

**APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE
SONORIZACIÓN**

**CARLOS MIGUEL RUEDA CHÁVEZ
MAURICIO ANDRÉS PRADA SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2012

**APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE
SONORIZACIÓN**

**CARLOS RUEDA CHÁVEZ
MAURICIO ANDRÉS PRADA SÁNCHEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director:
MSc. Raúl Restrepo Agudelo**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2012

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Principalmente quisiéramos dedicar este proyecto a nuestros padres que con su paciencia y sabiduría han estado siempre pendientes de nosotros en este proceso de formación, a pesar de incontables altibajos e inconvenientes siempre se mantuvieron firmes creyendo en las capacidades de nosotros.

También queremos agradecer a nuestros hermanos que de la mano con nuestros padres recibimos su apoyo incondicional, dándonos fuerza y empuje para derribar cualquier obstáculo que se presente y seguir adelante como seres humanos íntegros y con calidad humana.

Dedicamos a Dios puesto que nos brinda un pedacito de su infinita sabiduría y amor, aferrándonos a él en los momentos más difíciles y agradeciéndole por los momentos de satisfacción y éxito.

A nuestro director de proyecto quien nos brindó parte de su conocimiento y sabiduría para la elaboración total de nuestro proyecto haciéndolo una realidad.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia queremos agradecer a nuestra universidad, por brindarnos las herramientas y conocimientos necesarios para poder realizar nuestro proyecto de grado.

Queremos agradecer a nuestro director de proyecto, profesor Raúl Restrepo, quien compartió su amplio conocimiento sin medida, en el desarrollo de la ejecución del proyecto de grado, ya que con su valioso tiempo y con sus aportes a la solución de dudas que se presentaron en el proceso, este es una realidad.

Agradecemos a todos los profesores que hicieron parte de nuestra formación, quienes, con su vasto conocimiento y experiencia, aportaron su granito de arena en la formación de profesionales íntegros y con excelente calidad humana.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	18
RESUMEN	20
ABSTRACT	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
ANTECEDENTES	25
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	23
CAPÍTULO 1 CONSIDERACIONES GENERALES DE LAS ONDAS SONORAS Y LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS	26
1.1 INTRODUCCIÓN.....	26
1.2 DEFINICIÓN DEL SONIDO.....	26
1.3 INTENSIDAD SUBJETIVA.....	26
1.4 TONO.....	27
1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SONIDOS.....	27
1.5.1 <i>Sonido periódico simple</i> :.....	27
1.5.2 <i>Sonido periódico complejo</i>	28
1.5.3 <i>Sonido transitorio</i> :.....	29
1.6 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO.....	29
1.8 DIFRACCIÓN DE LAS ONDAS SONORAS.....	30
1.10 ABSORCIÓN DEL SONIDO.....	32
1.11 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (A).....	33
1.12 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO.....	34
1.13 TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	34
1.14 CÁLCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	35
1.15 INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA.....	36
1. 16 CÁLCULO DE LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA: %ALCONS.....	38
1.17 RELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN Y LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA.....	41
1.18 NIVEL DE PRESIÓN SONORA (<i>SPL</i> o <i>LP(a)</i>).....	42
1.19 RELACIÓN SEÑAL A RUIDO.....	43
1.20 MEDICIÓN DEL SONIDO: EL SONÓMETRO.....	43

CAPÍTULO 2 CONSIDERACIONES GENERALES DE LOS ALTAVOCES.....	45
2.1 EL ALTAVOZ	45
2.2 SENSIBILIDAD	46
2.3 POTENCIA NOMINAL.....	46
2.4 IMPEDANCIA ELÉCTRICA	46
2.5 RESPUESTA EN FRECUENCIA	47
2.6 ÁNGULO DE COBERTURA.....	47
2.7 DIRECTIVIDAD DE UN ALTAVOZ.....	48
2.8 MEDIDA DE LA DIRECTIVIDAD.....	48
2.9 POTENCIA ELÉCTRICA NECESARIA POR ALTAVOZ “EPR”	50
2.10 UBICACIÓN DE LOS PARLANTES	50
2.11 MÉTODOS DE RECUBRIMIENTO	51
2.12 MÉTODO CENTRALIZADO	51
2.13 AUMENTO DEL ALCANCE VERTICAL.....	53
2.14 AUMENTO DEL ALCANCE HORIZONTAL	53
CAPÍTULO 3 DISTRIBUCIÓN DE LOS ALTAVOCES	54
3.1 MÉTODO DISTRIBUIDO	54
3.1.1 <i>Parlantes de pared o columna</i>	54
3.1.2 <i>Parlantes de techo</i>	54
3.2 ANÁLISIS DE COBERTURA INDIVIDUAL PARA PARLANTE EN EL TECHO	55
3.3 DISTRIBUCIÓN CENTRO CON CENTRO	56
3.4 SOLAPAMIENTO MÍNIMO	57
3.5 BORDE CON BORDE	57
CAPÍTULO 4 DISTRIBUCIÓN DEL SONIDO EN MEGAFONÍA.....	59
4.1 DISTRIBUCIÓN EN BAJA IMPEDANCIA.....	59
4.1.1 <i>Pérdidas en la línea</i>	60
4.1.2 <i>Desequilibrio en la línea</i>	63
4.3 DISTRIBUCIÓN DE ALTA IMPEDANCIA.....	65
4.3 MONTAJE A POTENCIA CONSTANTE	67
4.4 MONTAJE A POTENCIA VARIABLE	68
CAPÍTULO 5 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPACIOS DEL EDIFICIO Y SECTORIZACIÓN DE LAS ZONAS A SONORIZARSE	72
5.1 SÓTANO:	72
5.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PRIMER NIVEL DEL EDIFICIO.....	73
5.3 SEGUNDO NIVEL.....	77
5.4 TERCER NIVEL	79

5.5 CUARTO PISO	80
CAPÍTULO 6. DISEÑO Y APLICACIÓN DEL DISEÑO APLICADO AL EDIFICIO J	82
6.2 DISTRIBUCIÓN CENTRO CON CENTRO.	83
6.2.1 Arreglo cuadrado	83
6.2.2 Arreglo hexagonal.....	85
6.3 SOLAPAMIENTO MÍNIMO	87
6.3.3 Arreglo cuadrado	87
6.3.4 Arreglo hexagonal.....	88
6.4 DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE	89
6.4.1 Distribución cuadrada	89
6.4.2 Distribución hexagonal.....	90
6.5 CÁLCULO DE LA POTENCIA ELÉCTRICA CONSUMIDA POR LOS PARLANTES.....	90
6.5.1 Ejemplo 1.....	90
6.5.2 Distribución de la red eléctrica.....	93
6.6. EJEMPLO 2. DIMENSIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.....	95
6.6.1 Dimensionamiento del transformador, teniendo en cuenta la eficiencia de los transformadores	97
CAPÍTULO 7. PASOS PARA LA APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE UN SISTEMA DE SONORIZACIÓN.	100
7.1 CÁLCULO PARA LOS ESPACIOS A SONORIZAR.	103
Salones de clase	103
7.1.2 Potencia eléctrica necesaria	107
POTENCIA ELÉCTRICA NECESARIA CONSIDERANDO PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES.	109
7.2 BIBLIOTECA	112
7.2.1 Sala de estudio No.1.....	112
7.3 BIBLIOTECA, SALA DE COMPUTADORES NO.1	118
7.4 BIBLIOTECA, SALA DE ESTUDIO NO.2	124
7.5 BIBLIOTECA, SALA DE ESTUDIO No.3.....	128
7.6 BIBLIOTECA, HEMEROTECA.....	132
7.7 ZONA CENTRAL.....	135
7.8 ZONA DE ESTAR Y ESCALERAS	141
7.10 FOTOCOPIADORA	151

7.11 SALA DE REUNIONES 1	155
7.12 SALA DE REUNIONES 2	156
7.13 SEGUNDO PISO: RECEPCIÓN.....	159
7.14 OFICINA COMUNICACIONES Y RELACIONES PÚBLICAS.....	162
7.15 ZONA DE ESTAR.....	166
7.16 PROMOCIÓN ACADÉMICA:	171
7.17 LIQUIDACIONES	175
7.18 SALA DE CAPACITACIONES DE NTIC'S	179
7.19 CONJUNTO DE OFICINAS: NUEVAS TECNOLOGÍAS, ICETEX, DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA	183
7.20 NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	184
7.21 ICETEX.....	187
7.22 DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA.....	189
CAPÍTULO 8: ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.....	190
8.1 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.	190
<i>8.1.1 Absorción del público y de las sillas.....</i>	<i>190</i>
<i>8.1.2 Materiales y elementos utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos.</i>	<i>192</i>
<i>8.1.3 Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techos.</i>	<i>193</i>
<i>8.1.4 Absorción del aire.</i>	<i>194</i>
<i>8.1.5 Absorción de las superficies vibrantes.....</i>	<i>195</i>
<i>8.1.6 Materiales absorbentes.....</i>	<i>195</i>
8.2 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.....	197
8.3 OBTENCIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN DESEADO.....	198
8.4 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO APLICADO A LOS ESPACIOS QUE LO REQUIERAN.	199
8.5 EJEMPLO DE DISEÑO	202
CAPÍTULO 9 VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA.....	211
VIABILIDAD TÉCNICA	211

ALTAVOCES.....	212
AMPLIFICADORES.....	214
TRANSFORMADOR ELEVADOR	215
VIABILIDAD ECONÓMICA.....	216
CONCLUSIONES	218
RECOMENDACIONES.....	219
BIBLIOGRAFÍA.....	220

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS MÁS RELEVANTES DEL MENSAJE ORAL	37
TABLA 2 MEDICIÓN DE LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA.....	37
TABLA 3 MEDIDAS OBTENIDAS PARA DETERMINAR LA DIRECTIVIDAD DE UN ALTAVOZ	49
TABLA 4 CARACTERÍSTICAS DE LAS CÉLULAS EN UN RECUBRIMIENTO DISTRIBUIDO CON ALTAVOCES EN EL TECHO. CENTRO CON CENTRO, SOLAPAMIENTO MÍNIMO Y BORDE CON BORDE.....	58
TABLA 5 SECTORIZACIÓN DE LAS ZONAS A SONORIZARSE.....	81
TABLA 6 RANGO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN IDEAL DEPENDIENDO DEL USO DE LA SALA A SONORIZAR	100
TABLA 7 DISTRIBUCIÓN, ARREGLO Y VARIACIÓN DE PRESIÓN SONORA	101
TABLA 8 CÁLCULO DE ABSORCIÓN PROMEDIO. J402.....	104
TABLA 9 CÁLCULO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN. J402	104
TABLA 10 CÁLCULO DE ABSORCIÓN PROMEDIO. SALA DE ESTUDIO No. 1	113
TABLA 11 CÁLCULO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN. SALA DE ESTUDIO No. 1.....	113
TABLA 12 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO. SALA DE COMPUTADORES 1.....	118
TABLA 13 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. SALA DE COMPUTADORES No.1	119
TABLA 14 GUÍA APLICADA A LA SALA DE COMPUTADORES 1, CON UN AMPLIFICADOR DE 8 OHMIOS DE IMPEDANCIA DE SALIDA.....	123
TABLA 15 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO. SALA DE ESTUDIO No. 2	125
TABLA 16 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. SALA DE ESTUDIO No.2	126
TABLA 17 ENTRADA DE DATOS PARA SALA DE ESTUDIO 2.	127
TABLA 18 DATOS DE SALIDA DE LA SALA DE ESTUDIO 2.	127
TABLA 19 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO Y TIEMPO DE REVERBERACIÓN.	129
TABLA 20 ENTRADA DE DATOS PARA SALA DE ESTUDIO 3.	130
TABLA 21 DATOS DE SALIDA DE LA SALA DE ESTUDIO 3.	130
TABLA 22 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO. HEMEROTECA	133
TABLA 23 CÁLCULO TIEMPO DE REVERBERACIÓN PARA LA HEMEROTECA.	133
TABLA 24 DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA PARA LA HEMEROTECA.....	134
TABLA 25 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO. ZONA CENTRAL.....	137
TABLA 26 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. ZONA CENTRAL	137
TABLA 27 DATOS DE LOS TRANSFORMADORES DE ACOPLE PARA LA ZONA CENTRAL CON 14 PARLANTES.....	139
TABLA 28 DATOS DE LOS TRANSFORMADORES DE ACOPLE PARA LA ZONA CENTRAL CON 100 PARLANTES.	140

TABLA 29 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO. ZONA DE ESTAR Y ESCALERAS.....	146
TABLA 30 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. ZONA DE ESTAR Y LAS ESCALERAS.....	146
TABLA 31 DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA PARA LA ZONA DE ESTAR DE LA BIBLIOTECA.	147
TABLA 32 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. SALA DE PROFESORES	149
TABLA 33 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. SALA DE PROFESORES.....	150
TABLA 34 DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA PARA LA ZONA DE ESTAR DE LA BIBLIOTECA.	150
TABLA 35 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. FOTOCOPIADORA	153
TABLA 36 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. FOTOCOPIADORA	153
TABLA 37 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. RECEPCIÓN.....	160
TABLA 38 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. RECEPCIÓN	160
TABLA 39 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN PROMEDIO. OFICINA DE COMUNICACIONES Y RELACIONES PÚBLICAS	163
TABLA 40 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. OFICINA DE COMUNICACIONES Y RELACIONES PÚBLICAS.....	164
TABLA 41 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. PROMOCIÓN ACADÉMICA	173
TABLA 42 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. PROMOCIÓN ACADÉMICA	173
TABLA 43 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. LIQUIDACIONES.....	177
TABLA 44 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. LIQUIDACIONES	177
TABLA 45 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. SALA DE CAPACITACIONES NTIC'S	180
TABLA 46 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. SALA DE CAPACITACIONES NTIC'S.....	180
TABLA 47 NUEVAS TECNOLOGÍAS, ICETEX, DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA. BORDE CON BORDE, CUADRADO.....	183
TABLA 48 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	185
TABLA 49 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. NUEVAS TECNOLOGÍAS	185
TABLA 50 CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ABSORCIÓN. ICETEX	188
TABLA 51 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. ICETEX.....	188
TABLA 52 EJEMPLOS DE ABSORCIÓN DE UNA PERSONA APP.....	191
TABLA 53 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y TIEMPO DE REVERBERACIÓN CON ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN EL TECHO, PARA LA RECEPCIÓN	199
TABLA 54 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y TIEMPO DE REVERBERACIÓN CON ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN EL TECHO, PARA LA OFICINA DE COMUNICACIONES Y RELACIONES PÚBLICAS.	200

TABLA 55 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y TIEMPO DE REVERBERACIÓN CON ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN EL TECHO, PARA LA OFICINA DE NUEVAS TECNOLOGÍAS.	201
TABLA 56 COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES DE LA PARED N°1.	205
TABLA 57 TABLA PARA HALLAR EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PROMEDIO.	206
TABLA 58 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	213
TABLA 59 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ENTREGADAS POR EL FABRICANTE	214
TABLA 60 COSTOS DE EJECUCIÓN	216

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: REPRESENTACIÓN DE UN TONO PURO (A) Y SU ESPECTRO (B).	28
FIGURA 2: SONIDO PERIÓDICO COMPLEJO (A) Y SU ESPECTRO (B).....	28
FIGURA 3 PULSO RECTANGULAR (A) Y SU ESPECTRO EN FRECUENCIA (B).	29
FIGURA 4 DISPERSIÓN DEL HAZ SONORO PRODUCIDO POR UN DIAPASÓN AL PASAR POR UN AGUJERO.	30
FIGURA 5. (A) SUPERFICIE PLANA; (B) SUPERFICIE CONVEXA; (C) SUPERFICIE CÓNCAVA; (D) REFLEXIÓN EN ESQUINA DE 90°.	31
FIGURA 6. ENERGIA INCIDENTE (A); ENERGIA REFLEJADA (B); ENERGIA ABSORVIDA (C); ENERGIA TRANSMITIDA (D).....	33
FIGURA 7 FACTORES QUE AFECTAN LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA EN SISTEMAS DE SONIDO.	38
FIGURA 8 OBTENCIÓN DEL %ALCONS A PARTIR DE RT Y DE LD –LR.	39
FIGURA 9 RELACIÓN INTELIGIBILIDAD DE PALABRA CON TIEMPO DE REVERBERACIÓN.	42
FIGURA 10 ALTAVOZ. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	45
FIGURA 11 SENSIBILIDAD	46
FIGURA 12 ÁNGULO DE COBERTURA DE UN ALTAVOZ	48
FIGURA 13 DIAGRAMA POLAR, DIRECTIVIDAD DE UN ALTAVOZ	49
FIGURA 14 RECUBRIMIENTO DE UN ALTAVOZ DONDE SE MUESTRAN LOS ÁNGULOS DE COBERTURA HORIZONTAL (A) Y VERTICAL (B).	52
FIGURA 15 ALTAVOCES DE PARED.	54
FIGURA 16 ALTAVOCES DE TECHO.	55
FIGURA 17 DISTRIBUCIÓN CENTRO CON CENTRO.....	56
FIGURA 18 DISTRIBUCIÓN CON SOLAPAMIENTO MÍNIMO.....	57
FIGURA 19 DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE.....	57
FIGURA 20 A) LÍNEA CON PÉRDIDAS RESISTIVAS, B) CONEXIÓN PARALELO, C) CONEXIÓN MIXTA, D) CONEXIÓN SERIE.	61
FIGURA 21 LÍNEA CON PÉRDIDAS Y DESEQUILIBRIO.....	63
FIGURA 22 TRANSFORMADOR.....	64
FIGURA 23 SISTEMA DE MEGAFONÍA EN LÍNEA DE 100V	66
FIGURA 24 SISTEMA DE MEGAFONÍA DE 100V A POTENCIA VARIABLE.	69
FIGURA 25 A) RESISTENCIA DE DESCONEXIÓN PARA MANTENER EQUILIBRIO DE LA LÍNEA, B) RESISTENCIA DE CARGA PARA SUPLIR LA FALTA DE POTENCIA.	70
FIGURA 26 PLANO DEL SÓTANO DEL EDIFICIO.....	72
FIGURA 27 PLANO DEL PRIMER NIVEL.	73
FIGURA 28 PLANO DE LA RECEPCIÓN DE LA BIBLIOTECA.	74
FIGURA 29 PLANO SALA DE ESTUDIO NO 1.....	74
FIGURA 30 SALA DE COMPUTADORES.....	75

FIGURA 31 ZONA DE ESTAR, SALA DE REUNIONES, SALA DE COMPUTADORES PARA PROFESORES Y FOTOCOPIADORA.....	75
FIGURA 32 ZONAS PARA ALMACENAMIENTO DE LIBROS	76
FIGURA 33 HEMEROTECA Y SALAS DE ESTUDIO.	76
FIGURA 34 AULA MÚLTIPLE (AUDITORIO MENOR).	77
FIGURA 35 PLANO DEL SEGUNDO PISO.	78
FIGURA 36 OFICINAS PARTE NORTE, SEGUNDO NIVEL.	78
FIGURA 37 PARTE SUR DEL SEGUNDO NIVEL.	78
FIGURA 38 PLAZOLETA CENTRA, DEL SEGUNDO NIVEL.....	79
FIGURA 39 TERCER PISO	79
FIGURA 40 CUARTO PISO EDIFICIO J.	80
FIGURA 41 SALÓN DE CLASES TÍPICO.	82
FIGURA 42 COBERTURA RADIAL DEL PARLANTE.....	83
FIGURA 43 DISTRIBUCIÓN DE PARLANTES, CENTRO CON CENTRO.	84
FIGURA 44 EN AZUL: COBERTURA DE LAS ONDAS SONORAS DE LOS PARLANTES DENTRO DEL RECINTO; EN ROJO: COBERTURA VIRTUAL DE LAS ONDAS SONORAS DE LOS PARLANTES NO APROVECHADA POR INTERFERENCIA DE LAS PAREDES.....	84
FIGURA 45 DISTRIBUCIÓN HEXAGONAL DE LOS PARLANTES.	85
FIGURA 46 CONOS DE ONDAS ACÚSTICAS GENERADAS POR LOS PARLANTES EN EL TECHO.	86
FIGURA 47 ONDAS ACÚSTICAS GENERADAS POR PARLANTES EN EL TECHO Y LIMITADAS POR LAS PAREDES.	86
FIGURA 48 DIFERENTES ALINEACIONES DEL ARREGLO CUADRADO DE LOS PARLANTES EN EL TECHO, CON SOLAPAMIENTO MÍNIMO.	88
FIGURA 49 DISTRIBUCIÓN HEXAGONAL, SOLAPAMIENTO MÍNIMO.....	89
FIGURA 50 DISTRIBUCIÓN CUADRADA, BORDE CON BORDE. A LA DISTRIBUCIÓN DE LA DERECHA SE LE AGREGÓ UN PARLANTE MÁS PARA MEJORAR LA UNIFORMIDAD SONORA EN EL CENTRO.....	89
FIGURA 51 DISTRIBUCIÓN HEXAGONAL, BORDE CON BORDE.	90
FIGURA 52 DISTANCIA DEL PARLANTE AL OYENTE MÁS ALEJADO CON SU RESPECTIVA GEOMETRÍA.....	91
FIGURA 53 VOLTAJE EN BORNES DE TRANSFORMADOR.	93
FIGURA 54 A. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA. B. DIAGRAMA PARA ACOPLE DE IMPEDANCIA.	94
FIGURA 55 ESQUEMA ELÉCTRICO DEL EJERCICIO	97
FIGURA 56 EFICIENCIA EQUIVALENTE DE UNA RED EN CASCADA.....	97
FIGURA 57 DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE CUADRADO.....	106
FIGURA 58 DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE, GEOMETRÍA HEXAGONAL.	107

FIGURA 59 DISTRIBUCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES, Y CONEXIÓN DE LOS ALTAVOCES.	109
FIGURA 60 SALA DE ESTUDIO NO.1	112
FIGURA 61 DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE, ARREGLO CUADRADO.....	114
FIGURA 62 DISTRIBUCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES, CONEXIÓN DE LOS ALTAVOCES CON IMPEDANCIA DE 8 OHMIOS. SALA DE ESTUDIO NO.1	115
FIGURA 63 SALA DE COMPUTADORES NO.1	118
FIGURA 64 DISTRIBUCIÓN DE CÉLULAS CENTRO CON CENTRO CON GEOMETRÍA CUADRADA APLICADA A LA SALA DE COMPUTADORES 1.	120
FIGURA 65 DIAGRAMA ELÉCTRICO PARA LA SALA DE COMPUTADORES 1	122
FIGURA 66 SALA DE ESTUDIO NO. 2	124
FIGURA 67 SOLAPAMIENTO MÍNIMO Y GEOMETRÍA HEXAGONAL.SALA DE ESTUDIO N° 2 .	125
FIGURA 68 SALA DE ESTUDIO NO.3	128
FIGURA 69 DISTRIBUCIÓN CENTRO CON CENTRO, GEOMÉTRICA CUADRADA	129
FIGURA 70 HEMEROTECA.....	132
FIGURA 71 DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE, ARREGLO CUADRADO. ZONA CENTRAL ..	136
FIGURA 72 ZONA DE ESTAR Y ESCALERAS	141
FIGURA 73 ÁREA DEL PISO DE LA ZONA DE ESTAR DE LA BIBLIOTECA.	141
FIGURA 74 ÁREA DEL CONO ACÚSTICO	143
FIGURA 75 RADIO DE CUBRIMIENTO SOBRE LA ZONA.....	143
FIGURA 76 PARLANTES DIRECTIVOS	144
FIGURA 77 DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE HEXAGONAL. ZONA DE ESTAR Y ESCALERAS	145
FIGURA 78 SALA DE PROFESORES	148
FIGURA 79 SALA DE PROFESORES CON DISTRIBUCIÓN BORDE CON BORDE, GEOMETRÍA CUADRADA.....	149
FIGURA 80 FOTOCOPIADORA	151
FIGURA 81 FOTOCOPIADORA. BORDE CON BORDE, ARREGLO CUADRADO	152
FIGURA 82 SALA DE REUNIONES	155
FIGURA 83 SALA DE REUNIONES 1 Y 2. BORDE CON BORDE, ARREGLO CUADRADO	157
FIGURA 84 RECEPCIÓN SEGUNDO PISO	159
FIGURA 85 RECEPCIÓN. SOLAPAMIENTO MÍNIMO, GEOMETRÍA HEXAGONAL.....	161
FIGURA 86 OFICINA DE COMUNICACIONES Y RELACIONES PÚBLICAS.....	162
FIGURA 87 OFICINA DE COMUNICACIONES Y RELACIONES PÚBLICAS. BORDE CON BORDE, GEOMETRÍA CUADRADA	164
FIGURA 88 ZONA DE ESTAR	166
FIGURA 89 ZONA DE ESTAR. BORDE CON BORDE, GEOMETRÍA CUADRADA.	167
FIGURA 90 PROMOCIÓN ACADÉMICA	171

FIGURA 91 PROMOCIÓN ACADÉMICA. SOLAPAMIENTO MÍNIMO, GEOMETRÍA HEXAGONAL.	172
FIGURA 92 LIQUIDACIONES.....	175
FIGURA 93 LIQUIDACIONES. BORDE CON BORDE, GEOMETRÍA CUADRADA.	176
FIGURA 94 SALA DE CAPACITACIONES DE NTIC'S	179
FIGURA 95 SALA DE CAPACITACIONES DE NTIC'S. BORDE CON BORDE, GEOMETRÍA CUADRADA.....	181
FIGURA 96 NUEVAS TECNOLOGÍAS, ICETEX, DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA.....	183
FIGURA 97 NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	184
FIGURA 98 NUEVAS TECNOLOGÍAS. SOLAPAMIENTO MÍNIMO, GEOMETRÍA HEXAGONAL..	186
FIGURA 99 SUPERFICIE ACÚSTICA EFECTIVA SA OCUPADA POR LAS SILLAS, CALCULADA A PARTIR DE LA SUPERFICIE REAL s_s Y DE LA BANDA PERIMETRAL DE ANCHURA 0,5M	192
FIGURA 100 CÁMARA REVERBERANTE.....	194
FIGURA 101 ATENUACIÓN DEL SONIDO EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE.	195
FIGURA 102 REPRESENTACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES ABSORBENTES.	196
FIGURA 103 MATERIAL ABSORBENTE HECHO CON ESPUMA DE POLIURETANO.....	197
FIGURA 104 VISTA SUPERIOR DE LA SALA DE PROFESORES, CON LA NUMERACIÓN DE SUS PAREDES	202
FIGURA 105 VISTA FRONTAL DE LA PARED N°1.....	203
FIGURA 106 VISTA FRONTAL PARED N°2.....	203
FIGURA 107 CARA OPUESTA DE LA PARED DE ACCESO.	204
FIGURA 108 VISTA DE LA PARED 4	204
FIGURA 109 ESPACIO TRATADO CON LA REPRESENTACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS DIRECTAS	208
FIGURA 110 ALTAVOZ JBL PROFESIONAL 8138 DE TECHO.....	212
FIGURA 111 AMPLIFICADOR AT 300 USB	214

GLOSARIO

ACÚSTICA: 1. Rama de la física que se ocupa del estudio de las propiedades del sonido. 2. Condición sonora de un recinto.

