos son importantes para que el proyecto resulte viable y redituable.

Anexo A

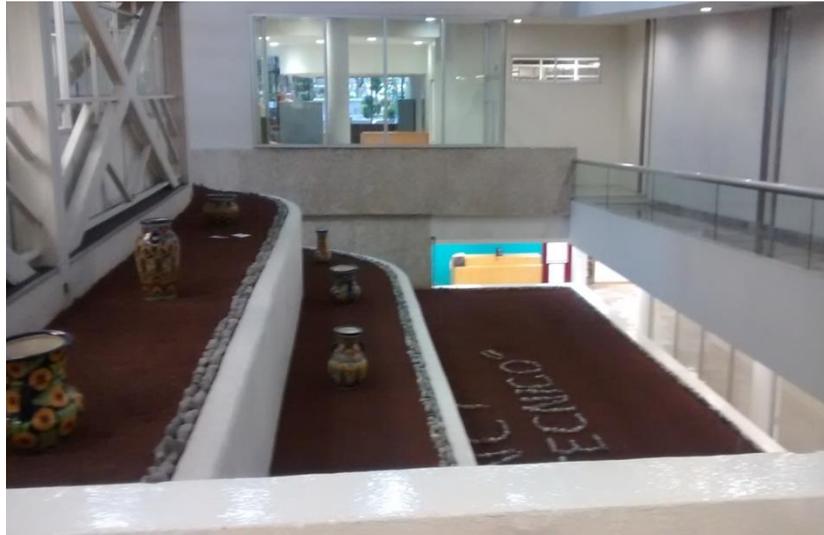


Figura A1: Vista del acceso principal del Sótano 2.



Figura A2: Vista, Pasillo I.



Figura A3: Vista Pasillo I, fachada de Auditorio alterno y Audiovisual.



Figura A4: Vista Pasillo lateral.



Figura A5: Vista Sala IV.



Figura A6: Vista Sala V, Pasillo II.



Figura A7: Conexión de fuente omnidireccional, amplificador y computadora.



Figura A8: Sonómetro analizador de espectro, Phonic PAA3.



Figura A9: Vista Sala I, medición de inteligibilidad en punto B.



Referencias

- 🔊 Acoustical Guide SAFLEX® Solutia Inc., registered in the U.S.
- 🔊 Analizador personal de audio, PAA3 de Phonic, Manual de usuario. Consultado en marzo del 2015 y disponible en: <http://www.phonic.com>
- 🔊 Anaya, N. (2015). Transmisión de la voz, Fundamentos de Telefonía. Elastixtech. Consultado en enero del 2016 y disponible en: <http://elastixtech.com/fundamentos-de-telefonía/transmision-de-la-voz/>
- 🔊 Basso, G. (2006). Percepción Auditiva. Universidad Nacional De Quilmes. La Plata, Argentina.
- 🔊 Beranek L. (1993). Acoustics, Acoustical Society of America.
- 🔊 Beranek, L (1957), Revised Criteria for Noise In Buildings, Noise Control.
- 🔊 Bies, D.A., Hansen, C.H. (2009). Engineering Noise Control: Theory And Practice, 4 Ed. Spoon Press, New York, Usa.
- 🔊 Blanco, F. (2007). Propiedades Acústicas. Universidad de Oviedo, España. Disponible en: <Http://Www6.Uniovi.Es/Usr/Fblanco/Temaii.2.4.Acusticas.Pdf>
- 🔊 Bongiovanni P., Cascino M., y Sanso M., Análisis y Diseño de Difusores Acústicos. Departamento de Ingeniería Electrónica – Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (Utn.Frc). Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina, Córdoba, Argentina. Disponible en: <Http://Www.Profesores.Frc.Utn.Edu.Ar/Electronica/Fundamentosdeacusticayelectroacustica/Pub/File/Faye0311e1-Bongiovanni-Cascino-Sanso.Pdf>
- 🔊 Carrión, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Talleres gráficos hostench, Córcega, Barcelona, España. 231-233.
- 🔊 Casadevall D., (2008). Consultor acústico, Absorción y Aislamiento acústico: Teoría Acústica. Consultado en enero 2016 y disponible en: <Http://Www.Acusticaweb.Com/Teoria-Acustica/Blog/Teoracca/Absorci-Aislamiento-Acco.Html>