SONORIZAR: Se refiere a la acción de reproducir un sonido artificial, en una zona denominada área de audiencia, ya sea interior o exterior. Existen dos tipos de sonorización: el refuerzo sonoro y la megafonía.

REFUERZO SONORO: Se conoce como refuerzo sonoro al uso de sistemas electrónicos para realizar una amplificación de sonido en vivo, con el objeto de poder ser percibido por una mayor cantidad de oyentes. Estos sistemas varían desde el discurso de un orador hasta un concierto masivo. El objetivo principal de un refuerzo sonoro es la reproducción del sonido de alta calidad, teniendo en cuenta un nivel de presión sonora correcto, una buena direccionalidad y un excelente nivel de inteligibilidad.

MEGAFONÍA: La megafonía tiene como objetivos primordiales la inteligibilidad y la distribución uniforme. En otras palabras, la megafonía no fija su atención en la calidad del sonido sino en la emisión de las frecuencias de sonido suficientes para lograr una inteligibilidad correcta. Los sistemas de megafonía se conocen popularmente como sistemas de autoparlante o sistemas de perifoneo, los cuales brindan el servicio de mensajes de difusión general y música ambiental, ya sea en exteriores o en interiores. Se pueden presentar problemas cuando el ambiente presenta demasiada reverberación, provocando un enmascaramiento de las frecuencias medias y baja inteligibilidad.

CÁMARA ANECÓICA: Habitación cuyas superficies están cubiertas de materiales absorbentes para evitar reflexiones.

CARGA: Resistencia que ha de vencer un dispositivo. En audio profesional las cargas son mecánicas, eléctricas o acústicas.

CÓNCAVO: Dicho de una superficie curvada, de tal modo que la parte central es más profunda, formando una cavidad.

dB SPL: Medida absoluta, en decibelios, de presión sonora referenciada a 20 micro pascales.

dB: Decibelio, décima parte de un belio.

DISTORSIÓN: Alteración en la forma de onda de una señal, lo que produce la adición de nuevas frecuencias a la misma.

EFICIENCIA o SENSIBILIDAD: Relación entre la energía que entra en un dispositivo y la que sale. Normalmente se expresa en porcentaje.

ESPECTRO: Contenido de frecuencias de una señal.

IMPEDANCIA: Oposición a la corriente alterna. Es función de la frecuencia.

INTELIGIBILIDAD: Se refiere a la claridad presente en la señal de audio.

PERTURBACIÓN: Variación de una magnitud física respecto a un determinado valor que se considera estacionario o de equilibrio

PIEZOELÉCTRICO: Material que, al ser sometido a un esfuerzo mecánico, produce una tensión eléctrica.

REVERBERACIÓN: Combinación de reflexiones acústicas que presentan un decaimiento progresivo hasta extinguirse completamente.

REFLEXIÓN: Fenómeno que ocurre cuando una onda sonora incide sobre un obstáculo que no puede traspasar ni rodear.

RUIDO: Señal no deseada en sistemas de audio.

TIMBRE: Conjunto de características que permiten distinguir de otro un sonido con la misma frecuencia y volumen.

TONO: Propiedad de los sonidos que los caracteriza como más graves o más agudos.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE SONORIZACIÓN

AUTORES: CARLOS RUEDA CHÁVEZ
MAURICIO PRADA SÁNCHEZ

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR: RAÚL RESTREPO AGUDELO

RESUMEN

El presente trabajo expone una metodología de diseño para un sistema de sonorización ambiental, aplicada a los espacios del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

El punto de partida es la identificación de los espacios y decidir si estos requieren de un sistema de sonorización; en este punto se debe aclarar la función del espacio a tratar. Lo anterior determina el tiempo de reverberación óptimo que debe tener el lugar, por ejemplo: Se quiere transmitir sonido ambiental, para lo cual 1.5 S de tiempo de reverberación máximo es acertado; en caso de que el espacio supere este valor, necesitará acondicionamiento acústico.

Luego, se determina el tipo de distribución de parlantes y se calcula la cantidad de estos dentro del espacio a tratar. Este aspecto depende de la variación de la presión sonora deseada.

Por último se hace un análisis de la potencia eléctrica requerida por los altavoces, que depende de la sensibilidad de estos y de la ubicación de los posibles oyentes; también se tienen en cuenta las pérdidas en los transformadores y el correcto acople de impedancias.

PALABRAS CLAVE: acondicionamiento acústico, altavoz, potencia eléctrica, presión sonora, sonorización ambiental, tiempo de reverberación.

ABSTRACT OF THESIS PROYECT

TITLE: APPLICATION OF A METHODOLOGY FOR DESIGNING A SOUND SYSTEM

AUTORS: CARLOS RUEDA CHÁVEZ
MAURICIO PRADA SÁNCHEZ

SCHOOL: ELECTRONIC ENGINEERING

DIRECTOR: RAÚL RESTREPO AGUDELO

ABSTRACT

The present paper exposes a methodology of design for an Ambience Sound System applied to the spaces of the Building J of the Pontifical Bolivarian University.

The starting point is the identification of the spaces and deciding if they require a sound system, at this point the function of the space that is going to be treated should be cleared. The previous procedure determines the optimum time of reverberation that the place should have, for example: If it's required to stream ambient sound, a maximum of 1.5 S of reverberation is adequate for this particular case; if the space exceeds this value, it will require acoustical conditioning.

Then, the type of speaker distribution is determined and the quantity of them is calculated within the space that is going to be treated. This aspect depends on the variation of the desired acoustic pressure.

Finally an analysis of the required power for the speakers is performed; it depends on the sensitivity of them and on the location of the possible audition; also the losses in the transformers and the correct fitting of impedances are taken into account.

KEY WORDS: acoustic conditioning, speaker, electric power, sound pressure, sound environmental reverberation time.

INTRODUCCIÓN.

Con este trabajo se expone una metodología para el diseño de sonorización aplicado a un espacio bien conocido por la comunidad Bolivariana, el edificio J de la Universidad. Regionalmente el diseño de sistemas de sonorización está relegado a un segundo plano ya que las universidades locales no cuentan con programas enfocados hacia el estudio acústico en recintos; es esta la razón del porqué del desarrollo de esta metodología.

En la primera parte del documento se exponen los conceptos asociados al sonido y sus propiedades, luego se tratan las propiedades del sonido al incidir sobre cierto tipo de materiales y cómo estos absorben o repelen la energía de las ondas acústicas.

En este apartado también se plantea la forma adecuada en que el mensaje sonoro debe ser transmitido para que sea entendido por los oyentes. Se establece también la relación entre el decaimiento de la energía de las ondas sonoras en un recinto y la afectación de la calidad mensaje sonoro percibido por los oyentes. Más adelante se habla sobre los instrumentos de medida de nivel de presión sonora y su configuración.

Hacia el final se explica la potencia eléctrica, la forma en que las ondas sonoras cubren los espacios, la manera adecuada de distribuir los parlantes y cómo adaptar las impedancias de los equipos para reducir pérdidas de potencia. Todo lo anterior enfocado hacia el estudio y desarrollo del sistema de sonorización, aplicado a los espacios dentro del edificio en cuestión.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Exponer detalladamente la metodología para el diseño de ambientes sonoros y los parámetros acústicos más relevantes para este propósito.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Exponer la metodología a seguir para determinar los siguientes parámetros:

- Coeficiente de absorción.
- Tiempo de reverberación.
- Relación señal a ruido.
- Criterio para selección de altavoces.
- Ubicación y distribución de los parlantes.
- Relación entre potencia eléctrica y presión sonora.
- Distribución de las impedancias para máximo aprovechamiento de la potencia.

Determinar cuáles son los espacios del edificio J que necesitan de la sonorización, sin interferir con otros sectores.

Aplicar los métodos expuestos para el estudio del sistema de megafonía, además de determinar la viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema en el edificio J de la UPB.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El diseño de los sistemas de sonorización de edificios involucra diferentes tipos de análisis que conducen a la optimización de los equipos y sistemas a instalar. La metodología a seguir en estos casos suele estudiarse en las facultades de ingeniería de audio o en asignaturas optativas de ciertas facultades de ingeniería electrónica, pero este no es el caso de nuestra facultad.

Actualmente, la Universidad tiene una planta física de dimensiones considerables y en constante crecimiento. A pesar de esto, sus instalaciones no cuentan con un sistema de perifoneo que propague la información sonora en su campus.

Por estas razones, en este proyecto se presentará y aplicará un estudio que servirá de referencia para el análisis, diseño y aplicabilidad de un sistema de perifoneo, dejando a la Escuela de Ingeniería Electrónica la puerta abierta para futuros proyectos enfocados hacia esta parte.

Con el crecimiento acelerado de la ciudad, donde nuevos centros comerciales y sistemas de urbanización surgen, se observa la necesidad de los ejecutores de obra, de implementar sistemas de sonorización para aumentar el confort de los usuarios. Es en este aspecto donde el trabajo expuesto saca provecho, pues se enfoca hacia el diseño, consecución y montaje de productos localmente asequibles.

ANTECEDENTES

Por medio de proyectos de grado, la Universidad ha incursionado en el ámbito a pequeña escala de los sistemas de sonorización; un ejemplo de ello es el desarrollo de un Módulo didáctico de sonorización de los estudiantes Carlos Javier Gómez Suárez y Manuel Alejandro Martínez Cañas. También se han desarrollado diversos proyectos de amplificadores y mezcladores sonoros como, por ejemplo, un Audiómetro de tonos puros tipo 5, hecho por Alexander Hernández Osorio. Sin embargo, el estudio a gran escala que se propone, sería el primero en su tipo por parte de la Universidad, con lo cual, vágase la mención, se marcaría una pauta a seguir a futuros proyectos enfocados hacia la ingeniería de sonido.

CAPÍTULO 1 CONSIDERACIONES GENERALES DE LAS ONDAS SONORAS Y LOS PARÁMETROS ACUSTICOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de un sistema de megafonía o sonorización, se hace referencia a la reproducción artificial de un sonido en la zona en donde se encuentra el público (zona de audiencia); tal sistema suele utilizarse para reforzar la onda de sonido directa y distribuirla de tal forma que logre un cubrimiento uniforme de la zona a tratar. Para esta labor se necesita tener un conocimiento detallado de las ondas sonoras y su interacción con los espacios donde se desenvuelve. Teniendo en cuenta esto, el estudio de diseño empieza con las consideraciones generales del sonido, sus propiedades y la forma como éstas interactúan con el medio físico donde se desenvuelve el ser humano.

1.2 Definición del sonido

Para el propósito de este proyecto se va a definir el sonido como la fluctuación o variación de la presión de aire (producida por ondas) que es capaz de producir sensación auditiva. El rango en frecuencia audible para efectos prácticos es normalmente tomado desde 20 Hz hasta 20000 Hz.¹

1.3 Intensidad subjetiva

El oído no tiene la misma sensibilidad para sonidos de distinta frecuencia, es decir, que, cuando un sonido de intensidad determinada cambia de frecuencia, produce en nuestro oído la impresión de un cambio de intensidad, aunque en realidad no haya cambiado la energía acústica.

Si se comparan dos sonidos de la misma frecuencia y se considera como intensidad cero la correspondiente a uno de los sonidos de energía acústica, W_1 , la otra energía (W_2) producirá en el oído una impresión subjetiva que estará sobre la primera N decibelios, según la ecuación:

$$N_{Db} = 10 \log \frac{W_2}{W_1}$$

¹ CARRIÓN ISBERT Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 1998; 27 p.

Pero si los sonidos son de frecuencia distinta, se vería que dos sonidos del mismo nivel producen intensidades subjetivas diferentes.²

1.4 Tono

Es la cualidad de los sonidos que permite distinguir entre los sonidos agudos y graves. El tono de un sonido queda determinado por su frecuencia, o por la frecuencia del sonido fundamental en el caso de que no sea un tono puro.

Por todo ello, aunque al estudiar físicamente el sonido se tiene en cuenta la frecuencia absoluta, al hablar de sensaciones y, sobre todo, en lo que respecta a la música, se habla de intervalo, es decir, de relaciones entre frecuencias, lo cual da lugar a las escalas musicales.

1.5 Clasificación de los sonidos

Los sonidos se clasifican en dos clases: deterministas y aleatorios. Los primeros se pueden modelar mediante una ecuación matemática que indica cómo varía la presión sonora a través del tiempo. Por otra parte, los sonidos de naturaleza aleatoria son vibraciones de la presión de aire en forma irregular que no se repiten y que solo se puede describir aproximadamente por medio de parámetros estadísticos.

A continuación se exponen los sonidos más representativos de cada grupo:

1.5.1 Sonido periódico simple:

Llamado también tono puro, es el sonido más predecible encontrado en la naturaleza. Se compone de una sola frecuencia (f_0) constante, por lo que en su espectro de frecuencia aparece una sola línea (Figura1).

² RUIZ VASSALLO Francisco. Diseño y fabricación de bafles. Creaciones copyright 2007; 21 p.

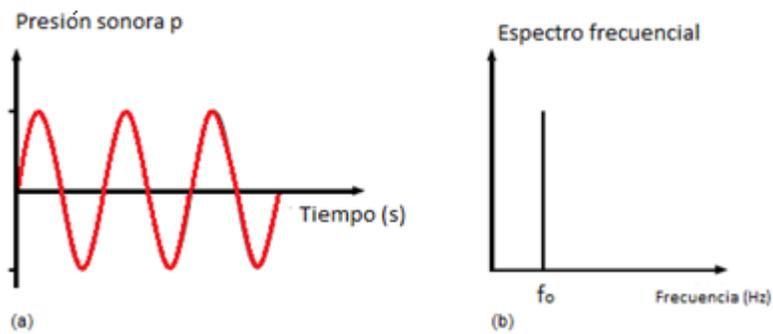


Figura 1: Representación de un tono puro (a) y su espectro (b).

1.5.2 Sonido periódico complejo

Este tipo de sonido tiene una frecuencia fundamental y un número finito o infinito de frecuencias múltiplos de esta, denominadas armónicos. El sonido producido por la mayoría de instrumentos musicales es de este tipo.

Este sonido se muestra la Figura 2, y allí se puede observar la frecuencia fundamental del sonido periódico complejo y su tercer armónico.³

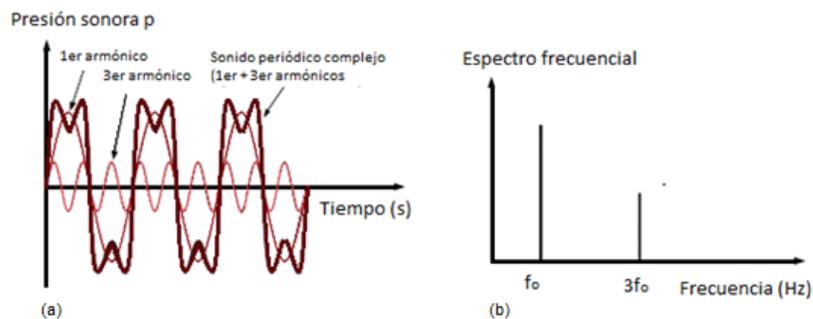


Figura 2: Sonido periódico complejo (a) y su espectro (b).

³ CARRIÓN ISBERT Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 1998; P.30.

1.5.3 Sonido transitorio:

Es resultando de la liberación de energía bajo la forma, por ejemplo, impactos o explosiones. Este tipo de sonidos aparecen de manera repentina y tienen poca duración. A diferencia de los sonidos periódicos, los sonidos transitorios tienen un gran número de componentes frecuenciales que no guardan una relación armónica entre sí. Una palmada constituye un ejemplo de este tipo de sonidos.

En la figura 3 se representa un sonido transitorio denominado pulso rectangular, con su espectro frecuencia.

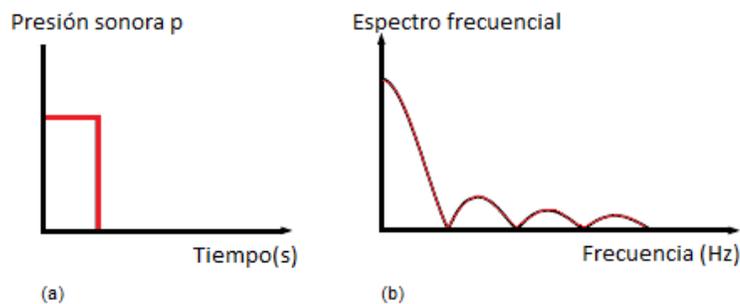


Figura 3 Pulso rectangular (a) y su espectro en frecuencia (b).

1.6 Velocidad de propagación del sonido

La velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 344 metros por segundo. A temperaturas altas la velocidad del sonido se incrementa levemente, mientras que a temperaturas bajas la velocidad del sonido disminuye.

La velocidad del sonido es función de la densidad y elasticidad del medio en el que se propaga. Debido a que el medio es generalmente el aire y a que estas magnitudes (densidad y elasticidad) dependen de la presión atmosférica P_0 y de la temperatura, la velocidad del sonido cambia conforme cambian estas magnitudes.

Algo a tener en cuenta es que la velocidad del sonido es independiente a la intensidad de la perturbación de la presión sonora.

1.7 Longitud de onda y periodo del sonido (λ)

La longitud de onda (a menudo representada por la letra griega λ – lambda -), es la distancia física en un medio entre el comienzo y el final de un ciclo. La longitud física de una onda puede ser calculada como:

$$\lambda = V / f$$

Donde λ es la longitud de onda en el medio, V es la velocidad, y f es la frecuencia (en Hertz).

El tiempo que tarda en completarse un ciclo se llama período. El período de la onda se expresa con el símbolo T :

$$T = 1 / f$$

por lo que T representará el número de segundos por cada ciclo.

A partir de esta ecuación, se puede ver que cada vez que la frecuencia aumenta, la longitud de onda disminuye.

1.8 Difracción de las ondas sonoras

En la figura 4 se ha dibujado un comportamiento típico de las ondas, en este caso el haz sonoro: La onda de sonido producida por el diapasón y que pasa a través del agujero no avanza en línea recta sino que se dispersa en todas las direcciones. Este efecto se conoce como *difracción* y se explica mediante el principio de Huygens.

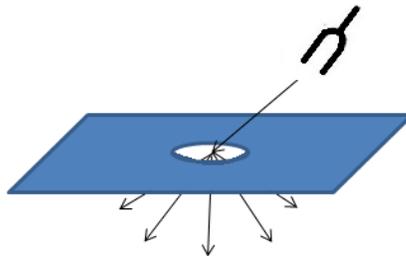


Figura 4 Dispersión del haz sonoro producido por un diapasón al pasar por un agujero.

Cuando una onda sonora pasa por una rendija o un agujero, todos sus puntos son afectados por la perturbación sonora y se convierten a su vez en centros de emisiones de ondas esféricas.⁴

1.9 Reflexión del sonido

Al igual que las ondas de luz, el sonido se refleja en las superficies en un ángulo que es igual a (y en una dirección opuesta a) el ángulo inicial de incidencia. Esta propiedad básica es uno de los pilares del estudio de la acústica. Por ejemplo, la figura 5a muestra cómo una onda sonora se refleja en una superficie dura y lisa de una manera simple y directa (en un ángulo igual y opuesto). La figura 5b muestra cómo en una superficie convexa se reproducirá el sonido hacia el exterior de su superficie, que irradia el sonido hacia afuera en un patrón de dispersión. En la figura 5c, una superficie cóncava se utiliza para enfocar el sonido hacia el interior de un solo punto, mientras que en una esquina a 90° se reflejan los patrones en ángulos iguales a su dirección incidente, como se muestra en la Figura 5d. Esto es válido tanto para en las esquinas de 90° como en las intersecciones donde la pared y el piso se encuentran. Estas reflexiones en las esquinas ayudan a proporcionar una visión de cómo los niveles de volumen a menudo se acumulan en las esquinas de una habitación (sobre todo en las intersecciones de pared a piso).

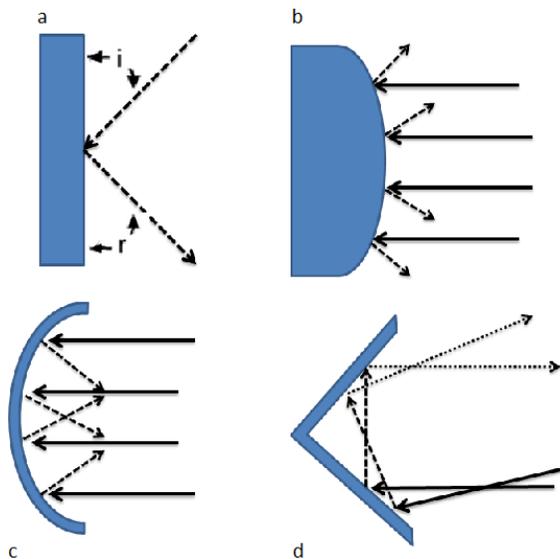


Figura 5. (a) Superficie plana; (b) superficie convexa; (c) superficie cóncava; (d) reflexión en esquina de 90° .

⁴ RUIZ VASSALLO Francisco. Diseño y fabricación de baffles. Creaciones copyright 2007; 26 p.

El comportamiento mostrado anteriormente puede ser explicado a través de las leyes de reflexión, las cuales afirman:

- a) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- b) El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal al punto de incidencia están en un mismo plano.
- c) Cuando el rayo incide perpendicularmente a la superficie, el rayo reflejado también es perpendicular a dicha superficie.⁵

Un fenómeno que demuestra la reflexión de las ondas sonoras es el eco. Cuando una onda sonora es producida por un observador, y esta onda sonora llega a una pared situada a por lo menos 16,5 m (dependiendo de factores externos de los cuales la velocidad del sonido es afectada; temperatura, presión atmosférica, etc.), el observador escuchará la última sílaba pronunciada (eco monosílabo). Si la distancia de la pared es de 33 m, el recorrido de la onda será de 33 m de ida y 33 m de vuelta, se podrán escuchar dos sílabas (eco bisílabo). Si existe más de una pared a distancias distintas y de entre 16.5 o más metros de lejanía, se pueden captar diversas reflexiones y se percibe el eco múltiple.

1.10 Absorción del sonido

En los recintos, la reducción de la energía de las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre las superficies, es determinante en la calidad acústica.

Dicha reducción de energía, en orden de importancia descendente, es producida por la absorción de los siguientes elementos:

- El público y las sillas.
- Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto.
- Todas aquellas superficies límite susceptibles de entrar en vibración (puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- El aire.
- Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (como, por ejemplo, el hormigón).⁶

⁵ RUIZ VASSALLO Francisco. Diseño y fabricación de bafles. Creaciones copyright 2007; 27 y 28 p.

1.11 Coeficiente de absorción (α).

Se describe como el cociente entre la energía absorbida por una superficie o sustancia y la energía incidente sobre ella.

$$\text{Coeficiente de absorción}(\alpha) = \frac{\text{Energía Absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

Estos valores están comprendidos entre 0, cuando el material es totalmente reflectante, y 1, cuando hay absorción total. Por ejemplo, una superficie con un coeficiente de absorción de 0.3 reflejará el 70% de la energía y absorberá el 30% restante. Si la superficie tiene un coeficiente de absorción de 0.1, absorberá el 10% de la energía y reflejará el 90% que queda. El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

Adicionalmente, el coeficiente de absorción de cada material varía con la frecuencia. Para construir conjuntos de curvas de variación del coeficiente de absorción versus la frecuencia para diversos materiales, suele evaluarse dicho coeficiente a frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000Hz.

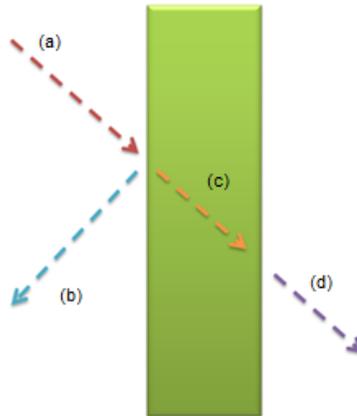


Figura 6. Energía incidente (a); energía reflejada (b); energía absorbida (c); energía transmitida (d).

En un proceso de diseño sonoro es necesario identificar los materiales de las paredes, techos, pisos, así como el mobiliario (sofás, alfombras, cortinas, etc.), con el fin de considerar en el diseño su coeficiente de absorción, ya que cada elemento ofrece diferentes comportamientos frente al sonido. De esta manera, el sonido incidente se descompone en:

$$\text{Sonido incidente} = \text{Sonido reflejado} + \text{Sonido absorbido}$$

⁶ CARRIÓN ISBERT Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 1998; 72 p.

Puede verse, entonces, que el coeficiente de absorción específica cuánta energía se pierde en la transmisión.

1.12 Coeficiente de absorción promedio

Se define como:

$$\text{Coeficiente de absorción promedio (As)} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i * \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

en donde:

S = Superficies internas del local (m²)

α = Coeficiente de absorción de cada material

Cada recinto tiene su propio coeficiente de absorción promedio, dependiendo del tipo de material con el que esté construido y amoblado.

1.13 Tiempo de reverberación.

Una vez conocido el coeficiente de absorción, es necesario conocer el tiempo de reverberación del local, el cual determina cuánto tarda en atenuarse 60dB la energía de una señal sonora en el interior del mismo luego de que la fuente sonora haya cesado su emisión. El tiempo de reverberación depende de la reflexión de la onda que incide sobre las paredes, techos y suelos del recinto. El conjunto de dichas reflexiones constituye lo que se denomina campo reverberante.

Aunque existe un acuerdo general entre los expertos en acústica respecto a que el tiempo de reverberación ya no se considera el parámetro más importante en el estudio acústico en salas y auditorios, sigue estimándose como uno de criterios importantes de la calidad acústica de dichos recintos.⁷

⁷ BALLOU Glen. Handbook for sound engineers. SAMS 1991. 105p.

1.14 Cálculo del tiempo de reverberación

Para calcular el tiempo de reverberación (RT) se utiliza la fórmula de Sabine. La expresión matemática de esta fórmula, despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es:

$$\text{Tiempo de reverberación}(TR_{60}) = \frac{0.161 * V}{S * \bar{a}_s} [s]$$

en donde:

$V = \text{Volumen del local en } m^3$

$S = \text{Área del local en } m^2(\text{suelo})$

$\bar{a}_s = \text{Coeficiente de absorción promedio}$

Esta fórmula se utiliza generalmente para zonas en donde la reverberación no es un problema predominante.

Según se observa, el RT calculado mediante dicha fórmula no tiene en cuenta la ubicación del receptor, es decir, es único para cada recinto. Ello es consecuencia de que la misma surge de la aplicación de la acústica estadística.

Por otra parte, es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se limita al caso de recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso (La energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones).
- Geometría regular de la sala.
- Coeficiente medio de absorción $-\alpha$ inferior a, aproximadamente, 0,4.⁸

⁸ CARRIÓN ISBERT Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC,1998; 64 p.

1.15 Inteligibilidad de la palabra

Para poder entender el significado de Inteligibilidad de la palabra, se debe suponer que se está tratando con un sistema de comunicación que permite un intercambio de información confiable y que no contiene distorsión. Un sistema como este está formado por varios elementos que interactúan entre sí: Emisor (hablante), Mensaje (idea a transmitir), Código (emisiones acústicas correspondientes a la lengua hablada), Canal (medio por el que se transmite el código, como el aire o una línea telefónica), Contexto (serie de elementos subjetivos u objetivos que afectan el proceso de comunicación) y Receptor (el oyente).

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.

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

Como la duración de las vocales es más elevada, el nivel de presión sonora asociado a ellas es, en promedio, unos 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.

El grado de inteligibilidad de la palabra está estrechamente relacionado con la correcta percepción de las altas frecuencias, lo que hace que sean las consonantes las que determinen la comprensión de un mensaje oral. La información contenida en las vocales es, en cambio, menos relevante para la inteligibilidad. En la tabla 1 se resumen las características mencionadas.

Tabla 1 Características más relevantes del mensaje oral.

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

Como la caracterización del canal de transmisión emisor/receptor está relacionada con el estudio de las características acústicas del local, la reverberación cobra gran importancia, pues al aumentar provoca una superposición parcial de las palabras, conduciendo a una degradación del código recibido.

La pérdida de articulación de consonantes determina, entonces, la inteligibilidad de un mensaje, y se mide mediante el coeficiente %ALcons (Articulation Lost Consonants), del cual se hablará con detalle en el numeral 1.16. Según se muestra en la Tabla 2, los valores más bajos del coeficiente %ALcons están asociados con una mayor inteligibilidad, siendo el 10% el máximo valor permitido para aplicaciones típicas.

Tabla 2 Medición de la inteligibilidad de la palabra.

% ALcons	INTELIGIBILIDAD
< 10 %	Excelente
10-15%	Buena
>15 %	Mala

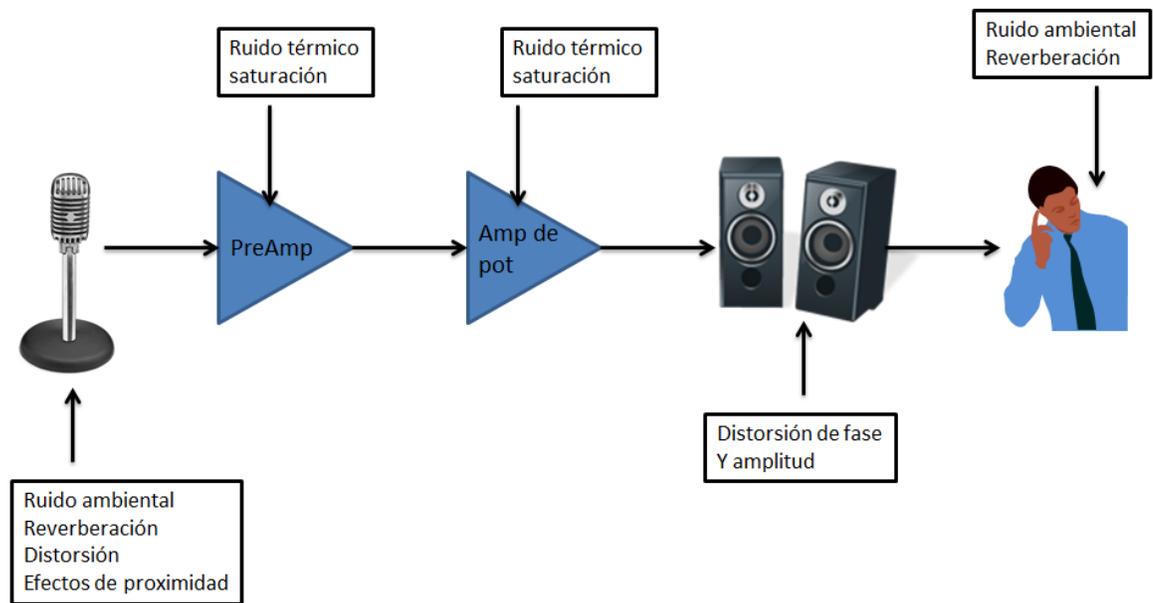


Figura 7: Factores que afectan la inteligibilidad de la palabra en sistemas de sonido.

En la figura 7 se observan los principales factores que afectan la inteligibilidad; también se indican varios factores acústicos, electromecánicos y electrónicos que se deben considerar.

Además de los anteriores, otros factores que afectan la inteligibilidad son:

- Un tiempo de reverberación alto, mayor a 2 segundos.
- Que el emisor se encuentre muy alejado del parlante, haciendo que se oiga un mayor porcentaje de sonido reverberante.
- Reflexiones en objetos próximos al parlante (hasta 1m).
- Reflexiones de gran energía que lleguen con un retraso de más de 50m respecto al sonido incidente, esto se considera “eco”.

1. 16 Cálculo de la inteligibilidad de la palabra: %ALCons

En los años 70, el investigador holandés V.M.A. Peutz llevó a cabo un trabajo a partir del cual estableció una fórmula para el cálculo de la inteligibilidad de la palabra.

El trabajo consistió en realizar una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basadas en la emisión de “logatomos” (palabras sin significado formadas por: consonante-vocal-consonante). Los individuos receptores tomaban nota de lo

que escuchaban y luego se analizaba la información recogida y se establecía una estadística de los resultados obtenidos. Si, por ejemplo, el porcentaje medio de logatomos detectados correctamente en uno de los recintos era de un 75%, entonces se consideraba que la pérdida de información era de un 25%. Como dicha pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, Peutz la denominó: % de Pérdida de Articulación de Consonantes, o lo que es lo mismo, %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”). En el ejemplo anterior, se tendría un %ALCons de un 25%. Basta decir que, al tratarse de un parámetro indicativo de una pérdida, cuanto menor sea, mejor será el grado de inteligibilidad en el recinto.

Usando la teoría acústica estadística, Peutz dedujo que el valor de %ALCons en un punto dado se podía determinar a partir del conocimiento del tiempo de reverberación y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo LD y de campo reverberante LR en dicho punto.

La ley en cuestión, expresada de forma gráfica, se presenta en la figura 8. El valor de %ALCons (eje de ordenadas izquierdo) se determina a partir de los valores de RT (eje de ordenadas derecho) y de la diferencia LD-LR (eje de abscisas).

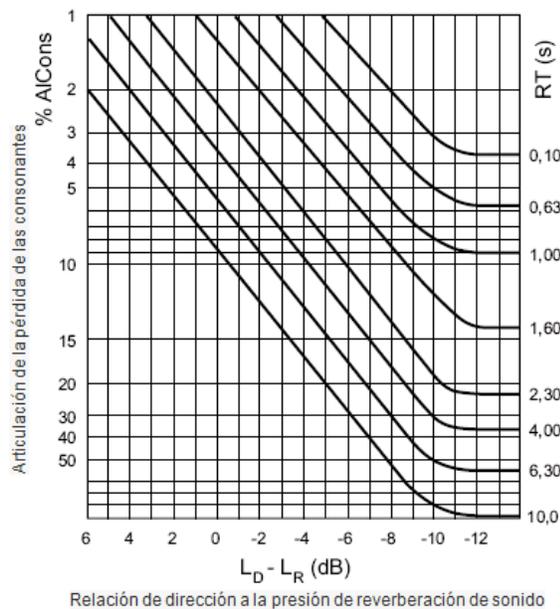


Figura 8 Obtención del %ALCons a partir de RT y de LD –LR.

Para el cálculo de LD-LR, la fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{QR}{r^2} \right) - 17 \text{ (en dB)}$$

en donde:

Log = logaritmo decimal

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)

R = constante de la sala (en m²)

r = distancia del punto considerado a la fuente sonora (en m)

Por consiguiente, tanto RT como R dependen del coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$. Su conocimiento, junto con el del volumen V y el de la superficie total St permiten calcular los valores de RT y de LD-LR.

A nivel práctico, se suele elegir para el cálculo el valor de $\bar{\alpha}$ correspondiente a la banda de 2 kHz, por ser la de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

De la observación de la figura anterior se desprende lo siguiente:

- Cuanto más cerca esté situado el receptor de la fuente sonora (LD-LR mayor), menor será el valor de %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- Cuanto menor sea el RT, igualmente menor será el %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia: $r = 3,16 D_c$. Para distancias $r > 3,16 D_c$, equivalentes a $(LD - LR) < 10$ dB, el valor de %ALCons tiende a ser constante. Ello significa que, a partir de dicha distancia, la inteligibilidad de la palabra ya no empeora.⁹

A partir de lo anterior, para disminuir el valor de %ALC cuando este valor es alto (en la práctica se considera que el límite para este es de 15%), se pueden seguir las siguientes recomendaciones:

- Diseñar el sistema de megafonía en los recintos de tal manera que supere en 10 a 25 dB del nivel sonoro del ruido ambiente.

⁹ Ibíd., p. 67

- Cuando el tiempo de reverberación sea muy grande, habrá que utilizar bocinas con una directividad (Q) alta, concentrando el haz sonoro sobre la audiencia y manteniendo la distancia de la audiencia y las bocinas lo más corta posible.
- Cuando se instalen dos o más parlantes juntos, sus centros acústicos deben quedar alineados, es decir, a la misma distancia del área de escucha.
- Evitar en lo posible que el haz sonoro de los altavoces choquen con paredes o comunas cercanas. Evitando reflexión excesiva o ecos que afecten la inteligibilidad de la palabra.

1.17 Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra.¹⁰

En los mensajes orales las duraciones de las vocales y sus niveles de presión sonora son mayores que los de las consonantes. Además, las vocales tienen más armónicos en bajas frecuencias, en contraste con las vocales que tienen mayor contenido en altas frecuencias.

En un recinto con un tiempo de reverberación considerable, el decaimiento energético de una vocal emitida es apreciablemente más lento que el decaimiento 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 una consonante emitida inmediatamente después, según se observa en la figura 9.

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).

¹⁰ LUNA Erik. Tesis: Acondicionamiento acústico de un salón para eventos sociales. Instituto Politécnico Nacional. 2012. 16 p.

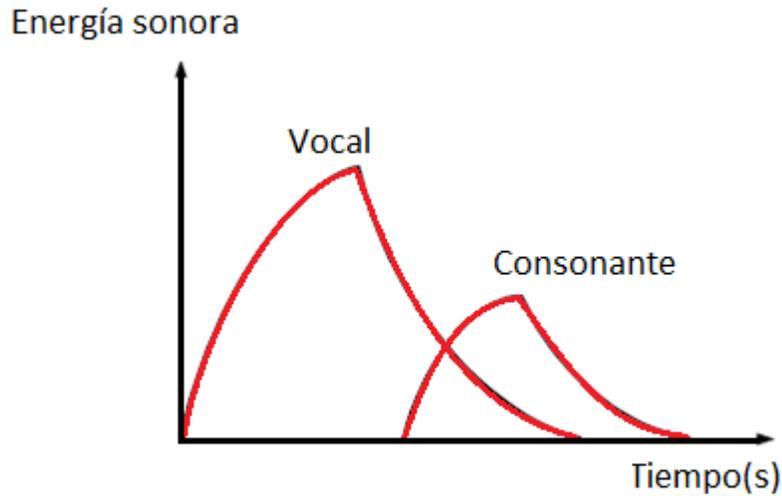


Figura 9 Relación inteligibilidad de palabra con tiempo de reverberación.

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

1.18 Nivel de presión sonora (**SPL** o $L_{p(a)}$)

El nivel de presión sonora (o SPL) se utiliza para expresar el nivel de intensidad de un sonido en decibeles (dB). El SPL se mide utilizando un instrumento conocido como sonómetro.

Tomando como referencia el umbral de audición del ser humano, que por convención se estima que equivale a un sonido con una presión de 20 micropascales, se establece el nivel mínimo correspondiente a 0 dB. Con base en esta referencia, el SPL se determina mediante la fórmula:

$$L_{p(a)}(dB) = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

P : presión sonora en $\frac{N}{m^2}$ ó pascal.

P_{ref} : presión de referencia $2 \times 10^{-5} \frac{N}{m^2}$ ó pascal.

La siguiente lista muestra una relación de diferentes niveles de presión sonora:

Respiración de una persona	10 dB
Estudio de grabación	25 a 35 dB
Dormitorio	35 a 45 dB
Oficina silenciosa	50 a 60 dB
Conversación normal	60 a 70 dB
Ruido en tránsito	75 a 90 dB
Subterráneo	90 a 100 dB
Discoteca	95 a 115 dB
Jet a despegar, a 25 m	130 dB
Umbral de dolor	140 dB

1.19 Relación señal a ruido (S/N)

Es el cociente entre el nivel de la señal y el nivel de ruido (S/N), tomando como ruido cualquier señal no deseada, como podría ser el sonido del ambiente. La relación S/N constituye un parámetro fundamental para determinar las condiciones que aseguren la inteligibilidad de la información sobre el nivel natural o nivel de ruido.

El ruido (el tráfico, el viento, los ruidos de la audiencia, etc.) puede interferir con la capacidad del oyente para escuchar el habla. Idealmente, el sonido de un altavoz debe estar al menos 25 dB por encima del nivel de ruido. En algunas situaciones de alto ruido, una relación S/N de 25 dB puede no ser posible. Sin embargo, 25 dB es una regla común que casi siempre asegura que un oyente puede escuchar y entender el mensaje hablado.¹¹

Si se considera que el nivel de ruido $L_{p(n)}$ establece la cota mínima, un sistema de refuerzo sonoro debe proveer, al menos, un nivel 25dB superior al de ruido ambiente, (relación señal-ruido de 25dB).¹²

$$L_{p(a)} \geq L_{p(n)} + 25dB$$

1.20 Medición del sonido: el sonómetro

Es necesario disponer de un instrumento electrónico que permita medir sonidos bajo unas condiciones prefijadas, de manera que los resultados obtenidos sean

¹¹ BALLOU Glen. Handbook for sound engineers. SAMS 1991. P 1183.

¹² PUEO ORTEGA Basilio y ROMÁ ROMERO Miguel. Electroacústica altavoces y parlantes. Pearson Educación, 2003. 320 p.

confiables y con un nivel de tolerancia aceptable. Para este estudio, se utilizará el sonómetro como instrumento para la medición de la presión sonora. Su unidad de procesamiento permite realizar medidas globales, o bien por bandas de frecuencias, con diferentes respuestas temporales (*FAST*: sonidos cortos 0,2 segundos, *SLOW*: sonidos largos 1,5 segundos, *LOW*: 35 – 100 dB sonidos débiles, *HIGH*: 65 – 130 dB sonidos fuertes).

Por lo general, un sonómetro utiliza dos modos para la medición de presión sonora: La escala lineal, y la red de ponderación A; en la escala lineal el sonómetro no hace ninguna acentuación o atenuación a ninguna banda de frecuencia que conforma el sonido que se está midiendo. En cambio, en la escala de ponderación A las características del sonómetro se aproximan a las del oído humano. Por esto, la escala de ponderación A es la más utilizada, ya que allí el instrumento mide los niveles de presión sonora que soporta el ser humano de una forma objetiva. Para conseguir esto, los sonómetros disponen de determinadas redes de ecualización que hacen que la respuesta en frecuencia del sonómetro sea equivalente o igual a la del oído humano.

CAPÍTULO 2 CONSIDERACIONES GENERALES DE LOS ALTAVOCES

2.1 El Altavoz¹³

El altavoz es un elemento electroacústico que tiene por misión convertir una señal eléctrica que recibe en la entrada y dar una señal acústica en la salida. La señal eléctrica que recibe del amplificador corresponde a una determinada información de audio, representada por una tensión alterna; esta señal provoca una corriente que pasa a través de una bobina, generando en ella un campo magnético alterno. Cuando este campo alterno interactúa con un campo magnético constante producido por un imán permanente, se produce una acción mecánica entre estos elementos. De este modo, la bobina vibra siguiendo las variaciones de la corriente, y hace oscilar una membrana que pone en movimiento el aire circundante; así se crea una variación de presión en el aire que es lo que nuestro oído reconoce como sonido.

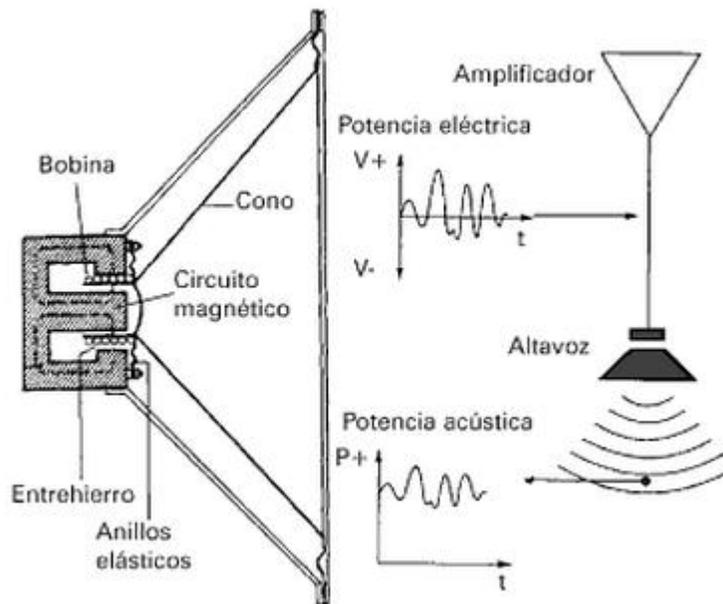


Figura 10 Altavoz. Principio de funcionamiento

¹³ GORMAZ GONZALES, Isidoro. Técnicas y procesos en las Instalaciones Singulares en los Edificios. Paraninfo S.A 2da edición 3era reimpresión 2010. 27 p.

2.2 Sensibilidad

La sensibilidad define el nivel de presión sonora que un altavoz produce a 1 metro de distancia en su eje, cuando se le alimenta con 1W de potencia de audio. A igual distancia, al duplicar la potencia eléctrica, se aumenta la intensidad sonora en 3dB y no el doble como sería de suponer. Manteniendo igual la potencia pero duplicando la distancia, la intensidad disminuye en 6dB (es decir, que para doblar la distancia de audición sin afectar la intensidad, es preciso cuadruplicar la potencia eléctrica).

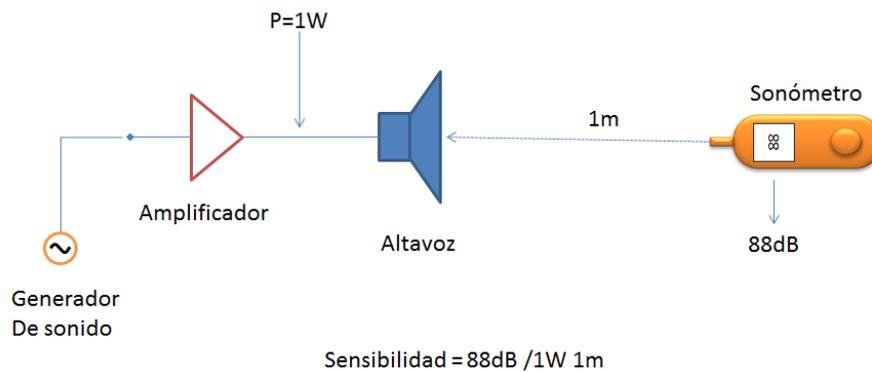


Figura 11 Sensibilidad

2.3 Potencia nominal

Es la máxima potencia aplicable que puede soportar un altavoz de forma continua, en prolongados periodos de tiempo, sin dañarse. Está determinada por la capacidad de evacuación de calor que posea. En los catálogos se indica como potencia nominal que representa el valor que hay que tener en cuenta en los cálculos de las instalaciones.

2.4 Impedancia eléctrica

Los altavoces son los elementos en los que cobra una mayor importancia el conocer su impedancia, dado que deben presentar un valor que esté por encima de la impedancia mínima de carga en la salida del amplificador al cual se conecten. Este valor de impedancia varía con la frecuencia.

2.5 Respuesta en frecuencia

Se denomina así a la gama de frecuencias que un altavoz es capaz de reproducir con un determinado nivel de eficacia y calidad, representando la variación de la presión sonora en dirección axial y en un cierto punto cuando la tensión es constante pero varía la frecuencia.

Es fundamental determinar los límites máximos de pérdida de eficacia, para poder encuadrar dicho altavoz en función de su calidad, así como para delimitar su respuesta en frecuencia. Por ejemplo, si la curva de respuesta en frecuencia de un altavoz muestra un comportamiento plano entre 130Hz y 10Khz, presentando una caída de 3dB en las frecuencias indicadas, se estará ante un altavoz de alta fidelidad (calidad Hi-Fi).

No todos los altavoces mantienen una uniformidad en su rendimiento, sino que lo más habitual es que la curva de respuesta muestre picos y valles a diferentes frecuencias. Cuanto más lineal sea la curva de un altavoz, más natural será el sonido producido, por lo que hay que descartar siempre aquellos altavoces que, dentro de su ancho de banda, presentan mejores respuestas a ciertas frecuencias que en las demás.

2.6 Ángulo de cobertura

El ángulo de cobertura de un altavoz es aquel en el cual el nivel de presión sonora disminuye en 3 dB respecto al presentado en su eje, haciendo las mediciones a un metro del altavoz. Dicho ángulo estará limitado por los puntos donde el altavoz pierde 3 dB tanto a la izquierda como a la derecha de su eje, tal y como se observa en la figura 12. En algunos altavoces hay que distinguir entre el plano horizontal y vertical del eje.

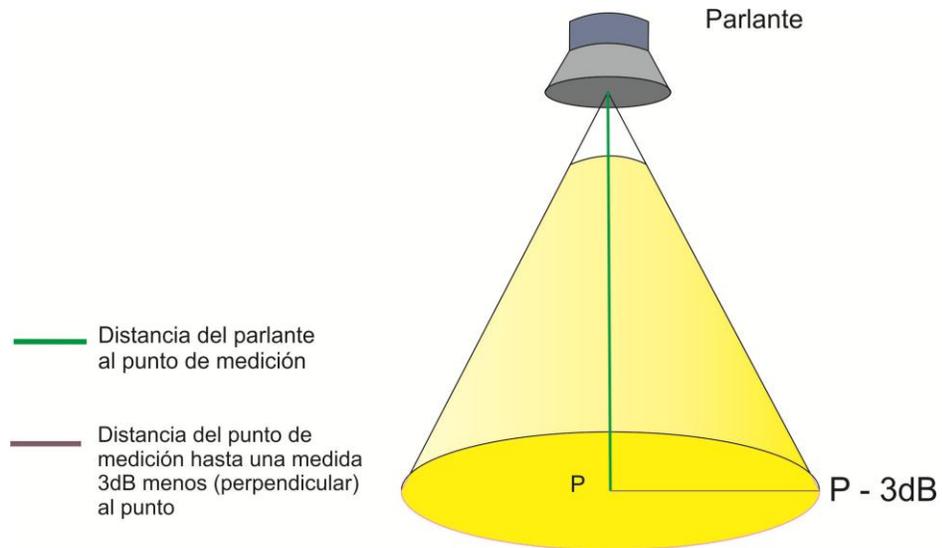


Figura 12 Ángulo de cobertura de un altavoz

2.7 Directividad de un altavoz

El índice de directividad de un altavoz (Q) indica la variación de la respuesta para los diversos puntos de audición alrededor del altavoz. Es un valor que dice cuánto concentra un altavoz la potencia acústica en la dirección útil (dentro de su ángulo de cobertura) evitando radiar potencia en otras direcciones (hacia los lados o hacia atrás).

Los altavoces con un Q elevado permiten concentrar la potencia acústica en la dirección del auditorio y reducen considerablemente la reverberación del recinto al evitar que una parte considerable de la energía se dirija hacia paredes, techos u otras superficies, consiguiendo así una mejor inteligibilidad de la palabra.

2.8 Medida de la Directividad

Para realizar esta medida, el recinto ideal sería en una cámara anecoica. Ya que la Universidad no cuenta aún con una de ellas, se buscó un espacio abierto, para llevar al mínimo las reflexiones; de esta manera, las pruebas se realizaron en la plazoleta del segundo piso del Edificio J. Además, buscando minimizar el ruido externo, las pruebas se llevaron a cabo un sábado en la tarde.

A continuación se registra el nivel de presión sonora (SPL) del ambiente por medio de un sonómetro alrededor del altavoz. La toma de medidas se inicia a una frecuencia de 1KHz, ubicando el sonómetro a una distancia de 1m del eje central del altavoz y moviéndolo de manera circular alrededor del mismo, haciendo toma de medidas cada 30 grados. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 3 Medidas obtenidas para determinar la directividad de un altavoz

SPL ambiente 65dB		
ÁNGULO	PRESIÓN	SPL - PRESIÓN
0	93	28
30	92	27
60	89	24
90	84	19
120	82	17
150	77	12
180	75	10
210	78	13
240	79	14
270	80	15
300	86	21
330	88	23

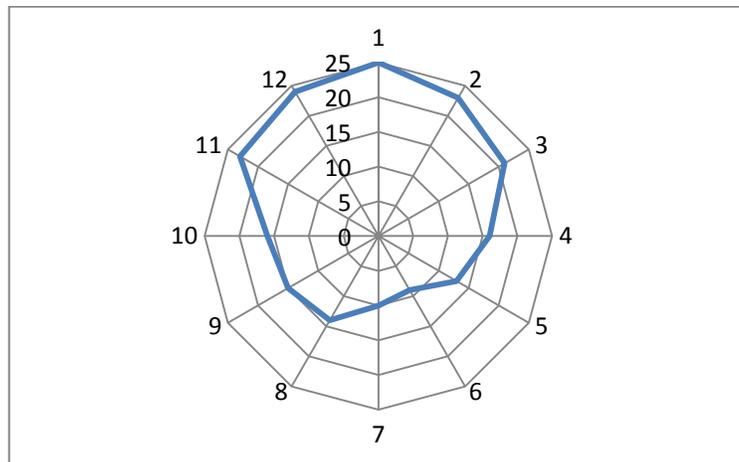


Figura 13 Diagrama polar, directividad de un altavoz

2.9 Potencia eléctrica necesaria por altavoz “EPR”

Es la potencia eléctrica proporcionada a los altavoces para que en la zona de audiencia se obtenga el nivel especificado. En general, al alimentar un altavoz de sensibilidad S_a con una potencia P_E , este produce un nivel de presión en el eje a d_2 metros de

$$Lp(a)(d_2) = S_a + 10 \log P_E - 20 \log d_2$$

De donde es posible despejar la potencia eléctrica para obtener:

$$EPR = 10^{(Lp(a)(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

en donde:

- $L_{p(a)}(d_2)$ es la presión sonora del altavoz sobre el punto (oyente).
- d_2 es la distancia desde el eje central de la fuente al punto (oyente), en metros¹⁴.