- 🔊 Cole, R., Scott, B. (1974). Toward a Theory of Speech Perception. *Psychological Review*, 81(4): 348-374.
Consultado en febrero del 2016 y disponible en: <http://www.equaphon-university.net/inteligibilidad-de-la-palabra/>
- 🔊 Da Riva, H.O. Sound And Acoustic Engineer, Sonex S.A – Acustec, Soluciones Acústicas Y Antivibratorios.
Disponible en:
<http://www.ingenieriadesonido.com/Upload/Difusion%20y%20absorcion%20faq.Pdf>.
- 🔊 Domínguez - Rodiño, P. Tratamiento Acústico De Salas De Motores: Ventilación + Filtración + Atenuación Acústica. Xi Jornada Sobre El Aislamiento Acústico Y Térmico En La Construcción. Universidad Politécnica De Valencia, España.
- 🔊 Egan, D.M. (2007). *Architectural Acoustics*. J. Ross Publishing, Usa.
- 🔊 García, G, Mirasso, E., Storti, A. Tornello, M. (2013). Base de Datos de Coeficientes de Absorción Sonora de Diferentes Materiales. Mendoza, Argentina, 19-22
- 🔊 García, C Francisco J. (2000) Trabajo de Graduación, Capítulo 4,164-177, Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, S.A."leesa". El Dorado, Panamá.
- 🔊 Gay, A. Wright, H.P. (2012), *Ingeniería*. Capítulo 2.
- 🔊 Harris - Cyril, M., Warnock, A.C.C., Quirt, J.D. (1997). *Noise Control in Buildings. Handbook Of Acoustical Measurements And Noise Control*. 3 Ed. Acoustical Society Of America.
- 🔊 Higini, A., (1999). *Abc de la Acústica Arquitectónica*. Ediciones Ceac. España.
- 🔊 Illanes, J. (2012). Banda De Octava. 4b Ing. Automotriz, Universidad Tecnológica Equinoccial
- 🔊 Instructivo Para La Aplicación Del D. S N° 594/99 Del Minsal, Título IV, Párrafo 3º, Agentes Físicos – Ruido.
Disponible en: Http://Www.lspch.cl/Salud_Ocup/Doc/Instructivo_594.Pdf.
- 🔊 International Estándar, ISO 3382, Measurement Conditions, Interrumped Noise Method. *Acoustics- Measurement Of The Reverberation Time Of Rooms With Reference to Other Acoustical Parameters*.



- 🔊 Jorge, (2014) Analizadores de espectro explicados, Siete Notas, Estudio de Mezcla y Mastering. Consultado en febrero del 2016 y disponible en: <http://blog.7notasestudio.com/analizadores-de-espectro-explicados/>
- 🔊 Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V. (1993). Fundamentos de Acústica, Limusa Noriega Editores.
- 🔊 Llamazares, V, M. Ondas Sonoras Simples: Elementos y Propiedades de la Ondas Sonoras, Universidad de León.
Disponible en: <Http://Fhyc.Unileon.Es/Milka/Fyf/34.Pdf>
- 🔊 Long, M. (2014). Human Perception and Reaction to Sound: Loudness. Architectural Acoustics. 2 Ed. Academic Press. Usa.
- 🔊 López, A (2012). Construcciones 3 "D", 3er. Año – Carrera Arquitectura, Div. "D" – Turno Tarde, Unidad N° 7: Acústica Arquitectónica, 56.
- 🔊 Mateljan Ivo, ARTA User Manual, Version 1.8.5, 2015
- 🔊 Mehta, M., Johnson, J.A., Rocafort, J. (1999). Architectural Acoustics: Principles And Design. Prentice Hall, USA.
- 🔊 Miyara, F. (1999). Acústica Arquitectónica. Acústica y sistemas de sonido. Editoriales de la asociación de universidades grupo Montevideo. Argentina.
- 🔊 Modulo Acústica y Fundamentos del Sonido, Unidad 1 - Fundamentos del Sonido, Capitulo 1 - El Oído Humano. Lección 11 - Espectro y Bandas de Octava, Universidad Nacional Abierta y a distancia, UNAyD.
Consultado en febrero del 2016 y disponible en: <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208042/Contenido en linea/leccin 11 espectro y bandas de octava.html>
- 🔊 Norma BSN EN 60268-16:2011 Sound system equipment Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index, 2011, documento PDF disponible en: <http://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/BS%20EN%2060268-16.pdf>
- 🔊 Norma Oficial Mexicana NOM-081 – ECOL-1994, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.
- 🔊 Pérez, C. (2011). Audición Humana. Sistemas de Telecomunicación. Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, España.