2.10 Ubicación de los parlantes

Dependiendo de la ubicación de los parlantes se puede afectar las frecuencias que componen el sonido o este puede verse interrumpido por obstáculos. A continuación se presentan las consideraciones para obtener un sonido de mejor calidad:

- La ubicación de los parlantes en las esquinas refuerzan las frecuencias graves.
- Cuando frente al parlante existe un elemento absorbente o el parlante no está orientado hacia el escucha, las frecuencias medias y altas se aprecian con reducción.
- El haz sonoro debe estar orientado hacia el oyente para que este aprecie mejor el sonido.
- Idealmente se deben colocar los parlantes en el techo; sin embargo, otra buena opción puede ser ubicarlos en las paredes pero corriendo el riesgo

¹⁴ PUEO ORTEGA, Basilio y ROMÁ ROMERO, Miguel. Electroacústica altavoces y parlantes. Pearson Educación, 2003. 325 p

de que un oyente produzca una sombra acústica para otro y afecte la inteligibilidad del sonido al aminorar la intensidad.

- Se debe considerar que, si el sonido es estéreo, los parlantes deben estar, idealmente, a la misma distancia izquierda y derecha de los posibles escuchas.
- Para oyentes en movimiento, la mejor opción es la ubicación de los parlantes en el techo.

2.11 Métodos de recubrimiento¹⁵

El recubrimiento sonoro de un recinto consiste en disponer los altavoces de tal forma que los oyentes perciban el sonido de manera uniforme. Como consecuencia se tomará en cuenta únicamente la onda directa, ya que el campo reverberante solo aumenta el campo total, puesto que no depende de la ubicación de los emisores.

Para esta parte se tendrán en cuenta dos métodos: El método centralizado y el método distribuido.

2.12 Método centralizado

Este método consiste en ubicar y agrupar los altavoces de tal manera que el campo directo cubra el área máxima del recinto con la mayor uniformidad posible, en agrupamientos denominados clústeres.

¹⁵ PUEO ORTEGA, Basilio y ROMÁ ROMERO, Miguel. Electroacústica altavoces y parlantes. 326-332 p.

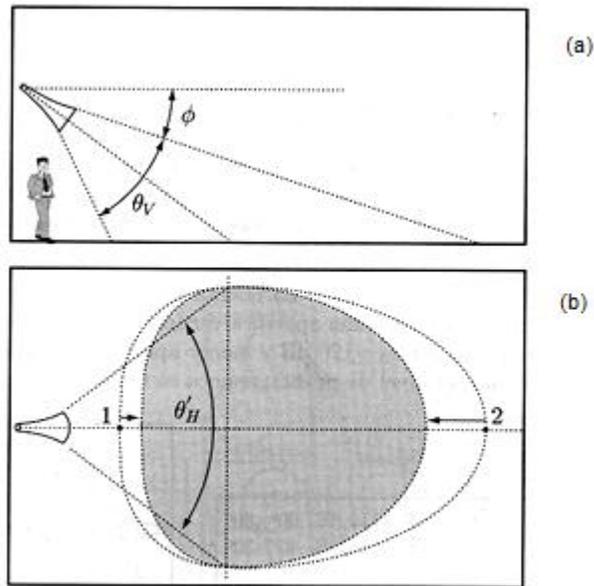


Figura 14 Recubrimiento de un altavoz donde se muestran los ángulos de cobertura horizontal (a) y vertical (b).

Para el caso sencillo de un altavoz se conocen los ángulos de recubrimiento horizontal (θ_v) y vertical (θ_H), con una variación de 6 dB. El movimiento del parlante coincide con el plano vertical y por lo tanto es posible determinar θ_v . Por el contrario, el recubrimiento horizontal varía y se determina con el ángulo θ'_H , que depende de la inclinación ϕ del altavoz.

$$\theta'_H = 2 \arctan \frac{\tan \frac{\theta_H}{2}}{\cos \phi}$$

θ_H no se muestra en el gráfico debido a que es el ángulo de cobertura en el plano horizontal, pero sin inclinación vertical; en cambio θ'_H está influenciado por la inclinación del altavoz. Si la inclinación del altavoz es muy elevada, es decir si ϕ es mínimo, el método es impreciso ya que el nivel no es constante entre los puntos 1 y 2 de la figura 14.

2.13 Aumento del alcance vertical

Cuando se va a sonorizar una zona amplia con el método centralizado, la zona cercana a los mismos no queda lo suficientemente sonorizada porque el altavoz está orientado hacia el final de la audiencia. Si, por el contrario, se orienta el altavoz a la primera zona, la zona final no queda con suficiente refuerzo sonoro. La solución es utilizar dos altavoces, uno para cubrir la zona cercana a él y otro para la zona que está más lejos; el altavoz más disperso y con menos nivel de presión sonora se dirige a la zona más cercana (que necesita menos refuerzo), y el altavoz más sensible y más directivo se dirige a la zona más lejana.

2.14 Aumento del alcance horizontal

Un solo altavoz no puede cubrir un área mayor que la que indica su apertura horizontal θ_H . Para aumentar este alcance, se separan dos altavoces la distancia necesaria para hacer coincidir los ángulos de cobertura horizontal aparente θ_H en la zona de audición.

CAPÍTULO 3 DISTRIBUCIÓN DE LOS ALTAVOCES

3.1 Método distribuido

Consiste en distribuir los parlantes en diferentes puntos del espacio que va a sonorizarse, para lograr mayor uniformidad sonora. Existen dos formas para realizarlo.

3.1.1 Parlantes de pared o columna

Los altavoces de pared se sitúan de forma tal que sus ángulos de recubrimiento horizontal aparente θ'_H coincidan con la audiencia, como se aprecia en la Figura 15. Al distribuir los altavoces de esta forma, el alcance horizontal es la suma de los alcances individuales. En ocasiones, los parlantes se orientan un poco hacia el final del público para que la procedencia de la señal original sea frontal.

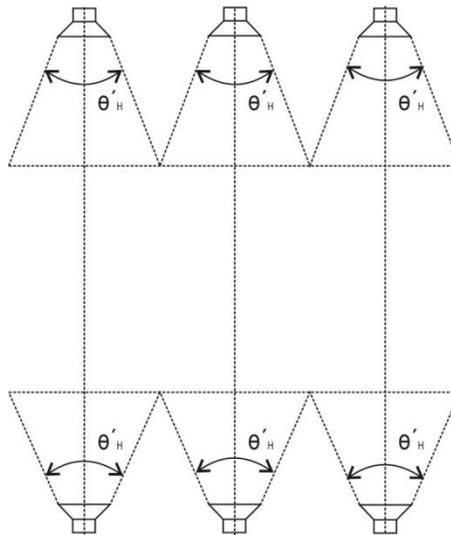


Figura 15 Altavoces de pared.

3.1.2 Parlantes de techo

El criterio sigue la misma idea de cubrir la zona de audiencia (Figura 16); por tal motivo la altura será un compromiso entre la ubicación del parlante y la zona de audiencia. Teniendo en cuenta la altura promedio de esta, el radio de cubrimiento dependerá de la distancia entre el altavoz y la zona de audiencia, y estará dado por

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{r}{h-l}$$

$$r = (h-l) \tan \frac{\theta}{2},$$

en donde θ es el ángulo de directividad del altavoz.

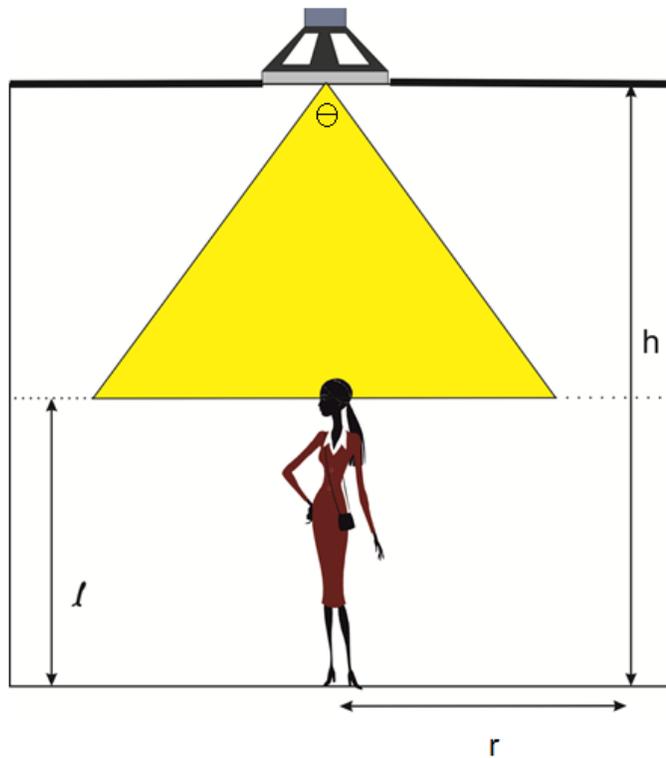


Figura 16 Altavoces de techo.

3.2 Análisis de cobertura individual para parlante en el techo

Teniendo en cuenta el triángulo, se puede afirmar que el radio de cobertura es:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{r}{h-l}$$

$$r = (h-l) \tan \frac{\theta}{2},$$

en donde

- r = radio de cobertura del parlante
- l = altura del piso al oído del escucha.
- h = altura del piso al techo
- θ = ángulo de cobertura del parlante

El radio del área de cobertura del parlante cubrirá lo que se denominaran células, que son pequeñas zonas específicas en las que subdividirá cada área.

De la figura 16, es posible deducir la distancia del eje central del altavoz al oído del oyente d_2 , de la siguiente manera:

$$(h - l) = d_2$$

Para cubrir estas áreas se utilizan los métodos que se presentan a continuación.

3.3 Distribución centro con centro

Los parlantes se ubican en el centro y en los vértices de cada celda, quedando por lo tanto cada parlante separado una misma distancia r . Con este método se obtiene uniformidad en todo el espacio. La desventaja de este método es que existe solapamiento, ya que el área de acción de los parlantes se ve superpuesta con los otros parlantes vecinos y se utiliza un mayor número de ellos. La figura 17 muestra esta distribución.

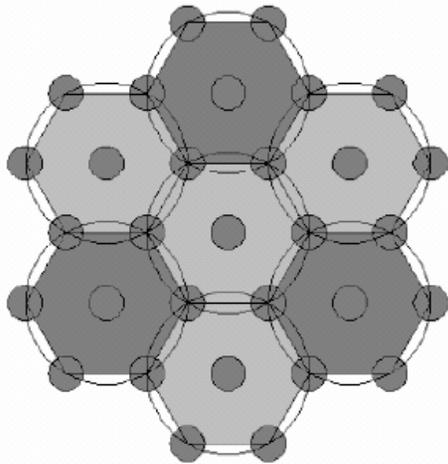


Figura 17 Distribución centro con centro.

3.4 Solapamiento mínimo

Se sitúan los altavoces en el centro de cada célula eliminando los altavoces de los vértices. La figura 18 muestra esta distribución.

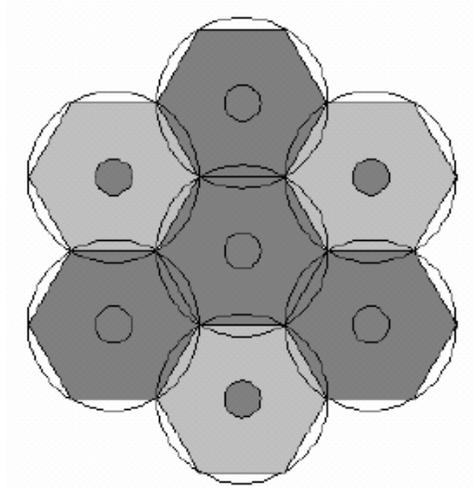


Figura 18 Distribución con solapamiento mínimo.

3.5 Borde con borde

Los parlantes más cercanos están separados al doble de la distancia ($2r$). Esta distribución presenta menor uniformidad porque tiene zonas pequeñas que no son cubiertas (Figura 19). Sin embargo, es la que menos altavoces requiere.

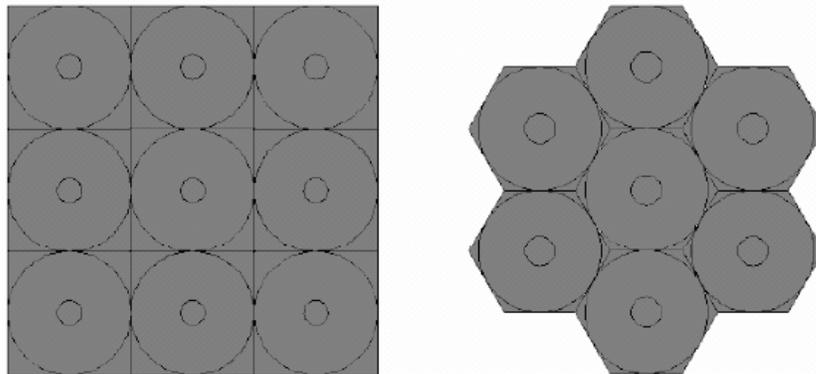


Figura 19 Distribución borde con borde.

La tabla 4 muestra los parámetros importantes que describen las eficiencias de los modelos de distribución.

Tabla 4 Características de las células en un recubrimiento distribuido con altavoces en el techo. Centro con centro, solapamiento mínimo y borde con borde.

Distribución	Arreglo	n	Ac	N	%n	%n+1	ΔLp
<i>Centro con centro</i>	<i>Cuadrado</i>	2	$2 * r^2$	$\frac{S}{r^2}$	17,3	51,1	1,39
	<i>Hexagonal</i>	3	$\frac{3}{2} \sqrt{3} * r^2$	$\frac{2 * S}{\sqrt{3} * r^2}$	37,2	67,8	1,17
<i>Solapamiento mínimo</i>	<i>Cuadrado</i>	1	$2 * r^2$	$\frac{S}{2 * r^2}$	43	57,1	2,04
	<i>Hexagonal</i>	1	$\frac{3}{2} \sqrt{3} * r^2$	$\frac{2 S}{3 * \sqrt{3} * r^2}$	79,1	20,9	2,59
<i>Borde con borde</i>	<i>Cuadrado</i>	1	$4 * r^2$	$\frac{S}{4 * r^2}$	78,5	--	4,35
	<i>Hexagonal</i>	1	$2 * \sqrt{3} * r^2$	$\frac{S}{2 * \sqrt{3} * r^2}$	90,7	--	5,4

en donde:

n: Número de parlantes por celda

Ac: Área de cada célula

N: Número de parlantes

%n: Eficiencia de cobertura con n parlantes.

%n+1: Eficiencia de cobertura con n+1 parlantes

ΔLp : Variación de nivel de presión sonora en la zona cubierta

S: Superficie a sonorizar (área del piso).

CAPÍTULO 4: DISTRIBUCIÓN DEL SONIDO EN MEGAFONÍA¹⁶

La distribución de la señal sonora en megafonía tiene como objetivo primordial lograr que el mensaje sea transmitido a los escuchas de forma clara. Estos sistemas consisten en una serie de fuentes tales como micrófonos, reproductores, alarmas, etc., que se conectan por medio de uno o varios amplificadores a un conjunto de altavoces configurados de forma tal que la potencia sea aprovechada de forma eficiente. La forma de conectar los amplificadores, los cables y los altavoces da lugar a dos tipos de distribuciones eléctricas: Distribución de baja impedancia y distribución de alta impedancia, las cuales se detallan a continuación.

4.1 Distribución en baja impedancia

“Una línea de baja impedancia es aquella en la que los altavoces se conectan directamente a los amplificadores mediante un cable. Tanto la impedancia de salida del amplificador como la de los altavoces es baja; específicamente, los altavoces poseen impedancias normalizadas de 2, 4, 8 y 16 Ω , por tanto, el altavoz debe “ver” una baja impedancia en la línea. En proyectos de megafonía es típico disponer de un gran número de altavoces que constituyen la carga eléctrica del amplificador. Si esta es muy baja, el amplificador se ve obligado a suministrar una corriente elevada, lo cual puede deteriorar sus circuitos de potencia irreversiblemente. Aun así, en el caso de que el amplificador soporte el exceso de intensidad, las pérdidas de potencia en el cable serían demasiado elevadas.

Para simplificar los cálculos, el altavoz se considera como una resistencia igual a la impedancia nominal R y el amplificador como un generador de tensión constante e que se aplica sobre R . Las relaciones entre estas variables son conocidas:

$$P = \frac{e^2}{R}, \quad e = \sqrt{PR}, \quad i = \sqrt{\frac{P}{R}}.$$

Considérese, por ejemplo, un sistema de baja impedancia, con un amplificador diseñado para trabajar con cargas de 4Ω a $25W$. A la potencia nominal, este amplificador proporcionará una tensión de salida de $\sqrt{25 \times 4} = 10V$ y una intensidad de $\sqrt{25/4} = 2.5A$. Si la carga disminuye, el amplificador, en su intento de mantener la tensión de $10V$, generará más corriente de la permitida ($2.5 A$), y se destruirá su

¹⁶ *Ibíd.*, p. 333.

etapa de salida. Si se sustituye la carga de 4Ω por una de 2Ω , la nueva potencia es de $10^2/2=50 \text{ W}$ o, alternativamente, la intensidad del circuito sería de $10/2=5 \text{ A}$.

Esta es una primera razón para determinar que es necesario controlar la carga conectada al amplificador cuando se va a utilizar un número elevado de altavoces, como ocurre en megafonía. Una segunda razón es que, cuando las líneas de baja impedancia son largas, aparecen dos problemas añadidos: pérdidas y desequilibrio en la línea. Estos problemas se explican a continuación.

4.1.1 Pérdidas en la línea

Cuando es necesario enviar la señal del amplificador a altavoces muy distantes, la propia resistencia óhmica del cable absorbe parte de la energía transmitida. Para estudiar este primer efecto negativo de una línea de baja impedancia, se considera el amplificador de la figura 20a, que se comporta como un generador de tensión con resistencia interna despreciable. La señal de salida tiene una amplitud e , que se supone constante al estar cargado el amplificador por una impedancia muy superior a la interna. Este amplificador alimenta una carga Z_L a través de un cable con pérdidas en la línea representadas por R , que se han dividido en partes iguales en el tramo del cable eléctrico de ida y de retorno.

Si no existieran pérdidas en el cable, bien por tener poca longitud o por ser de un material muy buen conductor, la resistencia sería despreciable ($R=0 \Omega$) y toda la tensión generada por el amplificador caería sobre la carga $e_L = e$. En ese caso, la potencia entregada a la carga P_L y la entregada por el amplificador P coinciden:

$$P_L = P = \frac{e^2}{Z_L}.$$

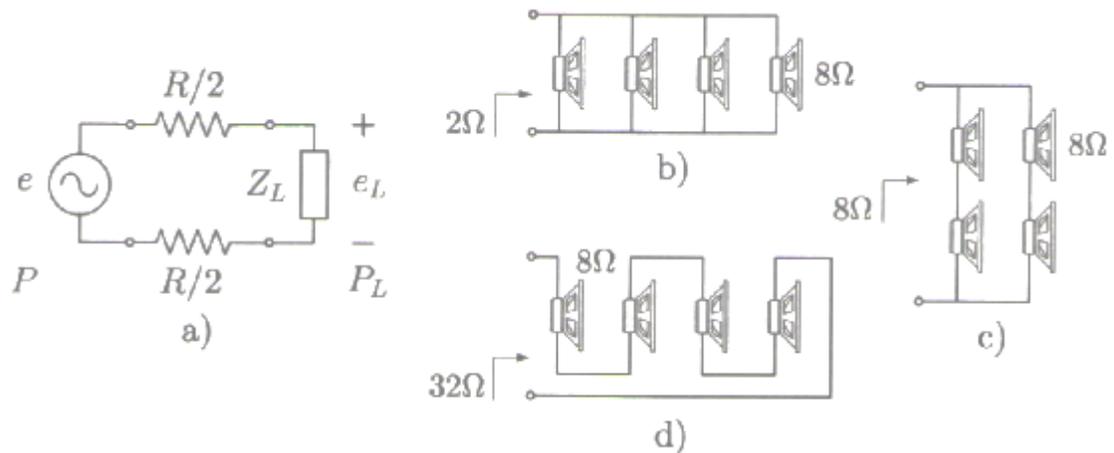


Figura 20 a) Línea con pérdidas resistivas, b) Conexión paralelo, c) Conexión mixta, d) Conexión serie.

Si, por el contrario, existen pérdidas, la tensión en la carga disminuye a un valor

$$e_L = e \frac{Z_L}{Z_L + R},$$

por lo que la potencia absorbida por la carga P_L y la suministrada por el amplificador P' son menores que la potencia nominal del amplificador P :

$$P_L = \frac{e_L^2}{Z_L} = \frac{e^2 \left(\frac{Z_L}{Z_L + R} \right)^2}{Z_L} = P \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{Z_L} \right)^2} < P,$$

$$P' = \frac{e^2}{Z_L + R} = \frac{e^2}{Z_L} \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{Z_L} \right)} = P \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{Z_L} \right)} < P.$$

Por tanto, la potencia en la carga se ve afectada por dos condiciones adversas al aparecer la resistencia R en la línea:

- El amplificador suministra menos potencia por tener mayor impedancia de carga $P' < P$.
- La carga Z_L absorbe menos potencia al disiparse parte de la misma en el cable, $P_L < P$.

De todo esto se deduce la importancia de reducir la resistencia del cable, lo cual es físicamente imposible si se quiere una gran longitud, o trabajar con altavoces de gran impedancia nominal. En principio, el montaje en serie es más adecuado

porque se producen pérdidas menores al aumentar la impedancia que ve el amplificador. Por ejemplo, una línea de 40m de longitud y 0.8mm de diámetro, con unas pérdidas de 0.006 Ω /m, posee de resistencia total de 2,4 Ω , que resulta comparable al valor de Z_L y dará pérdidas apreciables.

A continuación, se presentan las pérdidas de potencia para distintos valores de resistencia del cable. Para un valor de resistencia del cable de sólo el 10% del valor de la impedancia nominal del altavoz, por ejemplo, una resistencia de 0.8 Ω en un cable que alimenta altavoces de 8 Ω , se provocan unas pérdidas de potencia del 17.4%.

$$R = \frac{Z_L}{20} (5\%) \gg P_L = \frac{P}{1,1} (-9,3\%)$$

$$R = \frac{Z_L}{10} (10\%) \gg P_L = \frac{P}{1,2} (-17,4\%)$$

$$R = \frac{Z_L}{5} (20\%) \gg P_L = \frac{P}{1,4} (-30,6\%)$$

En el primer caso se pierden 0,42dB, en el segundo aproximadamente 0,83 dB, y en el tercero 1,6dB. Puede parecer que estas pérdidas carezcan de importancia; sin embargo, hay que considerar que en instalaciones de cierta envergadura, una pérdida de sólo 3 dB, que puede ser la diferencia entre un mensaje inteligible y otro que no lo es, además de que supone cientos de vatios desperdiciados en los amplificadores.

Existen varias opciones para conectar los altavoces en una línea de baja impedancia. En la figura 20b se presenta el montaje en paralelo de cuatro altavoces de 8 Ω , cuya impedancia del conjunto es de sólo 2 Ω y, por tanto, gran parte de la potencia se disipa en la línea. En la figura 20c se tiene el montaje serie-paralelo en el que la impedancia de carga es superior al caso anterior. Finalmente, la figura 20d muestra una conexión en serie, caracterizada por una impedancia excesivamente elevada para salidas típicas de amplificador. En este caso las pérdidas son ínfimas, además el montaje tiene la ventaja de que por los altavoces pasa la misma corriente. No obstante, la carga de 32 Ω puede ser excesiva para un amplificador nominal ya que, para trabajar con potencias aceptables, se necesita proporcionar elevada tensión para cargas grandes. Además, en las conexiones serie, si falla cualquiera de los altavoces, la línea completa queda inutilizada.

4.1.2 Desequilibrio en la línea

En este punto se presenta un problema añadido en las conexiones en paralelo en una línea con pérdidas: aunque los altavoces presenten igual impedancia, la potencia disipada en ellos es diferente.

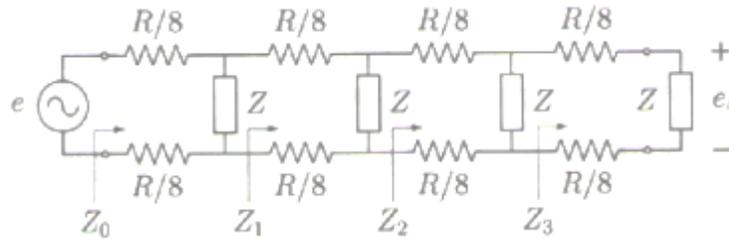


Figura 21 Línea con pérdidas y desequilibrio

Para ilustrar el fenómeno, en la figura 21 se presenta un montaje en paralelo en el que se incluyen las pérdidas progresivas de la línea y las impedancias Z de los altavoces, que se consideran resistivas. Por división de tensión, en cada nodo n se produce una caída que está dada por:

$$e_n = e_{n-1} \frac{Z_n}{Z_n + \frac{R}{4}}$$

y se disipa una potencia de

$$P_n = P_{n-1} \frac{\frac{e_n^2}{Z}}{\frac{e_{n-1}^2}{Z}} = P_{n-1} \frac{e_n^2}{e_{n-1}^2} = P_{n-1} \left(\frac{Z_n}{Z_n + \frac{R}{4}} \right)^2.$$

De la expresión anterior se puede deducir que si $R \gg Z$, es decir, si el sistema no presenta pérdidas, la potencia disipada en el nodo n es idéntica a la del nodo $n+1$. Sin embargo, para valores de pérdidas en torno a la impedancia de los altavoces, Z , la potencia disipada en el último altavoz será menos que la mitad de la disipada en el primero. Para equilibrar la línea, sería necesario tener la misma cantidad de cable entre cada altavoz y el amplificador, lo que incrementaría el valor total de pérdidas.

Si, por el contrario, se considera un montaje en serie para evitar el desequilibrio, es necesario reducir al mínimo la longitud del cable utilizado porque reduce pérdidas y es beneficioso económicamente. El problema se complica cuando se

necesitan muchos altavoces debido a la elevación de la impedancia que supone, o también cuando se desea que los altavoces radien diferentes potencias. En estos casos, se desea que R tenga un valor muy pequeño frente a la carga, lo cual se puede conseguir de dos formas:

1. Reduciendo la resistencia de pérdidas $R = \rho l/S$, lo cual significa utilizar cables de mayor sección, S , ya que la longitud l viene determinada por la instalación. Sin embargo, esta solución tiene unos límites económicos que la hacen inviable ya que el coste del cable a partir de una cierta sección excede los límites razonables.
2. Aumentando la impedancia de carga Z_L , lo que a su vez implica un aumento de la tensión de la línea para que la potencia en la carga e^2/Z_L se mantenga en los valores requeridos. Este sistema es llamado línea de alta impedancia o “tensión constante”.

4.2 El Transformador

El transformador es un dispositivo eléctrico que permite convertir los valores de la amplitud de la corriente o del voltaje alterno a magnitudes diferentes sin variar su frecuencia.

Para la facilidad de los cálculos se considera un transformador ideal como el mostrado en la figura 22.

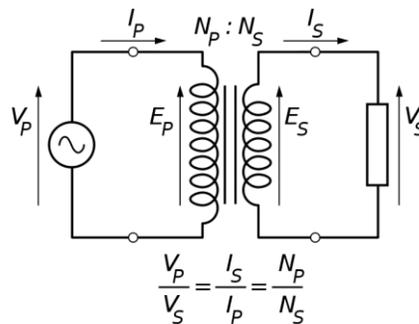


Figura 22 Transformador¹⁷

¹⁷ Transformer under load.(18-abril-2007).{Citado 09-oct-2012} disponible en internet:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>

en donde,

E_s = Fuerza electromotriz inducida

V_p = Tensión en el devanado primario

V_s = Voltaje en el devanado secundario

I_p = Corriente de entrada

I_s = Corriente de salida

Relación de transformación (m)

$$\frac{V_s}{V_p} = m$$

4.3 Distribución de alta impedancia¹⁸

La forma de disminuir las pérdidas en la línea es aumentando la impedancia de carga Z_L frente a la resistencia de pérdidas R . De este modo, la tensión se mantiene constante a lo largo de la línea; por esta razón, esta disposición se denomina línea de tensión constante.

Al aumentar la impedancia de carga para mantener la potencia suministrada por el amplificador, se debe aumentar la tensión de salida de éste. Esta operación se lleva a cabo insertando en dicha salida un transformador elevador que aumente la tensión de ataque a la línea a valores de 50 o 100 V; en estas condiciones, se dice que la línea trabaja en “alta impedancia”.

El significado de la expresión “tensión constante” puede dar lugar a una mala interpretación. La señal de audio que viaja por la línea varía del mismo modo en que lo hace en un altavoz normal y sólo alcanzará el máximo valor nominal de 100V en los momentos que el amplificador esté entregando máxima potencia, cuando se supone que hay adaptación de impedancias. En ausencia de señal, la tensión en la línea es nula. Sin embargo, lo que realmente mantiene constante es el nivel de señal, sea cual sea su valor, en un momento dado y a lo largo de toda la línea. Es decir, con un grupo de altavoces conectado en paralelo a un amplificador que en un cierto instante genere una tensión e , esta señal será

¹⁸ PUEO ORTEGA, Basilio y ROMÁ ROMERO, Miguel. Electroacústica altavoces y parlantes. Pearson Educación, 2003. 337 p

constante a lo largo de la línea y la recibirán por igual tanto el altavoz más cercano como el más lejano debido a las pérdidas prácticamente nulas en el cable. A eso es a lo que se refiere el término “tensión constante”.

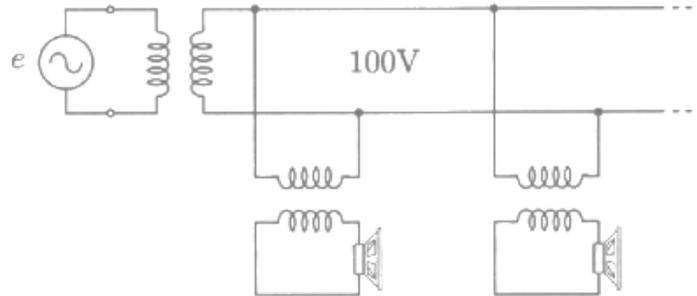


Figura 23 Sistema de megafonía en línea de 100V

Puesto que los altavoces van a soportar una tensión alta y su impedancia sigue siendo baja, de 4, 6, 8 o 16 Ω , la potencia que disiparían sería excesiva. Un altavoz típico de sonorización, como es el difusor empotrable en techo, de unos 5W, necesitaría tener una impedancia $Z = 100^2 / 5 = 2K \Omega$ para poder conectarse a una línea de 100V. Como los fabricantes producen altavoces con valores normalizados de impedancia de la bobina móvil, es necesario usar, para cada altavoz, un transformador reductor que disminuya la tensión de ataque y al mismo tiempo haga que el grupo altavoz transformador presente una alta impedancia a la línea, como se muestra en la Figura 23.

Gracias a la inserción de estos transformadores, por la línea circula una corriente baja que minimiza las pérdidas a la vez que los altavoces reciben una corriente elevada. Se trata del mismo sistema de reducción de pérdidas que usan las centrales eléctricas, utilizando líneas de alta tensión para el transporte y transformadores que dan servicio de baja tensión en las ciudades.

De lo expuesto anteriormente se deduce la conveniencia de que los altavoces asociados en una línea de alta impedancia se conecten en paralelo. De esta forma, al igual que en cualquier conexión en paralelo, la rotura de un elemento no afecta al resto, que puede seguir funcionando. Adicionalmente existen las siguientes ventajas:

1. Como todos los altavoces están conectados a la misma tensión ya que no hay variaciones a lo largo de la línea, los primarios de cada transformador trabajan exactamente igual, es decir, dos altavoces idénticamente instalados darán idénticos resultados, sin variaciones de uno a otro.

2. El funcionamiento de cada altavoz es independiente de los demás, por lo que la eliminación de uno de ellos, o incluso la mayoría, no afecta al funcionamiento de los restantes, ni siquiera se aprecian cambios de nivel en los que están sonando al conectar o desconectar otros. Para que esta independencia se produzca realmente, la línea no debe quedarse descargada ya que perdería la adaptación de impedancias. Como se explicará más adelante, cuando un altavoz se desconecta, se debe insertar una resistencia del mismo valor que la impedancia del altavoz.
3. Al poder regular el nivel de potencia en cada altavoz a través del sector de potencia, existe la posibilidad de tener altavoces conectados al mismo amplificador que operen a distinto nivel. Es más, pueden combinarse modelos en una misma línea para adaptarse a las necesidades de cada zona de un mismo recinto de escucha, tanto en lo que se refiere al tipo de altavoz como a la potencia adecuada. De la elección de la potencia en cada altavoz del sistema de megafonía, aparecen dos posibles montajes: a potencia constante y a potencia variable.

4.3 Montaje a potencia constante

En el montaje a potencia constante, el amplificador se carga con n altavoces de igual potencia por lo que presentan la misma carga eléctrica y la tensión que cae en ellos es la misma. Para obtener un funcionamiento correcto de la línea, se calcula la relación o acople entre amplificador y carga, cálculos muy simplificados al tratar con impedancias resistivas, tensiones y corrientes eficaces. Por ejemplo, un amplificador que puede entregar P vatios con una tensión constante de e voltios, proporciona su potencia nominal cuando la carga sea óptima, es decir, cuando exista adaptación de impedancias $Z_{opt} = E^2/P$. Si el amplificador alimenta a n altavoces en paralelo con impedancias Z_L idénticas, para que haya acoplamiento de impedancias, el primer criterio que se debe cumplir es

$$Z_{opt} = \frac{Z_L}{n}.$$

Por otro lado, si existe acoplamiento de impedancias, al ser todas ellas iguales, cada altavoz recibe la misma potencia,

$$P_L = \frac{E^2}{Z_L},$$

Y por el acoplamiento, la impedancia óptima puede expresarse como

$$Z_{opt} = \frac{Z_L}{n} = \frac{E^2}{nP_L} = \frac{E^2}{P},$$

Donde, por definición, $P = nP_L$, que es el segundo criterio de acoplamiento. Es decir, cuando la potencia total del amplificador P es igual a la suma de las potencias de los altavoces puede decirse también que existe acople de impedancias. Por tanto, el sistema está adaptado en cualquiera de estos casos:

- Si la impedancia de salida nominal del amplificador es igual al paralelo de las impedancias de carga, $Z_{opt} = Z_L/n$.
- Si la potencia nominal del amplificador es igual a la suma de las potencias nominales de las cargas, $P = nP_L$.

4.4 Montaje a potencia variable

Si el amplificador anterior se carga con n altavoces cuyas impedancias son diferentes y de valor Z_i , cada altavoz puede absorber potencias P_i diferentes:

$$P_i = \frac{E^2}{Z_i}$$

En altavoces de megafonía con transformador incorporado, para repartir diferentes potencias a un mismo altavoz, es suficiente con cambiar el terminal seleccionado. Entonces, para que haya acople de impedancias, la impedancia que “ve” el amplificador debe ser la óptima,

$$\frac{1}{Z_{opt}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}$$

Lo cual equivale a

$$\frac{1}{Z_{opt}} = \frac{P}{E^2} = \frac{P_1}{E^2} + \frac{P_2}{E^2} + \dots + \frac{P_n}{E^2}$$

Es decir, aunque las impedancias y potencias sean diferentes, siguen siendo iguales las dos condiciones anteriores para que exista acople: la impedancia de acople del amplificador igual a la impedancia de carga en paralelo, o bien, la potencia nominal del amplificador debe ser la misma que la potencia repartida en las cargas:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$$

En la figura 24 se presenta un amplificador de megafonía 8W/100 V que reparte su potencia en cuatro altavoces idénticos, cuyos terminales se han conmutado a 4, 2, 1 y 1 W para que la suma sea 8W y así exista adaptación de impedancias. En este caso, la impedancia de los terminales de salida del amplificador es de $100^2/8 =$

1250Ω, muy por encima de las decenas de ohmios de resistencia que presenta el cable.

En cualquier caso, suele ser más fácil calcular el acople de potencias que de impedancias, de ahí que los transformadores vengan marcados en potencias y no en impedancias. Como se ha comprobado, trabajar en tensión constante da gran versatilidad y permite suministrar diferentes potencias a diferentes áreas del sistema de sonorización.

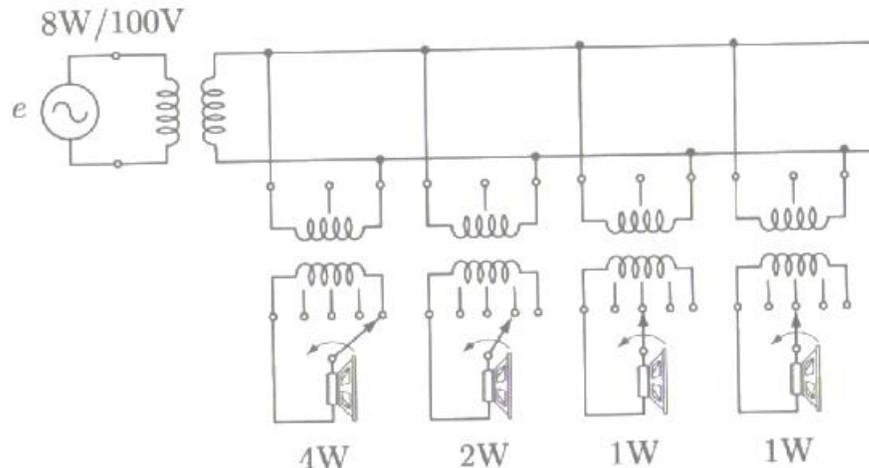


Figura 24 Sistema de megafonía de 100V a potencia variable.

En la figura 24, un amplificador de 8W alimenta a cuatro altavoces cuya suma de potencias coincide con la del amplificador. Las desviaciones en la suma de potencias coinciden con la del amplificador. Las derivaciones en la suma de potencias en la línea del orden de un 10% con respecto a la nominal del amplificador son admisibles ya que estos equipos están diseñados para soportar tales variaciones. Sin embargo, dependiendo del sentido en que se dé la desviación, es decir, por encima o por debajo de la potencia nominal del amplificador, se producen distintos efectos:

- Carga que absorbe más potencia que la nominal del amplificador: más potencia en la línea de los altavoces supone impedancia vista por el amplificador, lo que puede afectar adversamente su funcionamiento. Para evitar la destrucción de la etapa de potencia del amplificador, la potencia total de los altavoces en la línea nunca debe ser superior a la nominal del amplificador más un 10%.
- Carga que absorbe menos potencia que la nominal del amplificador: Por el contrario, potencias menores en la línea suponen impedancias mayores, lo cual es una situación no demasiado grave, puesto que se desaprovecharía parte de la energía suministrada por el amplificador.

En este montaje la potencia absorbida por cada altavoz sólo depende de la impedancia que dicho altavoz presenta a la línea y es totalmente independiente de la cantidad o carga del resto de altavoces, siempre que estén en o por debajo de las condiciones de potencia nominal. De este modo, es posible mantener la potencia de un altavoz aun desconectando el resto de altavoces. Sin embargo, si se deja el secundario de uno de los transformadores en circuito abierto, la línea presentará mayor carga y se limitará la corriente del amplificador, que es el segundo de los desequilibrios expuestos. Éste es el caso de instalaciones en las que alguno de los altavoces de la línea pueda desconectarse a voluntad del usuario, por ejemplo, en las habitaciones de un hotel. Es necesario, entonces, intercalar una resistencia de potencia del mismo valor que la impedancia nominal del altavoz. Así, el pulsador de desconexión es en realidad un conmutador con dos posiciones, una de las cuales corresponde al altavoz y otra a la resistencia de carga R_d .

Al desconectar el altavoz, la línea queda cargada por una impedancia igual que cuando estaba conectado.

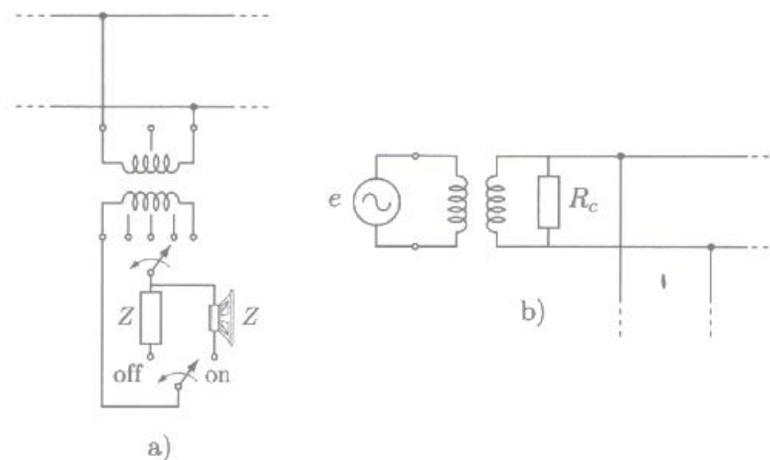


Figura 25 a) Resistencia de desconexión para mantener equilibrio de la línea, b) Resistencia de carga para suplir la falta de potencia.

En la figura 25a se presenta un sistema de conmutación que incluye una resistencia de 8Ω , que posee el mismo valor que la impedancia del altavoz. En posición de encendido, el altavoz carga la línea con la impedancia de una de las potencias del transformador. En posición de apagado, es la resistencia la que carga al transformador con 8Ω y éste a la línea con la misma potencia que el altavoz para mantener el equilibrio.

Si el transformador tiene que trabajar permanentemente con una línea cuya suma de potencias fuera sensiblemente menor que la del amplificador, es aconsejable

instalar una resistencia de carga R_c en paralelo con la línea de altavoces, (Figura 25b), cuyo valor viene dado por

$$R_c = \frac{E^2}{P - \sum_i P_i},$$

donde P es la potencia del amplificador y P_i son las potencias de los i altavoces en la línea. Por tanto, la potencia a absorber por este componente es la diferencia entre las potencias del amplificador y la línea de los altavoces.”

CAPÍTULO 5 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPACIOS DEL EDIFICIO Y SECTORIZACIÓN DE LAS ZONAS A SONORIZARSE

La metodología se aplicó en el edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.

El edificio está constituido por un sótano y tres plantas, y su descripción se da a continuación.

5.1 Sótano:

Es un parqueadero con capacidad para 48 vehículos. Además, tiene dos cuartos, uno para la planta eléctrica y otro para el sistema de aire acondicionado.

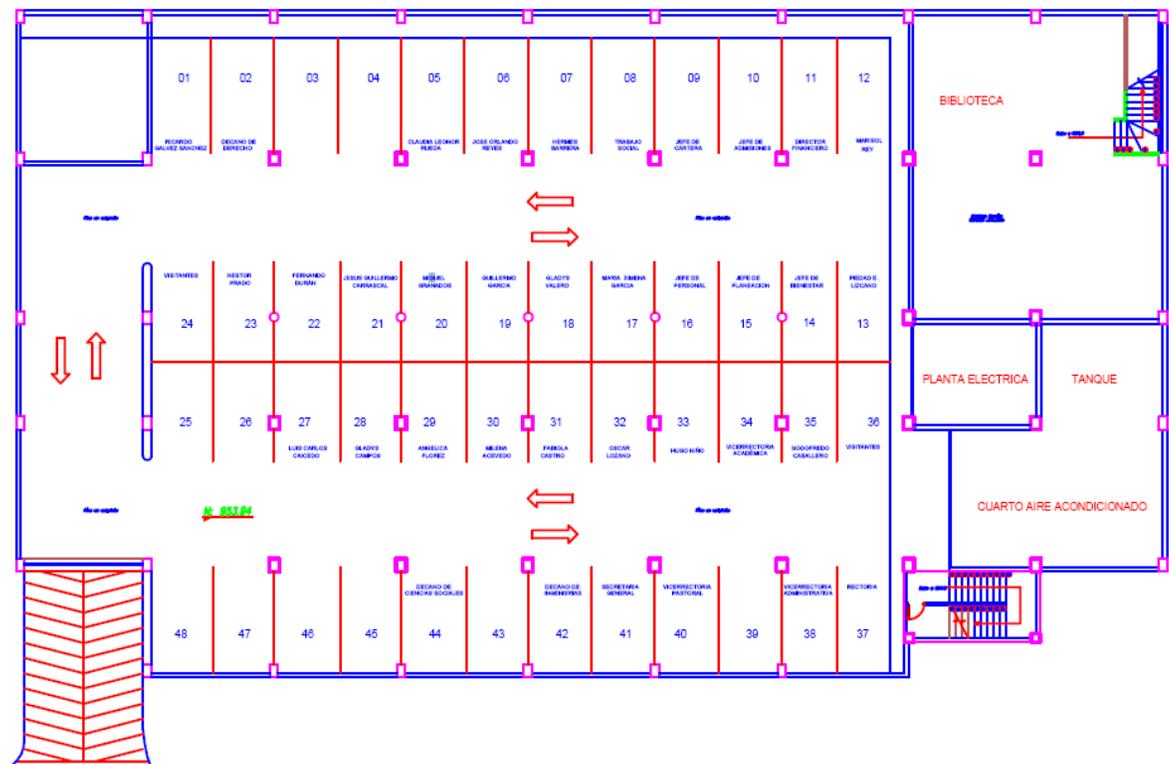


Figura 26 Plano del sótano del edificio.

A este espacio, por ser de uso ocasional, ya sea por visitantes o por personal propio de la universidad, no se le realizará diseño de sonorización.

5.2 Descripción general del primer nivel del edificio.

Esta planta la constituye la recepción de la biblioteca, tres zonas de estudio, una sala para computadores, una sala de estar, salas de reuniones, sala de computadores para profesores, un espacio para la fotocopiadora y papelería; además cuenta con un aula de uso múltiple y cuatro baños. La figura 27 muestra el plano del primer nivel del edificio.

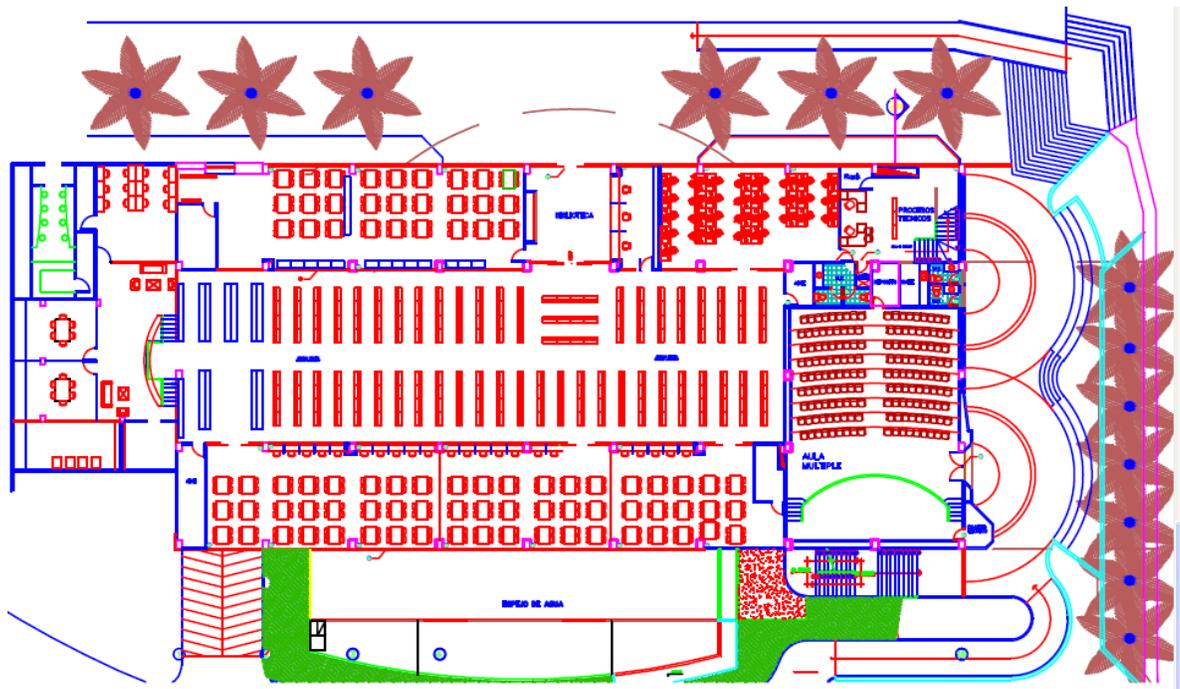


Figura 27 Plano del primer nivel.

Para facilitar la descripción del nivel, este se dividirá en las diferentes partes que lo componen. A continuación se muestra la recepción de la biblioteca.

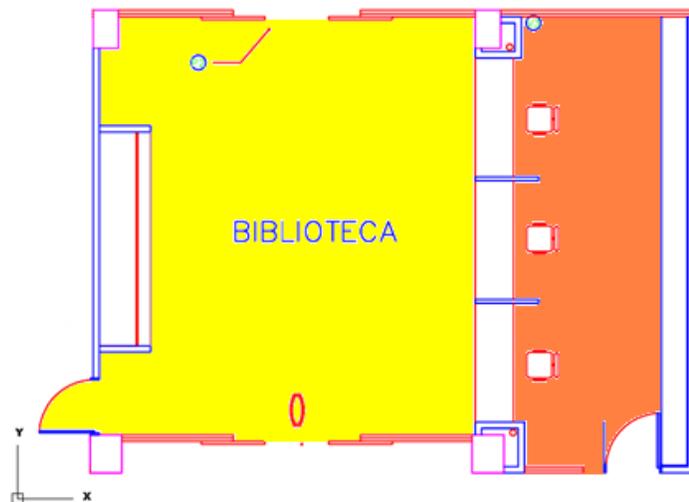


Figura 28 Plano de la recepción de la biblioteca.

La recepción de la biblioteca se divide en dos partes: La resaltada en amarillo es en donde las personas realizan consulta, registro y entrega de libros. La resaltada en color naranja es donde los bibliotecarios realizan el registro de los libros prestados y/o entregados.

El siguiente espacio encontrado dentro de la biblioteca lo constituye sala de estudio No.1, conformada por una serie de escritorios, ventanales y un cuarto pequeño en el fondo.

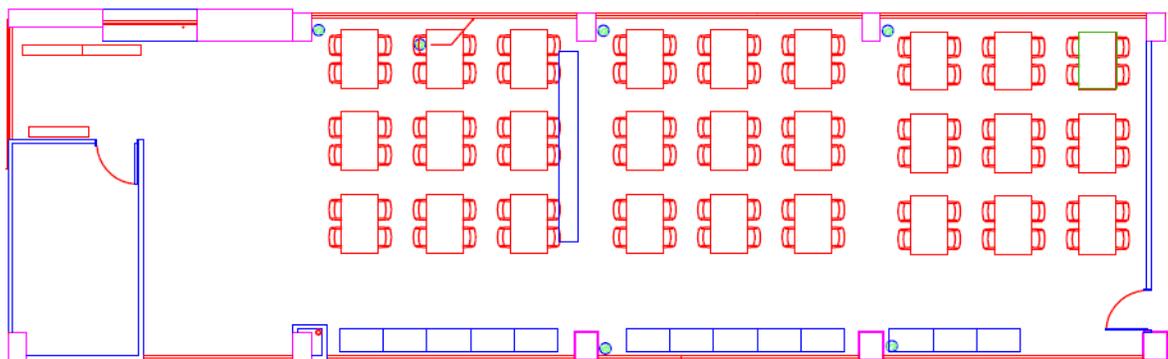


Figura 29 Plano sala de estudio No 1.

En la figura 30 se muestra la sala de computadores. Se trata de un espacio de 12 metros de largo por 7 de ancho al que, en vista de que se trata de un recinto de trabajo, se le realizará diseño de sonorización.