- 🔊 Plataforma E-Ducativa, Tema 3. Ondas Sonoras, 3 Cualidades del Sonido: Tono y Timbre. Consultado en enero 2016 y disponible en: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3212/html/3_cualidades_del_sonido_tono_y_timbre.html
- 🔊 Ramón, F. (2014). Inteligibilidad de la Palabra. Departamento de Investigación y Desarrollo. Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina.
- 🔊 Ramos R., A.F. (2009) MEDIDAS DE RUIDO, Área de Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Granada, España.
- 🔊 Recuero, M. (2000) Ingeniería Acústica, Editorial Paraninfo, Madrid, España.
- 🔊 Rettinger, M. (1977). Acoustic Design and Noise Control. Chemical Publishing Co.
- 🔊 Salinas, J. Acústica Arquitectónica, Procesos Constructivos Nivel III, 1. Aspectos Físicos de la Acústica, 22.
- 🔊 Sánchez, C., Dujovne, L., Poo, C. (2006) Manual de Aplicación Reglamentación Acústica, Colección: Monografías y Ensayos, Serie II: Tecnologías de la Construcción, editor Ministerio de Vivienda y Urbanismo, División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, Departamento de Tecnologías de la Construcción, Publicación: Nº 325. Gobierno de Chile, MINVU, 29.
- 🔊 Servín, R., Ilhuicamina, T. (2010). Medición de campo del aislamiento acústico. Academia de Acústica, E.S.I.M.E. Zacatenco, Sociedad Mexicana de Acústica, A.C, III Congreso Nacional de Acústica, D.F., México. 136 -145.
- 🔊 Servín, R., Ilhuicamina, T. (2012). Acondicionamiento Acústico de Recintos. Academia de Acústica, E.S.I.M.E. Zacatenco, D.F., México.
- 🔊 Servín, R., Ilhuicamina., T. (2012). Sonómetro, Ecuaciones de tiempo de reverberación de Sabine y Norris-Eyring, Inteligibilidad de la palabra, Curvas de criterio de ruido NC y Procedimiento resumido para diseñar el aislamiento acústico de un recinto. Material de consulta para los cursos de Metrología acústica y Acústica Arquitectural. Academia de Acústica, E.S.I.M.E. Zacatenco. D.F., México.
- 🔊 Steeneken Herman J. M., The measurement of speech intelligibility. Consultado en febrero del 2016 y PDF disponible en: http://www.gold-line.com/pdf/articles/p_measure_TNO.pdf



- ▶ Steeneken Herman J. M. y Houtgast Tammo, Basics of the STI measuring method. Consultado en febrero del 2016 y PDF disponible en:
[https://www.researchgate.net/publication/252224634 Basics of the STI-measuring method](https://www.researchgate.net/publication/252224634_Basics_of_the_STI-measuring_method)
- ▶ Stee- Elias. (2001). El ruido y los edificios: Jornada de criterios acústicos en el diseño de centros docentes, 2° Parte, 62, Labein, Centro Tecnológico.
- ▶ Steeneken, H.J.M., Houtgast, T. (1980). A Physical Method for Measuring Speech Transmission Quality. The Journal of The Acoustical Society Of America. 67:318.
- ▶ Warnock, A.C.C. Quirt, J.D. Tables Of Sound Insulation Ratings.
- ▶ Wright, H. Paul. (2004) .Funciones de la ingeniería. Capítulo 2.