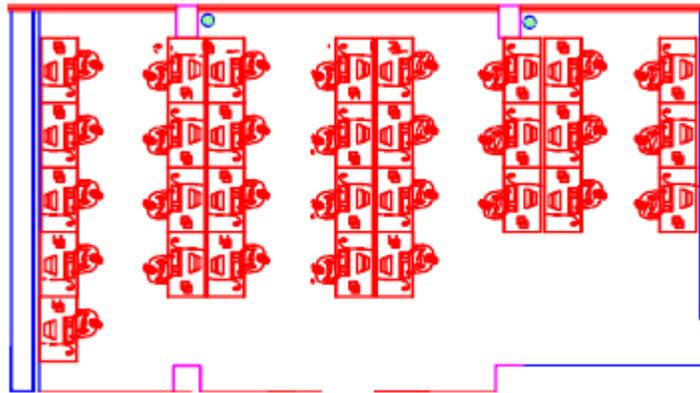


Figura 30 Sala de computadores

Siguiendo, en color amarillo, se muestran las tres salas de reuniones (la situada más arriba corresponde a la sala de computadores para profesores), en gris la sala de estar y en negro la papelería. Se realizará estudio para sonorización a estas zonas.

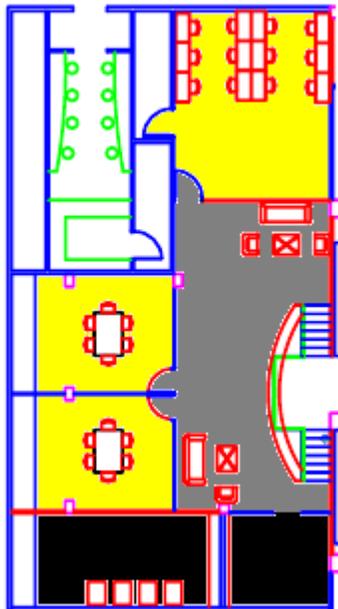


Figura 31 Zona de estar, sala de reuniones, sala de computadores para profesores y fotocopiadora.

A continuación, se observa el plano de la zona para almacenamiento y clasificación de los libros; se trata del espacio más grande encontrado en el

edificio, con 41.8 m de largo y 12 de ancho. En él se encuentran algunos ventanales, paredes, los estantes para los libros.

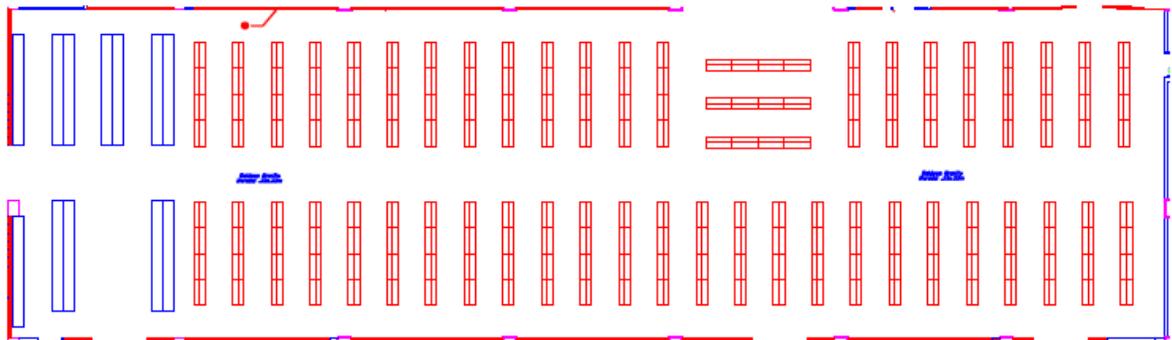


Figura 32 Zonas para almacenamiento de libros

Las siguientes zona las conforman: la hemeroteca, la sala de estudio No.1 y No.2. Desde el interior de estos espacios y debido a los ventanales y paredes de vidrio, se logra observar hacia las distintas zonas del el edificio.

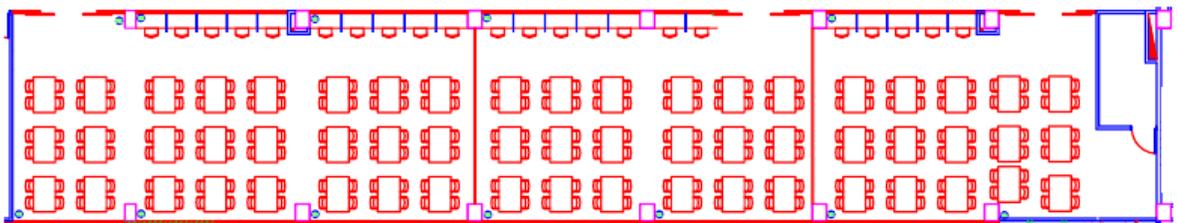


Figura 33 Hemeroteca y salas de estudio.

El aula múltiple es utilizada como Auditorio Menor, destinado para conferencias y eventos donde se reúna poca gente. Está acondicionada acústicamente con materiales absorbentes para este propósito, y además tiene ya instalado un sistema de sonorización.

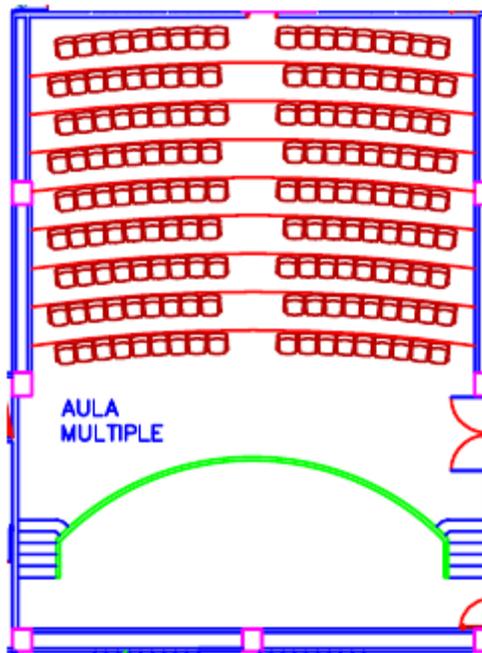


Figura 34 Aula múltiple (auditorio menor).

5.3 Segundo nivel

En este nivel se encuentran oficinas importantes a donde acude gran cantidad de personas, como es el caso de Registro y Control Académico. Junto a ella, y situadas en la parte norte están: la Sala de Capacitación, Producción Multimedia, la Videoteca, la oficina de Dirección de Biblioteca y la oficina secretaria. En la parte sur están, la Recepción y correspondencia, oficina de Relaciones Públicas, el Departamento de Promoción Académica y un espacio libre. En la parte central, de Oeste a Este, están los peldaños de acceso a la edificación y una especie de pasillo-plazoleta, que divide la parte norte y la sur; más hacia el Este, se encuentra una plazoleta que está sobre la concha acústica del primer nivel.

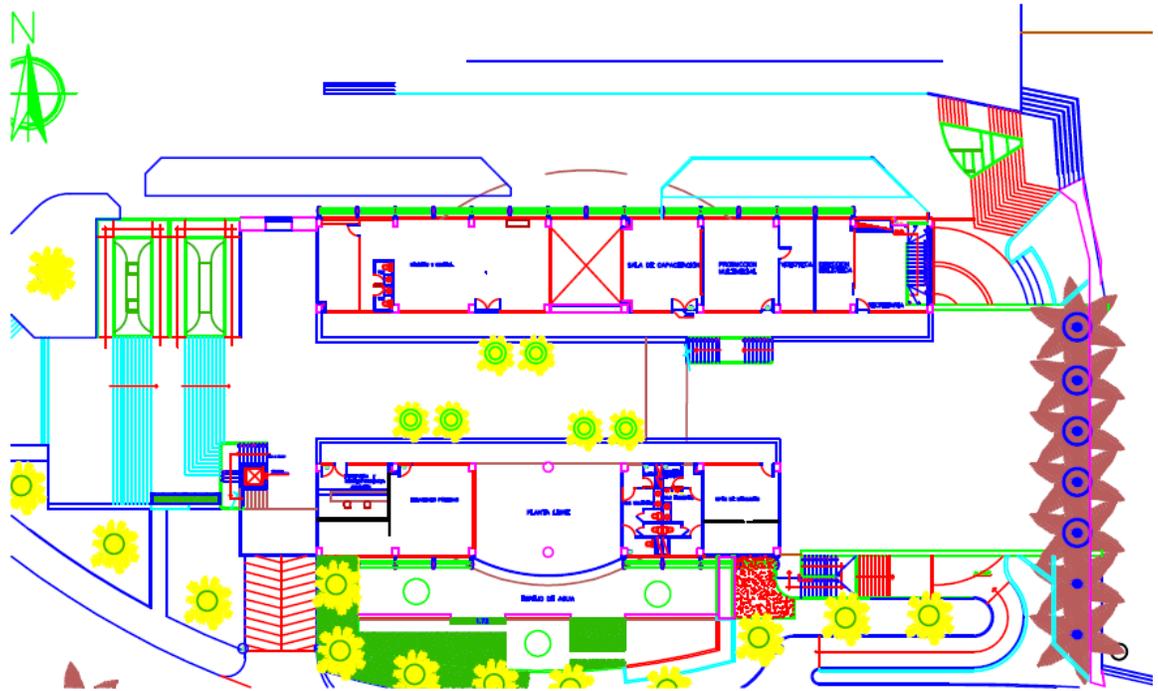


Figura 35 Plano del segundo piso.

A continuación se muestra la división de los espacios de este nivel.

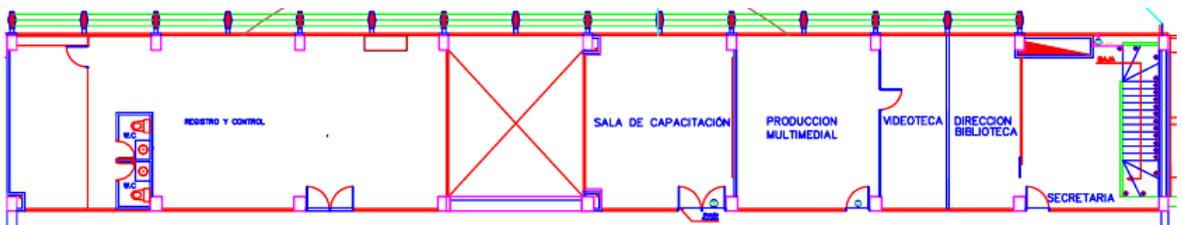


Figura 36 Oficinas parte norte, segundo nivel.

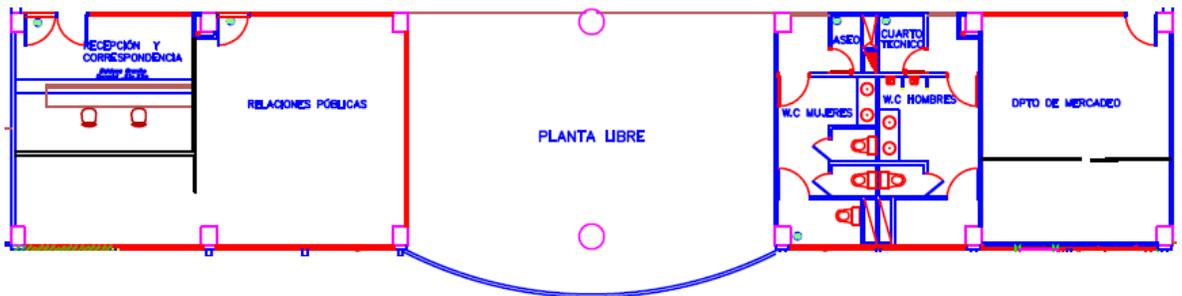


Figura 37 Parte sur del segundo nivel.

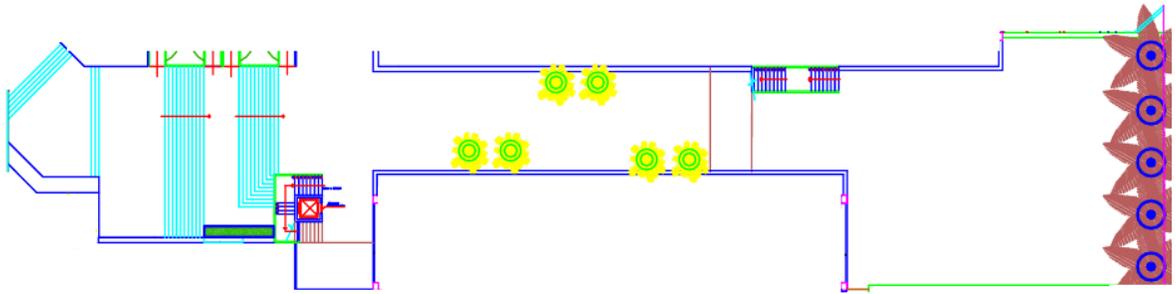


Figura 38 Plazoleta centra, del segundo nivel.

5.4 Tercer nivel

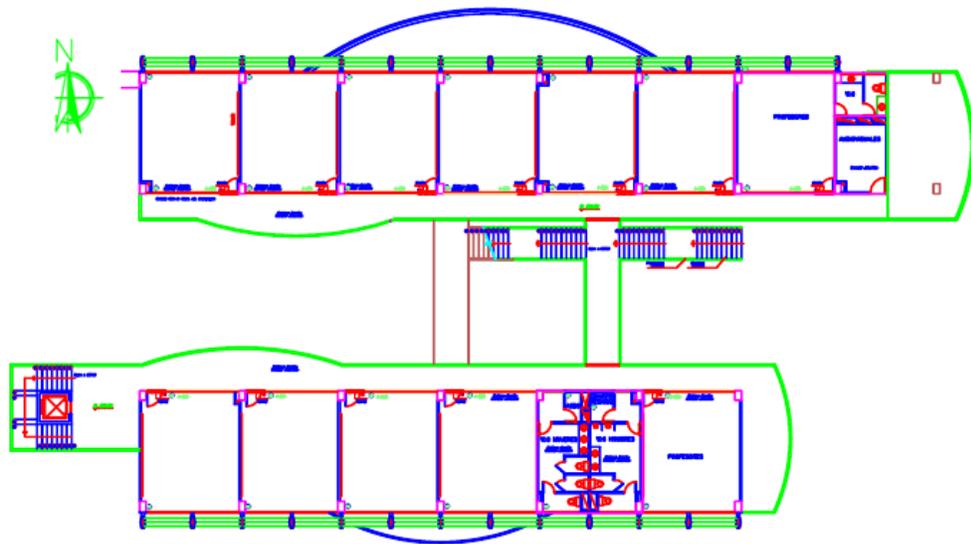


Figura 39 Tercer piso

Este nivel del edificio contiene dos salones de profesores, un cuarto de medios audiovisuales y 10 salones; todos los salones tienen las mismas medidas; la sala de los profesores tiene una medida igual a la de los salones, sin embargo los elementos dentro de ella son diferentes. Los salones están conformados principalmente por pupitres, un atril, un tablero de acrílico, a diferencia de las dos salas de profesores que están constituidas por escritorios y paneles que separan los espacios en oficinas más pequeñas.

5.5 Cuarto piso

Este nivel está constituido por 10 salones, de medidas iguales a los del tercer nivel.

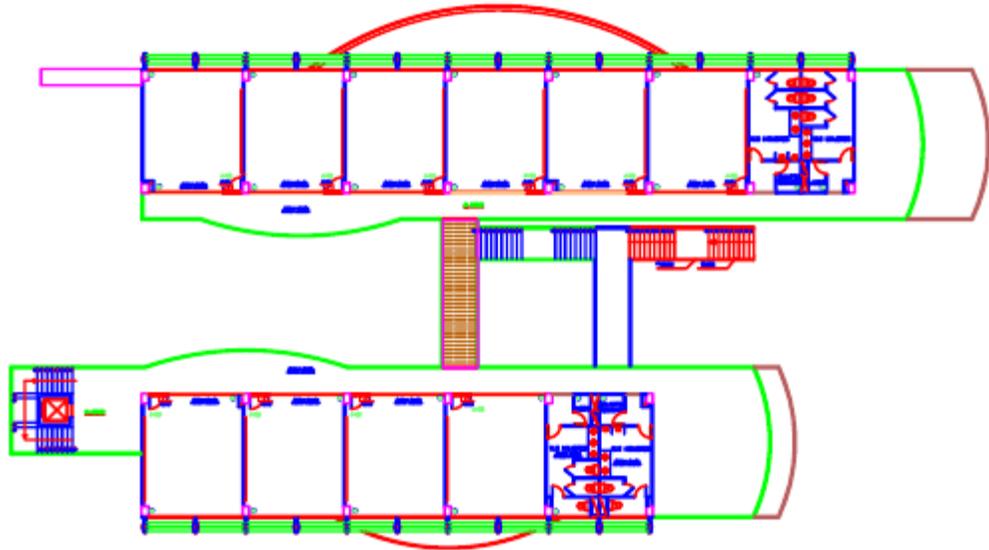


Figura 40 Cuarto piso edificio J.

Cada una de las zonas del edificio J será nombrada en la siguiente sección. Para poder distinguir qué tipo de zona requiere sonorizarse, se identificará con la palabra “REQUERIDO”; en caso contrario, la zona se identificará con las palabras “NO REQUERIDO”. Luego de realizar una inspección, seleccionando las zonas a sonorizar, se dividirán de la siguiente manera.

Para determinar los espacios a los que se le aplicará el sistema de sonorización, se escogerán aquellos que los autores consideren más relevantes para este propósito y en donde se exponga mejor el desarrollo del ejercicio.

En un proyecto real la selección de los espacios a sonorizar la determina el interesado o cliente, por medio de una inspección previa al recinto.

Existe una pequeña diferencia entre los espacios analizados en los planos y los nombrados en la tabla; esto se debe a que desde el momento de la creación de los planos el edificio ha sufrido diversos cambios en su modo de operar.

Tabla 5 Sectorización de las zonas a sonorizarse.

GRUPO	ÁREA O	OFICINAS	CONDICIÓN
	DEPARTAMENTO		
SOTANO	PARQUEADEROS		NO REQUERIDO
PLANTA	BIBLIOTECA	Recepción	NO REQUERIDO
PRIMER PISO		Biblioteca	REQUERIDO
		Sala de estudio 1	REQUERIDO
		Sala de estudio 2	REQUERIDO
		Sala de estudio 3	REQUERIDO
		Sala computadores	REQUERIDO
		Sala de Reuniones 1	REQUERIDO
		Sala de Reuniones 2	REQUERIDO
		Sala de Profesores	REQUERIDO
		Fotocopiadora Biblioteca	REQUERIDO
		Fotocopiadora externa	NO REQUERIDO
		Hemeroteca y sala de lectura	REQUERIDO
	AUDITORIO MENOR		NO REQUERIDO
	CONCHA ACÚSTICA		NO REQUERIDO
		Recepción y correspondencia	REQUERIDO
PLANTA		Relaciones internacionales e interinstitucionales	REQUERIDO
SEGUNDO PISO		Departamento de mercadeo	REQUERIDO
		Planta libre	REQUERIDO
		Registro y control academico	REQUERIDO
		Icetex	REQUERIDO
		Nuevas tecnologías	REQUERIDO
		Seccion de liquidaciones	REQUERIDO
		Departamento de comunicaciones y RRPP	REQUERIDO
		Dirección de Biblioteca y seretaria	REQUERIDO
		Sala de profesores A	REQUERIDO
PLANTA		Sala de profesores B	REQUERIDO
TERCER PISO		Medios audiovisuales	NO REQUERIDO
		Salones (10)	REQUERIDO
PLANTA		Salones (10)	REQUERIDO
CUARTO PISO			

CAPÍTULO 6. DISEÑO Y APLICACIÓN DEL DISEÑO APLICADO AL EDIFICIO J

En su desarrollo, el diseño partía del análisis geométrico de los espacios a tratar para la correcta distribución de los altavoces, para que, una vez puestos en funcionamiento, cubran correctamente la zona de audiencia prevista. Acto seguido, se determinan las características físicas de las superficies de los espacios tratados (paredes, techos, ventanas, etc.) y la forma como estos repercuten en las ondas sonoras, con el fin de determinar si tales espacios requieren acondicionamiento acústico. Además, es importante recalcar que el presente trabajo tiene en cuenta las pérdidas en los transformadores y la forma como deben adaptarse las impedancias para la reducción de las pérdidas en la línea.

6.1 Aspectos generales para la distribución de los parlantes

El método está aplicado a los distintos espacios que componen el edificio. Sin embargo, se encuentran espacios de dimensiones y materiales iguales (como el caso de los salones de clase). Por eso, en el desarrollo del diseño se aprovechan dichas simetrías estructurales.

Para esta primera parte se desarrollará una serie de ejemplos tomados del Edificio J. El tipo de espacio más recurrente es un salón de clases promedio que tiene unas dimensiones de 5.8 m de ancho, 7.25 m de largo y 2,73 m de alto.

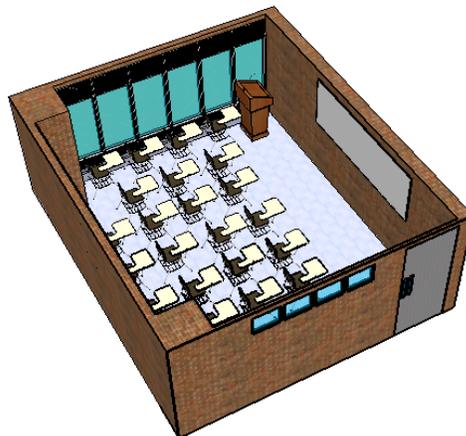


Figura 41 Salón de clases típico.

En este caso se supone la altura promedio de los oyentes sentados de un metro (1m) y se considera el ángulo de cobertura de los parlantes de 90° y la distancia

del oído al techo de 1,73 m (altura del recinto menos la altura promedio), como se indica en la figura 42.

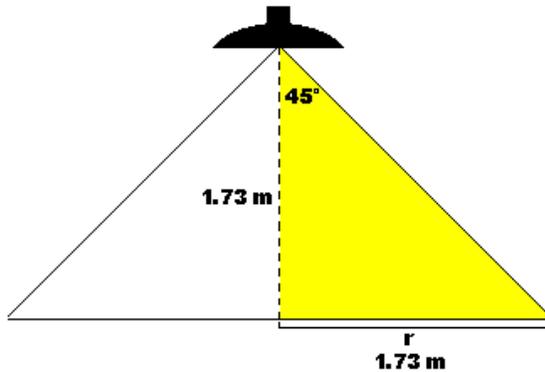


Figura 42 Cobertura radial del parlante.

Cobertura radial del parlante r:

$$r = 1.73 \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = 1.73 \tan \frac{90^\circ}{2}$$

$$r = 1.73 \text{ m}$$

A manera de ejercicio práctico y conforme a la relación presentada en la tabla 5, para abordar el problema se escogió la distribución de altavoces en el techo de “centro con centro”, tanto con el “arreglo cuadrado” como con el “arreglo hexagonal”.

6.2 Distribución centro con centro.

6.2.1 Arreglo cuadrado

Se parte de la ecuación para el número de parlantes.

$$N = \frac{A}{r^2} = \frac{42,05}{1,73^2} = 14 \text{ Apróx.}$$

De acuerdo con la ecuación de la tabla 5, con este tipo de arreglo se pueden ubicar hasta 14 parlantes de estas características en este espacio.

En la figura 43 se observa la distribución de parlantes para este caso. Los parlantes están representados como círculos de color negro y están puestos sobre el techo.

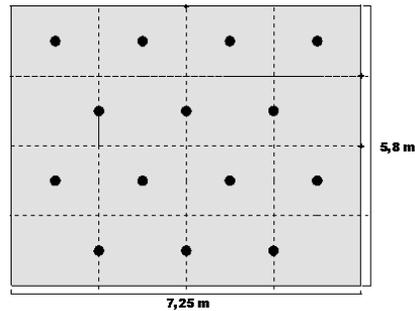


Figura 43 Distribución de parlantes, centro con centro.

En la figura 44 se observa, en azul, cómo el espacio estudiado es envuelto en su totalidad por las ondas sonoras producidas por los parlantes dentro del salón. Los círculos coloreados en rojo, corresponden a las partes de las ondas sonoras que chocan contra las paredes. Sin embargo, por las características del material, unas ondas serán reflejadas y las otras absorbidas por el mismo.

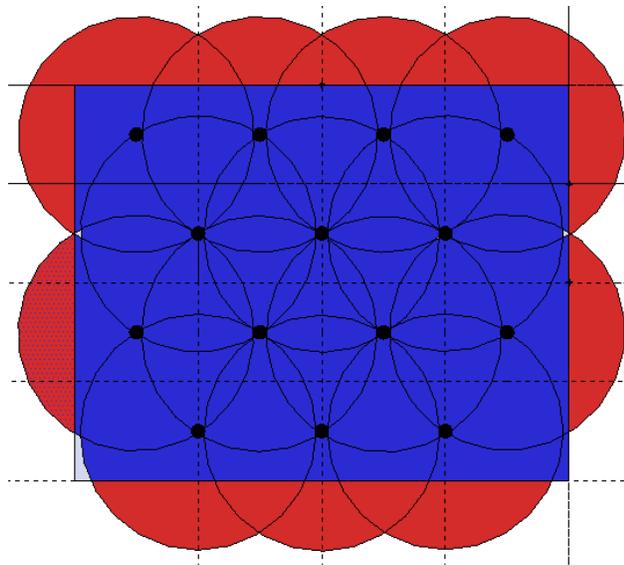


Figura 44 En azul: Cobertura de las ondas sonoras de los parlantes dentro del recinto. En rojo: Cobertura virtual de las ondas sonoras de los parlantes no aprovechada por interferencia de las paredes.

En el caso anterior existe un solapamiento de las ondas producidas por los parlantes distribuidos; este solapamiento produce una baja variación en la presión sonora percibida en diferentes puntos del espacio a tratar.

6.2.2 Arreglo hexagonal

$$N = \frac{2 * S}{\sqrt{3} * r^2} = \frac{2 * 42,05}{\sqrt{3} * 1,73^2} = 16,22 \approx 17$$

En este caso el número de parlantes se aproxima a 17, y la distribución de los parlantes en el techo del salón queda como se muestra en la figura 45.

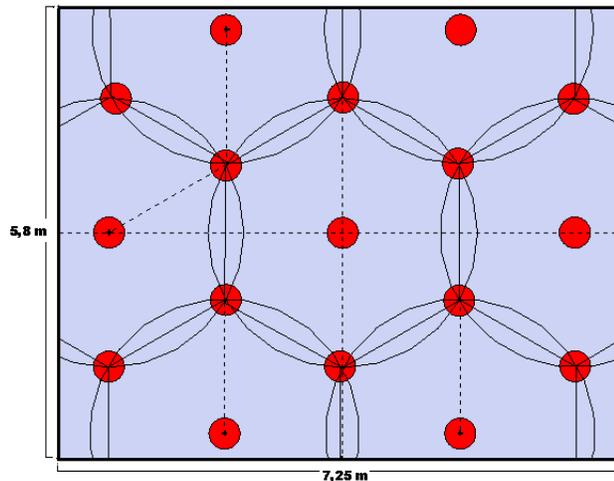


Figura 45 Distribución hexagonal de los parlantes.

Al ubicar los altavoces dentro del salón, muchas ondas serán absorbidas y otras reflejadas por las paredes. Ya que las ondas no son visibles, en este trabajo se representan como *conos de ondas acústicas*. De esta manera, las ondas acústicas generadas por los parlantes que ubicados en el techo lucirán como lo muestra la figura 46. En la figura 47 se observa el mismo tipo de distribución de parlantes, salvo que, en este caso las ondas acústicas se muestran limitadas por las paredes del recinto.

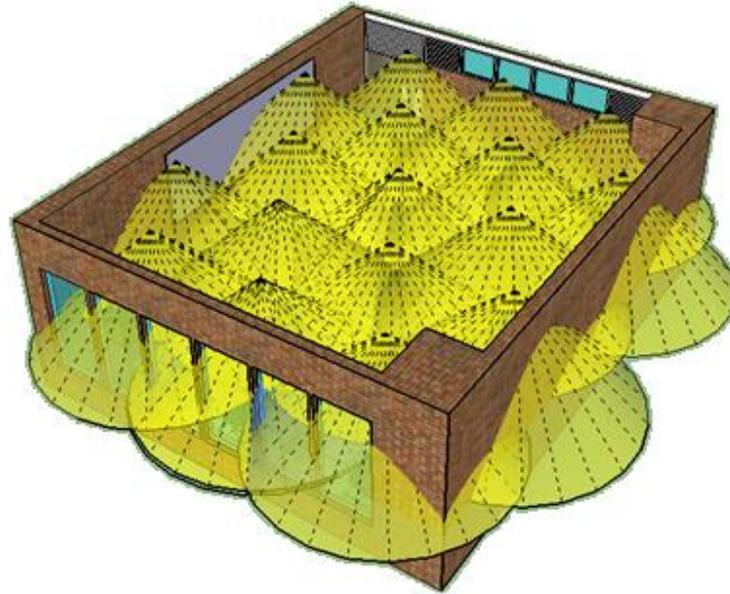


Figura 46 Conos de ondas acústicas generadas por los parlantes en el techo.



Figura 47 Ondas acústicas generadas por parlantes en el techo y limitadas por las paredes.

6.3 Solapamiento mínimo

Nótese que en los casos anteriores existe un solapamiento de las ondas sonoras que, por un lado hace que la variación de la presión sonora sea baja, pero por el otro requiere de un alto número de altavoces por ser un sistema redundante. Para solucionar este problema, en caso que los requerimientos acústicos lo permitan, se procede a utilizar configuraciones con solapamiento mínimo.

6.3.3 Arreglo cuadrado

$$N = \frac{S}{2 * r^2} = \frac{42.05}{2(1,73^2)} = 7,02$$

Las figuras siguientes muestran diferentes alineaciones de los parlantes con el arreglo cuadrado con solapamiento mínimo.

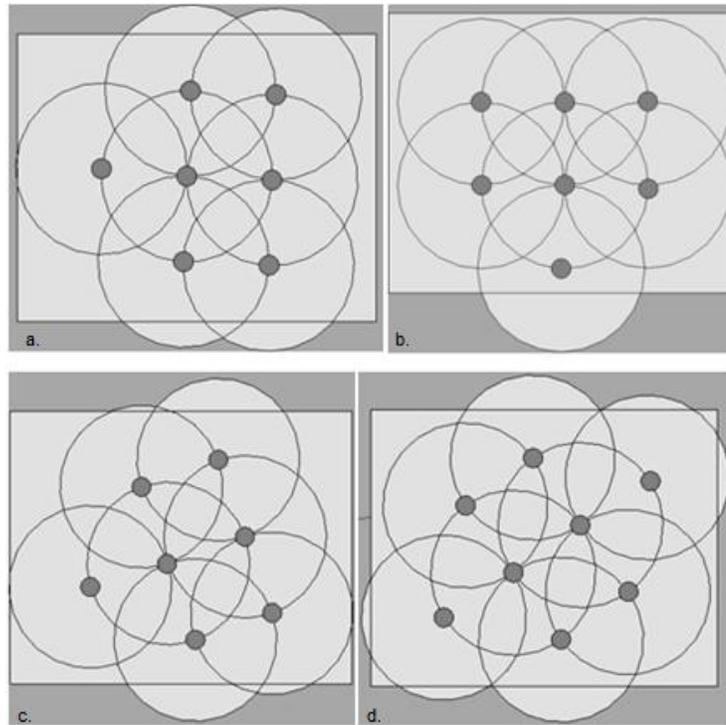


Figura 48 Diferentes alineaciones del arreglo cuadrado de los parlantes en el techo, con solapamiento mínimo.

En la figura 48d se muestran ocho parlantes distribuidos. Esto es debido a que ocho es la cantidad óptima en este espacio y para este tipo de distribución. Si bien el número calculado fue 7.02, el diseñador puede variar este valor si observa que esto mejora el diseño o se adapta mejor a las dimensiones del local.

6.3.4 Arreglo hexagonal

$$N = \frac{2S}{3r^2\sqrt{3}} = \frac{2 * 42.05}{3(1.73^2)\sqrt{3}} = 5,4$$

Al aproximar este resultado a 6 y a 5 respectivamente, se obtiene lo mostrado en la figura siguiente:

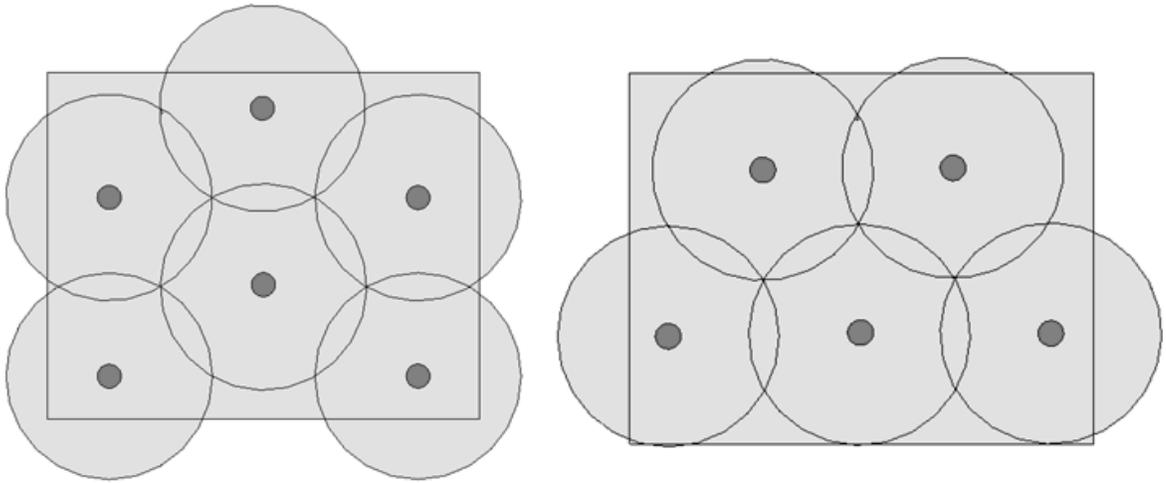


Figura 49 Distribución hexagonal, solapamiento mínimo.

6.4 Distribución borde con borde

Este tipo de distribución requiere el mínimo número de parlantes conectados, ya que no existe solapamiento.

6.4.1 Distribución cuadrada

$$N = \frac{S}{4 * r^2} = \frac{42,05}{4 * 1,73^2} = 3,51$$

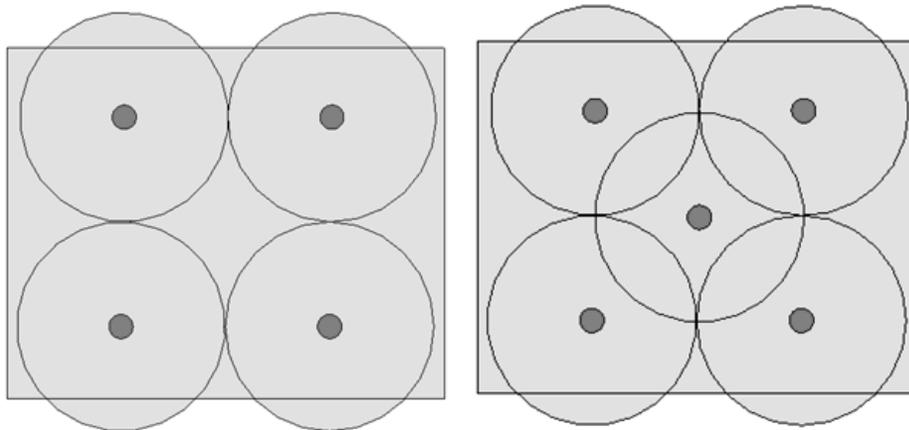


Figura 50 Distribución cuadrada, borde con borde. A la distribución de la derecha se le agregó un parlante más para mejorar la uniformidad sonora en el centro.

6.4.2 Distribución hexagonal

$$N = \frac{S}{2\sqrt{3}r^2} = \frac{42,05}{10,36} = 4,05$$

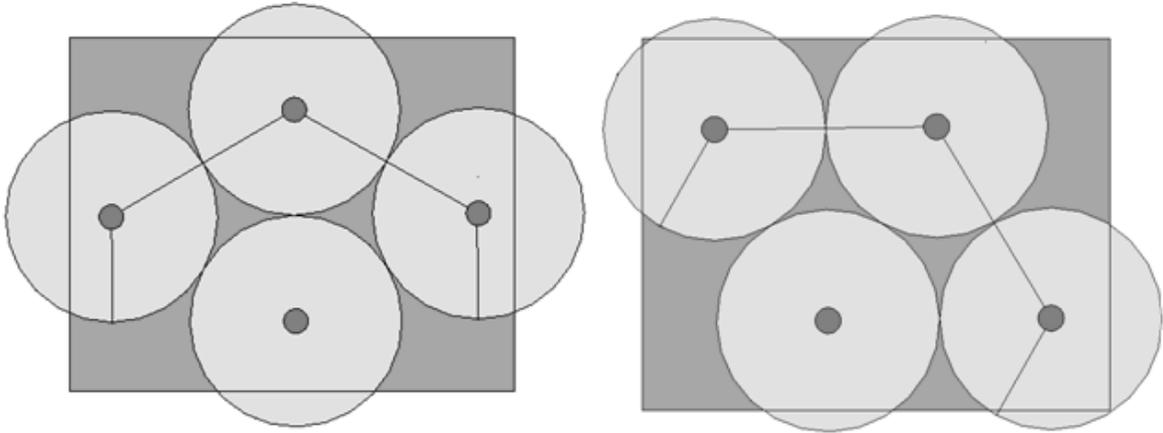


Figura 51 Distribución hexagonal, borde con borde.

Estos tipos de distribuciones están sujetos a cambios en el número de parlantes. En algunos casos, el número de parlantes distribuidos calculados y el área no son 100% acoplables; esto se debe a las características propias del local, como el caso en que dos salones de diferente geometría, uno cuadrado y el otro rectangular, pueden tener áreas iguales. En estos casos el número de parlantes distribuidos en los techos puede variar del calculado al instalado.

6.5 Cálculo de la potencia eléctrica consumida por los parlantes

6.5.1 Ejemplo 1.

Para los cálculos de los parámetros fundamentales del diseño se partirá de un espacio de 7,25 m de largo, 5,8 m de ancho por 2,7 de alto. Para este caso se utilizará un parlante con sensibilidad $S(1m, 1 w)$ de 80 dB y un ángulo de cobertura de 90°. Lo siguiente es determinar la potencia eléctrica con la que se alimenta el parlante para obtener un nivel de presión sonora de 75 dB en el oyente más alejado (Figura 52). Como dato adicional, se considera que el coeficiente de absorción promedio del aula es de 0,2.

En la figura 52 se observa la altura del salón, la altura del oyente y la distancia hacia el oyente más alejado (P) desde el parlante.

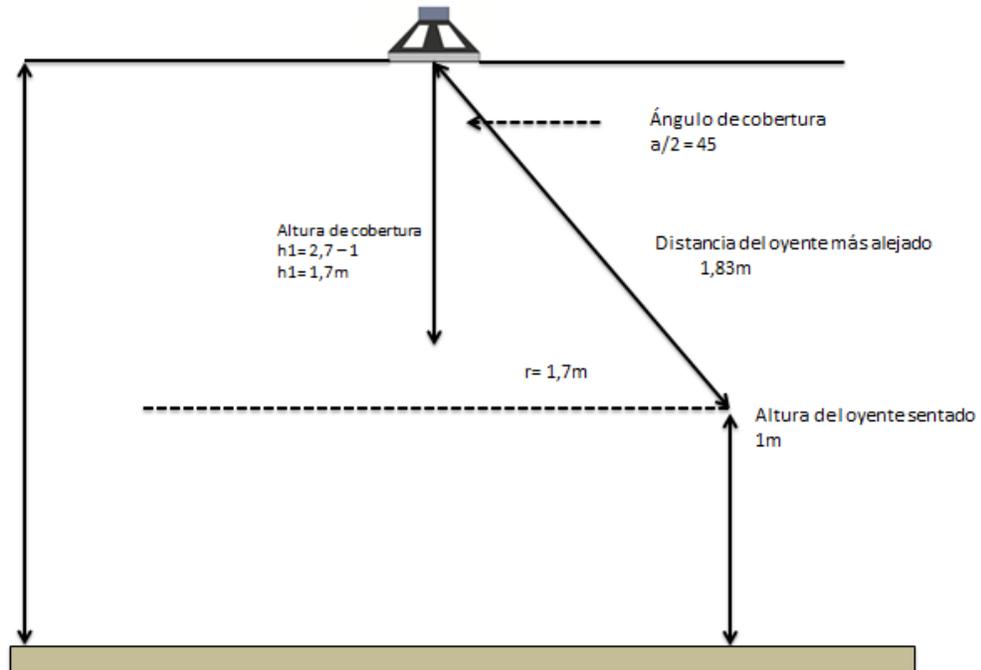


Figura 52 Distancia del parlante al oyente más alejado con su respectiva geometría.

Se puede hallar el nivel de presión sonora en un punto alejado a una distancia d_2 y utilizando una potencia eléctrica PE :

$$Lp(a)(d_2) = S_a + 10 \log PE - 20 \log d_2$$

De donde es posible despejar la potencia eléctrica necesaria (EPR) para obtener:

$$EPR = 10^{(Lp(a)(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

en donde:

- $Lp(a)(d_2)$ es la presión sonora del altavoz sobre el punto (oyente).
- d_2 es la distancia en metros al punto (oyente).
- S_a la sensibilidad del parlante.

Utilizando esta fórmula se puede calcular la potencia eléctrica en función de la distancia y del nivel de presión sonora.

En este caso se necesita de un nivel de presión sonora de 75 dB en un punto situado a 1.7 metros alineado con eje central. Además, se conoce la sensibilidad del parlante, que es de 80 dB. La potencia eléctrica requerida por el parlante será, entonces:

$$EPR = 10^{(L_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(75 - 80 + 20 \log 1,7) / 10}$$

$$EPR = 0.91 W$$

El resultado obtenido corresponde a la potencia requerida en un punto situado en la misma dirección del eje central del parlante. Sin embargo, si se observa detenidamente, se ve que el punto *P* se encuentra situado en el borde del cono y, como se sabe que en este punto el nivel de presión sonora disminuye 3dB con respecto al eje central, el cálculo se debe realizar con un nivel de presión sonora de 78dB, para compensar esta caída de presión sonora percibida.

$$EPR = 10^{(78 - 80 + 20 \log 1,7) / 10}$$

$$EPR = 1.82 W$$

El anterior valor, determina la potencia mínima que requiere el parlante a la hora de su selección para su instalación.

El paso siguiente es escoger el tipo de distribución que se va a utilizar en el salón de clases. Este aspecto depende en gran medida de las especificaciones técnicas requeridas por el cliente y por el criterio del diseñador. En este caso se escoge un arreglo hexagonal con solapamiento mínimo, que ofrece un equilibrio entre número de parlantes y variación de nivel de presión sonora en la zona cubierta.

Según los cálculos de este tipo de distribución,

$$N = \frac{2 * A}{3r^2\sqrt{3}} = \frac{2 * 42.05}{3(1,73^2)\sqrt{3}} = 5,4$$

Aproximando a 6, para cubrir un espacio mayor con las ondas sonoras directas producidas por los parlantes, la potencia eléctrica consumida por los 6 parlantes quedaría:

$$6 * 1.82 = 10.92 W$$

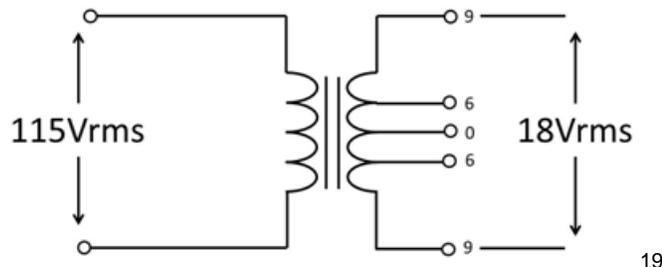
Cabe aclarar que este resultado corresponde a la potencia requerida por los seis parlantes sin tener en cuenta las pérdidas en los devanados de los transformadores.

6.5.2 Distribución de la red eléctrica

En esta etapa se utiliza la distribución en alta impedancia explicada anteriormente, pues se desea que las pérdidas en la línea sean prácticamente nulas. En alta impedancia se debe insertar a la salida del amplificador un transformador elevador que aumente la tensión de ataque a la línea a valores de 50 o 100V. La señal de audio solo alcanzará el valor nominal de 100V o 50V en el momento en que el amplificador entregue la máxima potencia.

Por cada altavoz se necesita un transformador reductor que disminuya la tensión de ataque y al mismo tiempo mantenga una alta impedancia vista desde la línea.

Para el presente ejemplo, no se tendrá en cuenta, por ahora, el voltaje de línea de 50 o 100 V. Inicialmente, se partirá de un transformador reductor como el mostrado en la figura 54b, el cual tiene una potencia nominal de 12 W y es conectado a una impedancia de entrada de 8 ohmios. Cada parlante tiene una Impedancia de carga de 4 ohmios y una potencia máxima de 2W.



19

Figura 53 Voltaje en bornes de transformador.

¹⁹ ACEVEDO, David. Trabajo de grado: Amplificación, preamplificación y procesamiento de señales de audio. Universidad Pontificia Bolivariana. 2011. 196 p

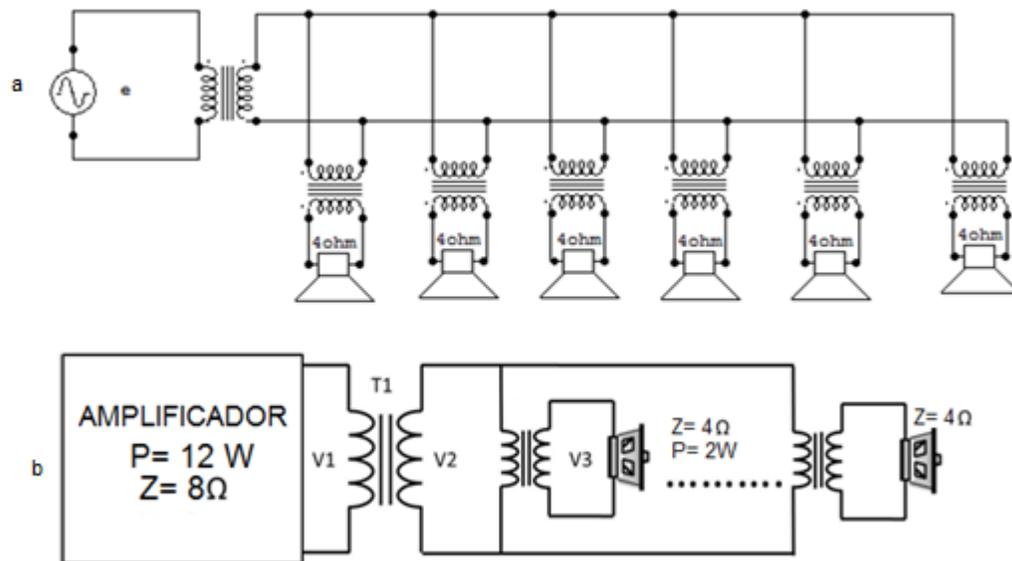


Figura 54 a. Diagrama de distribución eléctrica. b. Diagrama para acople de impedancia.

La relación de transformación “m” varía de acuerdo con las salidas que se tomen a la salida del transformador.

Utilizando los bornes 9-9 se obtiene:

$$m_9 = \frac{18}{115} = 0.1565$$

El voltaje V3, presente en los bornes de cada altavoz, se obtiene por medio de:

$$V_3 = \sqrt{P_3 * Z_3} = \sqrt{2 * 4} = 2.82 \text{ Vrms}$$

El voltaje V2, presente en la red de distribución, será:

$$V_2 = \frac{V_3}{\alpha_2} = \frac{2.82}{0.1565} = 18 \text{ Vrms}$$

La relación de transformación del reductor:

$$m_{\text{reductor}} = \frac{V_3}{V_2}$$

$$m_{\text{reductor}} = 0.1565$$

La impedancia vista desde el primario de cada uno de los transformadores de la red, que se llamará Z_2 , estará dada por:

$$Z_2 = \frac{Z_3}{\alpha^2} = \frac{4}{0.1565^2} = 163\Omega$$

La impedancia equivalente de los seis altavoces de la red es igual a Z_2' , que es:

$$Z_2' = \frac{Z_2}{6} = \frac{163}{6} = 27.16 \Omega$$

Por lo tanto la relación de transformación de T1 es:

$$m_1 = \sqrt{\frac{Z_2'}{Z_1}} = \sqrt{\frac{27.16}{8}} = 1.84$$

Se observa que T1 tiene una relación de transformación igual a 1.84; además, debe ser capaz de entregar una potencia de por lo menos 12 W con los siguientes valores de voltajes en bornes:

$$V_1 = \sqrt{P_1 * Z_1} = \sqrt{12 * 8} = 9.79 \text{ Vrms}$$

$$V_2 = m_1 * V_1 = 1.84 * 9.79 = 18 \text{ Vrms}$$

En el caso anterior, se ha partido de un amplificador de 12 Watt de potencia y de un transformador elevador. En el siguiente ejercicio, se utilizarán los valores reales de la red; luego se contrastarán los dos casos.

6.6. Ejemplo 2. Dimensionamiento del transformador

Se tomarán los mismos valores del ejemplo 1, con la diferencia de que en este caso, no se partirá de un transformador reductor conocido sino que se hallará la relación de transformación necesaria para hacer funcionar el sistema.

Dado que se trata de una red de alta impedancia, el voltaje V_2 se elegirá de 50V. El voltaje V_3 , por su parte, se calcula partiendo de la impedancia y de la potencia nominal del altavoz, de la siguiente manera:

$$V_3 = \sqrt{P_3 * Z_3} = \sqrt{1.82W * 4\Omega} = 2.7 \text{ Vrms}$$

Con estos datos se calcula la relación de transformación.

$$m_{\text{reductor}} = \frac{V_3}{V_2}$$

$$m_{\text{reductor}} = \frac{2.7}{50}$$

$$m_{\text{reductor}} = 0.054$$

La impedancia vista desde el primario de cada uno de los transformadores de la red se llama Z_2 y está dada por:

$$Z_2 = \frac{Z_3}{m_2^2} = \frac{4\Omega}{0.054^2} = 1371\Omega$$

La impedancia equivalente de los diez altavoces de la red, Z_2' , es:

$$Z_2' = \frac{Z_2}{10} = \frac{1371\Omega}{6} = 228 \Omega$$

Por lo tanto la relación de transformación de T1 es:

$$m_1 = \sqrt{\frac{Z_2'}{Z_1}} = \sqrt{\frac{228}{8}} = 5.345$$

De modo didáctico, se obtendrán los parámetros del transformador teniendo en cuenta la potencia máxima nominal del amplificador utilizado; esto se hace para proporcionar un rango de libertad al operario que manipule el sistema de sonorización mediante los controles del amplificador, sin dañar el transformador.

En este caso no se tuvo en cuenta la eficiencia del transformador. A

continuación, se recalculan los valores de la relación de transformación y voltajes en bornes teniendo en cuenta la eficiencia y los valores máximos reales, para encontrar las especificaciones mínimas con miras a la selección de los transformadores.

6.6.1 Dimensionamiento del transformador, teniendo en cuenta la eficiencia de los transformadores

La eficiencia del transformador elevador y del reductor (T1 y T2) se estima en 0,9 (90% de eficiencia). La red se analiza en dos etapas, que están determinadas por los transformadores elevador y reductor. Como todos los transformadores reductores están conectados en paralelo, el análisis se puede realizar inicialmente como si se tratara solamente de dos etapas: La de T1 y la de un solo transformador T2. En estas condiciones, se puede iniciar el cálculo con la potencia requerida por un solo parlante (1.82W).

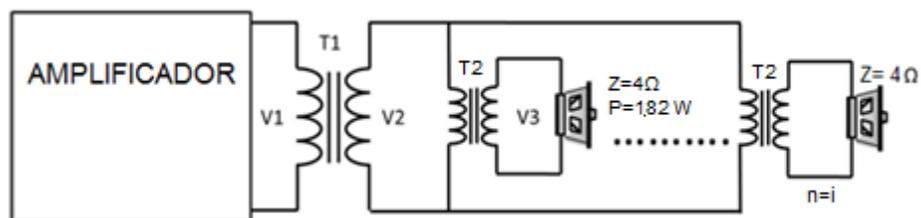


Figura 55 Esquema eléctrico del ejercicio

Una consideración adicional a tener en cuenta es la eficiencia combinada, η_{red} , de varias etapas en cascada, como se muestra a continuación.

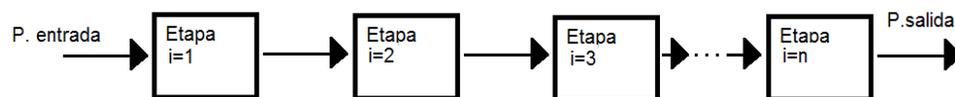


Figura 56 Eficiencia equivalente de una red en cascada

Como se sabe, esta eficiencia combinada es el producto de las eficiencias individuales, por lo que, para el caso del presente desarrollo, se tendrá:

$$\eta_{red} = \eta_1 \eta_2$$

$$\eta_{\text{red}} = 0.9 * 0.9$$

$$\eta_{\text{red}} = 0.81$$

La potencia requerida en la entrada de la red será, entonces:

$$P_{\text{entrada}} = \frac{P_{\text{salida}}}{\eta_{\text{red}}} \quad P_{\text{entrada}} = \frac{1.82}{0.81} \quad P_{\text{entrada}} = 2.24 \text{ W}$$

Y la potencia total requerida por los seis parlantes, será:

$$P_{\text{requerida}} = 6 * 2.24 \text{ W} = 13.48 \text{ W}$$

Por su parte, el voltaje en bornes del altavoz será:

$$V_3 = \sqrt{P_3 * Z_3} = \sqrt{1.82 * 4} = 2.7 \text{ Vrms}$$

Y la relación de transformación queda así:

$$m_{\text{reductor}} = \frac{V_3}{V_2}$$

$$m_{\text{reductor}} = \frac{2.7}{50}$$

$$m_{\text{reductor}} = 0.054$$

Como es lógico, la eficiencia también afecta la potencia del transformador reductor, la cual queda

$$P_{\text{reductor}} = \frac{EPR}{0.9} = 2.02 \text{ W}$$

Por otra parte, la impedancia Z2 se convierte en

$$Z2 = \frac{Z3}{\alpha^2} = \frac{4}{0.054^2} = 1371\Omega$$

La impedancia equivalente de los seis altavoces de la red, Z2' será:

$$Z2' = \frac{Z2}{n} = \frac{1371\Omega}{6} = 228 \Omega$$

Por lo tanto la relación de transformación de T1 es:

$$m1 = \sqrt{\frac{Z2'}{Z1}} = \sqrt{\frac{228}{8}} = 5.33$$

Haciendo unos cálculos similares, se encuentra que T1 debe manejar una potencia de por lo menos 13.48 W, su relación de transformación será igual a 5.33 y los voltajes en bornes serán:

$$V1 = \sqrt{P1 * Z1} = \sqrt{13.48W * 8\Omega} = 10.38 \text{ Vrms}$$

$$V2 = \alpha1 * V1 = 5.33 * 10.38\text{Vrms} = 55.35 \text{ Vrms}$$

Los anteriores cálculos dan como resultado los parámetros mínimos para el correcto funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta la eficiencia del sistema:

Impedancia de los parlantes	4 Ω
Potencia de cada parlante	1.82 W
Potencia del amplificador	13.48 W
Impedancia del amplificador	8 Ω
Potencia de T1 (elevador)	13.48 W
Relación de transformación del transformador elevador	5.33
Potencia de los transformadores reductores	2.02W
Relación de transformación del transformador reductor	0.053

CAPÍTULO 7: PASOS PARA LA APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE UN SISTEMA DE SONORIZACIÓN.

La metodología utilizada comprende los siguientes pasos:

1. Se sectorizan los espacios y se acuerda con el usuario en cuáles de ellos se desea implementar el sistema de sonorización.
2. Se identifica el uso que se le dará al espacio a sonorizar. Este aspecto define el tiempo de reverberación ideal (T_{60}) y determina si el recinto requiere acondicionamiento acústico. El usuario es quien establece el uso que le dará a cada recinto; a partir de esta información, se deduce el tiempo de reverberación requerido, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 6. Por ejemplo, si el usuario desea utilizar el espacio para reproducir música coral y sacra, se debe adecuar el espacio con un T_{60} de hasta 2.3 segundos. La siguiente tabla muestra los rangos de T_{60} óptimos para diversos usos de la sala:

Tabla 6 Rango de tiempo de reverberación ideal dependiendo del uso de la sala a sonorizar

Uso de la sala	T_{60} (s)
Teatro y palabra hablada	0.4 - 1
Música de cámara	1 - 1.4
Música orquestal	1.5
Ópera	1.6 - 1.8
Música coral y sacra	hasta 2.3

3. Una vez determinado el uso que se le dará al recinto, y el valor máximo de T_{60} , se procede a examinar las superficies internas y a identificar los tipos de materiales que las componen. Hecho esto, se procede a averiguar el coeficiente de absorción de cada material, lo cual puede consultarse en una base de datos (como la suministrada por Fonac, que es una empresa proveedora de materiales para el tratamiento y acondicionamiento acústico: <http://sonoflex.com/fonac/datos-utiles-coeficientes-de-absorcion-acustica-comparativa/>)
4. Se procede a calcular el tiempo de reverberación del espacio a tratar.

Luego, se compara con el rango ideal y se realiza el acondicionamiento acústico, en caso de ser necesario.

5. Se determina el máximo nivel de variación de presión sonora (ΔL_p) deseado. Teniendo en cuenta que una menor cantidad en el valor de este parámetro implica un mayor número de parlantes, lo que mejora la experiencia sonora pero aumenta el valor total de la obra, se le pregunta al usuario la cantidad de variación deseada, según la siguiente tabla:

Tabla 7 Distribución, arreglo y variación de presión sonora

DISTRIBUCION	ARREGLO	ΔL_p
Centro con centro	Cuadrado	1.39
	Hexagonal	1.17
Solapamiento mínimo	Cuadrado	2.04
	Hexagonal	2.59
Borde con borde	Cuadrado	4.35
	Hexagonal	5.4

6. Se determina el ángulo de cobertura de los altavoces disponibles.
7. Se halla la cantidad de altavoces requeridos, utilizando la ecuación mostrada en la tabla No5. Para el desarrollo de la fórmula se requiere el valor de la sumatoria de las superficies, 'S', del radio de cubrimiento 'r'.
8. Una vez determinado el tipo de distribución y la cantidad de altavoces se procede a determinar la magnitud de la presión sonora del ruido ambiente. Para este propósito se mide la presión sonora del espacio a tratar en diferentes momentos y en horas de movilidad pico, y se realizan los cálculos con la medida del valor máximo.
9. Se calcula la potencia eléctrica necesaria en los altavoces para lograr el cubrimiento acústico en el punto más alejado del cono sonoro.
10. Se realizar el diseño de un sistema de distribución eléctrica en alta impedancia. Con esto, se conoce la cantidad de transformadores.
11. Se calcula la potencia total requerida por parte del sistema para la selección de los amplificadores, teniendo en cuenta las pérdidas por eficiencia de los transformadores en condiciones de trabajo óptimo, esto es, que el mensaje sonoro supere al ruido ambiente en 25 dB.

Al final de este proceso queda definido lo siguiente:

- Espacios a sonorizar y el tipo de mensaje sonoro que será transmitido por el sistema.
- Áreas que requieren acondicionamiento acústico.
- Diseño de la red de distribución de alta impedancia.
- Tipo y cantidad de parlantes y transformadores utilizados.
- Transformador general utilizado, con base a la potencia requerida por el sistema.

Obtención de los parámetros a considerar para el diseño aplicados a este trabajo.

Coefficiente de absorción:

Después de identificar los materiales que componen el espacio a tratar, se consultan sus coeficientes de absorción en una base de datos como la suministrada por Fonac.

Tiempo de reverberación.

Conforme al desarrollo de la metodología aplicada al edificio en cuestión, se utiliza la fórmula de T_{60} de Sabine expuesta en el apartado 1.14.

Relación señal a ruido.

Tal como lo expuesto en el apartado 1.19, se considera que el nivel de presión sonora debe estar 25 dB por encima del ruido ambiente para el entendimiento del mensaje sonoro.

Criterio para selección de altavoces.

Los parámetros utilizados para la selección de los altavoces en el presente trabajo son:

Ángulo de cobertura: Determina la cantidad de parlantes que necesita el o los espacios a sonorizar. Entre mayor sea el ángulo de cobertura menor será el número de parlantes utilizados, y entre menor sea número de parlantes menor será la potencia del amplificador.

Sensibilidad: Determina la presión sonora capaz de generar el altavoz con una señal de prueba a una distancia determinada; en la medición estandarizada de la sonoridad, la señal de prueba tiene una potencia de 1 W y la distancia de prueba es un metro. Dicho de otra forma, se alimenta el altavoz con una señal de 1 W y, con la ayuda de un sonómetro ubicado a un metro y en dirección del eje central, se mide la presión sonora generada.

Este parámetro influye considerablemente en la potencia que debe suministrar el amplificador, pues a mayor sensibilidad menor es la potencia requerida. El inconveniente es que, como es de esperar, los parlantes de alta sensibilidad tienen los precios más altos.

Potencia eléctrica necesaria: Determina la cantidad de potencia eléctrica que necesita el altavoz para suministrar el nivel de presión sonora deseado. Este valor es la potencia nominal mínima.

Impedancia de carga: Influye directamente en el voltaje en bornes de los altavoces y transformadores y por lo tanto en su relación de transformación.

Ubicación y distribución de los parlantes: El tipo de distribución de los parlantes y el arreglo a utilizar dependen de una decisión del usuario, pues, como se dijo en el punto 5 de la metodología expuesta, la distribución y el arreglo quedan determinados por el máximo nivel de variación de presión sonora deseado.

Relación entre potencia eléctrica y presión sonora: La presión sonora depende del elemento final del sistema, el parlante. Se utiliza la fórmula de potencia eléctrica necesaria por el altavoz.

La fórmula a tratar tiene en cuenta la sensibilidad del parlante y la distancia en el eje central del oyente para determinar la potencia eléctrica de la señal que genere la variación de presión sonora deseada.

Distribución de las impedancias para máximo aprovechamiento de la potencia: En estos diseños es habitual tener un número considerable de parlantes, por lo tanto se utilizará distribución de alta impedancia para disminuir las pérdidas en línea. El máximo aprovechamiento de la potencia consiste en disminuir las pérdidas en los elementos del sistema, lo cual queda cubierto con esta configuración. Las pérdidas inherentes a eficiencias de transformadores quedan tratadas en el desarrollo de la metodología.

7.1 Cálculo para los espacios a sonorizar.

Salones de clase

Como todos los salones de clases del edificio J son iguales en su geometría y cuentan con los mismos materiales de construcción, no habrá diferencia en los valores obtenidos en el diseño de cada uno; por lo tanto se aprovechará el análisis individual del J402 para aplicarlo al resto de salones de clases.

La fórmula para el coeficiente de absorción promedio $\bar{\alpha}$ es:

$$(\bar{\alpha}) = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i * \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

En este cálculo se consideran las superficies internas del local con todos sus coeficientes de absorción. Se utiliza una tabla como la que se muestra a continuación, en la cual se reúnen estos requisitos, y se calcula $\bar{\alpha}$.

Tabla 8 Cálculo de absorción promedio. J402

J402	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlizado	42.05	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	techo falso	42.05	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76	
P A R E D E S	1	Ladrillo visto	10.51	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
		Rejilla de ventilación	1.3326	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
		vidrio	1.0032	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		puerta de aluminio	2.2288	0.15	0.1	0.06	0.08	0.1	0.05
		Ladrillo visto	17.56	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
	2	Vidrio	7.7736	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		Rejilla de ventilación	3.8025	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	3	Ladrillo visto	1.9929	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
		Ladrillo visto	19.17	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
	4	Ladrillo visto	26.32	0.24	0.32	0.39	0.44	0.43	0.36
		pupitres (28)	-	-	-	-	-	-	-
	superficies representativas	-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		26.501	27.303	34.549	43.752	46.835	47.922	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.1507	0.1553	0.1965	0.2489	0.2664	0.2726	

Para el cálculo del tiempo de reverberación se utilizará el $\bar{\alpha}$ de la frecuencia de 1000 Hz (por ser una frecuencia central en el rango musical) y el volumen del salón, que es área de la base del piso por su altura. Esto se calcula así:

$$TR_{60} = \frac{0.161 * V}{S * \bar{\alpha}_s} [s]$$

Para facilitar la aplicabilidad de la fórmula, se utiliza la tabla 7:

Tabla 9 Cálculo de tiempo de reverberación. J402

DIMENSIONES J402		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	175.7936	α a 1000Hz		0.25
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0.26
ALTURA	1.67			

El radio de cubrimiento se calcula así:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$
$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$
$$r = 1.67m$$

En el caso que se desea minimizar el valor de la instalación, entre las distribuciones con solapamiento mínimo y borde con borde, ambas con un único parlante por célula, se elige la última, porque es la que mayor área cubre y, por lo tanto, la que requiere menor número de parlantes.

Distribución borde con borde, arreglo cuadrado:

$$A_c = 4r^2$$
$$A_c = 4 * 1.67^2$$
$$A_c = 11.16 m^2$$

El número de parlantes para esta zona es:

$$N = A \frac{n}{A_c}$$
$$N = 41.89 \frac{1}{11.16}$$
$$N = 3.75 \approx 4$$

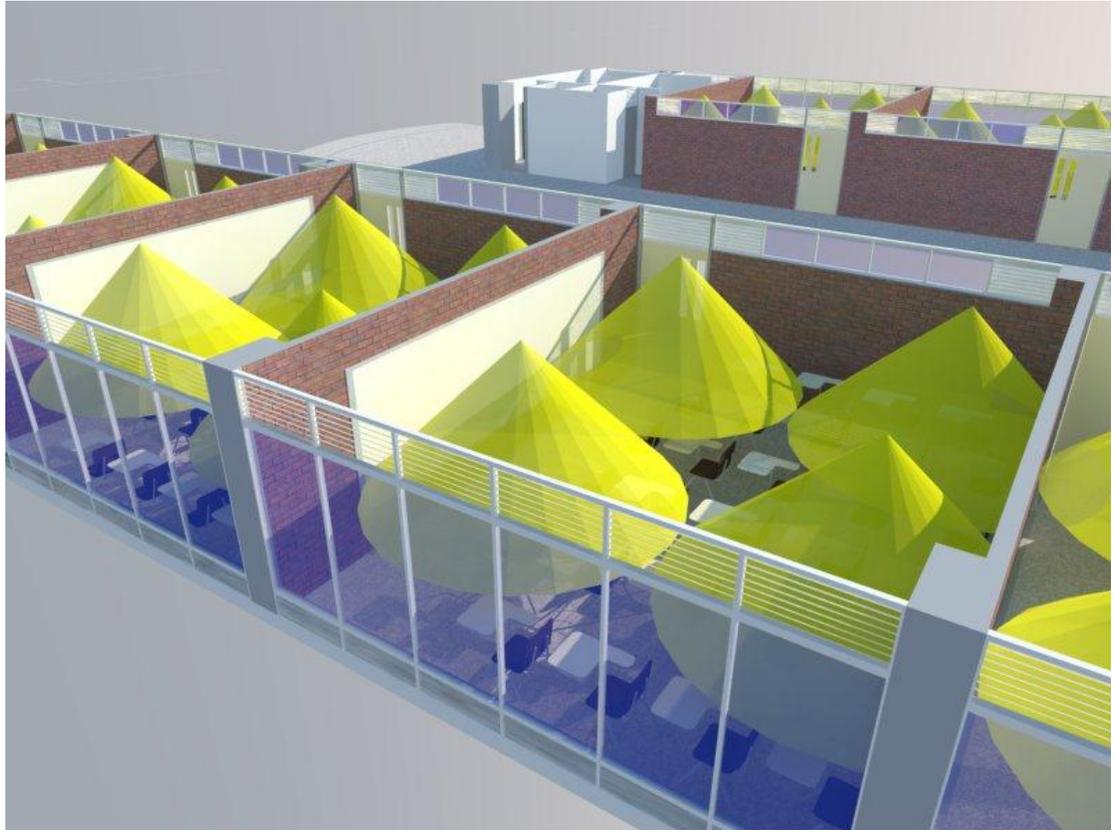


Figura 57 Distribución borde con borde cuadrado

Número de parlantes, distribución de células borde con borde en forma hexagonal:

$$N = \frac{A}{2\sqrt{3} r^2}$$
$$N = \frac{41.89}{2\sqrt{3} 1.67^2}$$
$$N = 4.33$$

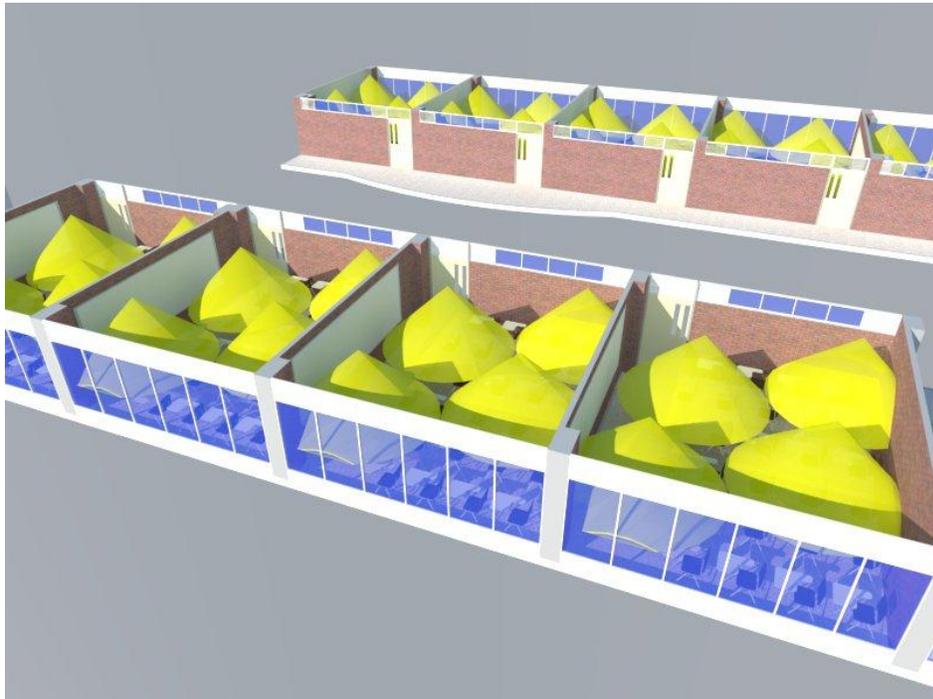


Figura 58 Distribución borde con borde, geometría hexagonal.

7.1.2 Potencia eléctrica necesaria

Se calcula la potencia eléctrica necesaria, EPR, como aquella potencia eléctrica proporcionada a los altavoces para que en la zona de audiencia se obtenga el nivel de presión sonora especificado. Ya se sabe que esta potencia se calcula a partir de la expresión

$$EPR = 10^{(L_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

Como ya se dijo, para garantizar que el mensaje sonoro sea entendido por los oyentes, el nivel de presión sonora en el punto ($L_{p(a)}$) debe estar como mínimo 25 dB por encima del nivel ruido ambiente $L_{p(n)}$.

Este nivel se determina con la ecuación vista en el apartado de relación señal a ruido

$$L_{p(a)} \geq L_{p(n)} + 25dB$$

El $L_{p(n)}$ que se obtuvo en mediciones prácticas por medio de un sonómetro es de 55 dB.

$$L_{p(a)} \geq 55dB + 25dB$$

$$L_{p(a)} = 80 dB$$

Sin embargo, 80 dB en el eje central no son suficientes para garantizar el entendimiento del mensaje sonoro, pues existe una pérdida de -3 dB en la parte exterior del cono de cobertura, tal como se observa en la figura 12.

Para garantizar que el mensaje sonoro sea recibido y entendido por el oyente situado en la parte exterior del cono, se debe calcular la potencia eléctrica necesaria con un nivel de presión sonora $L'_{p(a)}$, que es igual a:

$$L'_{p(a)} = L_{p(a)} + 3 dB$$

En este caso:

$$L'_{p(a)} = 80dB + 3dB$$

$$L'_{p(a)} = 83 dB$$

La potencia eléctrica necesaria, quedaría reformulada como:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

Utilizando un parlante con sensibilidad de 80dB (1m, 1W):

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.67)) / 10}$$

$$EPR = 5.56 W$$

La anterior es la potencia eléctrica necesaria para un solo altavoz.

La potencia total requerida en este espacio es:

$$P_T = N * EPR$$

$$P_T = 4 * 5.56 W$$

$$P_T \approx 22 \text{ W}$$

Potencia eléctrica necesaria considerando pérdidas en los transformadores.

El conjunto de parlantes requiere 22 W, sin embargo, este valor de potencia requerida no está teniendo en consideración las pérdidas presentes en los transformadores ni las pérdidas en la línea, por ser una configuración en alta impedancia.

El presente ejercicio se analizará el ejercicio con transformadores con eficiencias del 90% y la distribución de los transformadores será la mostrada en la figura 59.

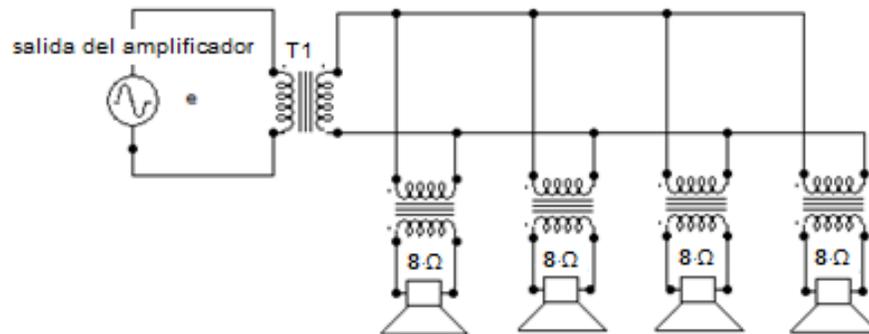


Figura 59 Distribución de los transformadores, y conexión de los altavoces.

Entonces:

$$\eta_{\text{red}} = \eta_1 \eta_2$$

$$\eta_{\text{red}} = 0.9 * 0.9$$

$$\eta_{\text{red}} = 0.81$$

Potencia de entrada a T1, requerida considerando pérdidas en la red elevador-reductor:

$$P_{entrada} = \frac{P_{salida}}{\eta_{red}}$$

$$P_{entrada} = \frac{22W}{0.81}$$

$$P_{entrada} = 27.16 W$$

La potencia del secundario del transformador reductor vista desde su primario.

$$P_{requerida \text{ por parlante, considerando perdidas en el transformador reductor}} = \frac{P_{salida}}{\eta_{T.reductor}}$$

$$P_{requerida \text{ por parlante, considerando perdidas en el transformador reductor}} = \frac{5.56}{0.9} = 6.17 W$$

El voltaje en bornes del altavoz:

$$V3 = \sqrt{P3 * Z1} = \sqrt{6.17 * 4} \approx 4.96 \text{ Vrms}$$

El voltaje V2 será, 50 V, por valor normalizado configuración en alta impedancia.

$$V2 = 50 V$$

La relación de transformación del transformador reductor:

Se conoce que el voltaje de línea de alta (V2) es de 50 V, V3 se calcula partiendo de la impedancia y la potencia nominal del altavoz.

$$m_{reductor} = \frac{V3}{V2}$$

$$m_{reductor} = \frac{4.96}{50}$$

$$m_{\text{reductor}} = 0.099$$

La impedancia vista desde el primario de cada uno de los transformadores de la red la llamaremos Z_2 y estará dada por:

$$Z_2 = \frac{Z_3}{\alpha^2} = \frac{4}{0.099^2} = 406.47\Omega$$

La impedancia equivalente de los cuatro altavoces de la red, Z_2' es:

$$Z_2' = \frac{Z_2}{4} = \frac{406.47}{4} = 101.61\Omega$$

Por lo tanto la relación de transformación de T1, suponiendo una impedancia de salida del amplificador de 4Ω , es:

$$m_1 = \sqrt{\frac{Z_2'}{Z_1}} = \sqrt{\frac{101.61}{4}} = 5.04$$

T1 debe manejar una potencia de por lo menos 27.16 W , su relación de transformación igual a 5.43 y los voltajes en bornes a la entrada.

$$V_1 = \sqrt{P_1 * Z_1} = \sqrt{27.16 * 4} = 10.42\text{Vrms}$$

$$V_2 = \alpha_1 * V_1 = 5.43 * 10.42 = 56.58\text{ Vrms}$$

(Sin pérdidas en el transformador).

Los anteriores cálculos, dan como resultado los parámetros mínimos para el correcto funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta la eficiencia del sistema.

Impedancia de parlantes:

8 Ω

Potencia de parlante:	5.56 W
Potencia del amplificador:	27.17 W
Impedancia del amplificador:	4 Ω
Potencia de T1 (elevador):	27.17 W
Relación de transformación del transformador elevador:	5.43
Potencia de los transformadores reductores:	6.17 W
Relación de transformación del transformador reductor:	0.13
Voltaje en bornes del transformador reductor	
Vsecundario	4.97 Vrms
Vprimario	50 Vrms
Voltaje en bornes del transformador elevador	
Vsecundario	50 Vrms
Vprimario	10.42 Vrms

7.2 BIBLIOTECA

7.2.1 Sala de estudio No.1



Figura 60 Sala de estudio No.1

La sala de estudio No.1 de la biblioteca es un espacio cerrado donde las ondas sonoras son absorbidas en mayor medida por el techo falso. A continuación se presenta la tabla con su respectivo análisis:

Tabla 10 Cálculo de absorción promedio. Sala de estudio No. 1

Sala de estudio No.1		TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias					
				125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
PISOS		Enlozado	147.00	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035
TECHOS		techo falso	147.00	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76
1	paneles de madera	6.60	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11	
		vidrio	10.362	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
2	paneles de madera	19.14	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11	
		hormigón pintado	5.17	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
3	vidrio	29.48	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	
		hormigón pintado	17.16	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
4	hormigón pintado	21.4	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	
		vidrio	42	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
superficies representativas		mesas de madera	25.65	0.1	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03
		-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial		$\sum (S * \alpha_s)$	71.76	59.48	78.42	104.4	114.4	123	
coeficiente de absorción promedio		$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$	0.152	0.126	0.167	0.222	0.243	0.261	

Tabla 11 Cálculo de tiempo de reverberación. Sala de estudio No. 1

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	470,962	α a 1000Hz		0,21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0,68

Se utilizará distribución borde con borde al igual que el caso anterior para minimizar costos.

Para calcular el radio de cubrimiento de esta zona:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.67 \text{ m}$$

Área de cobertura borde con borde, geometría cuadrada:

$$Ac = 4r^2$$

$$Ac = 4 * 1.67^2$$

$$Ac = 11.15 m^2$$

Número de parlantes para esta zona:

$$N = S \frac{n}{Ac}$$

$$N = 146.97 \frac{1}{16}$$

$$N = 9.17$$

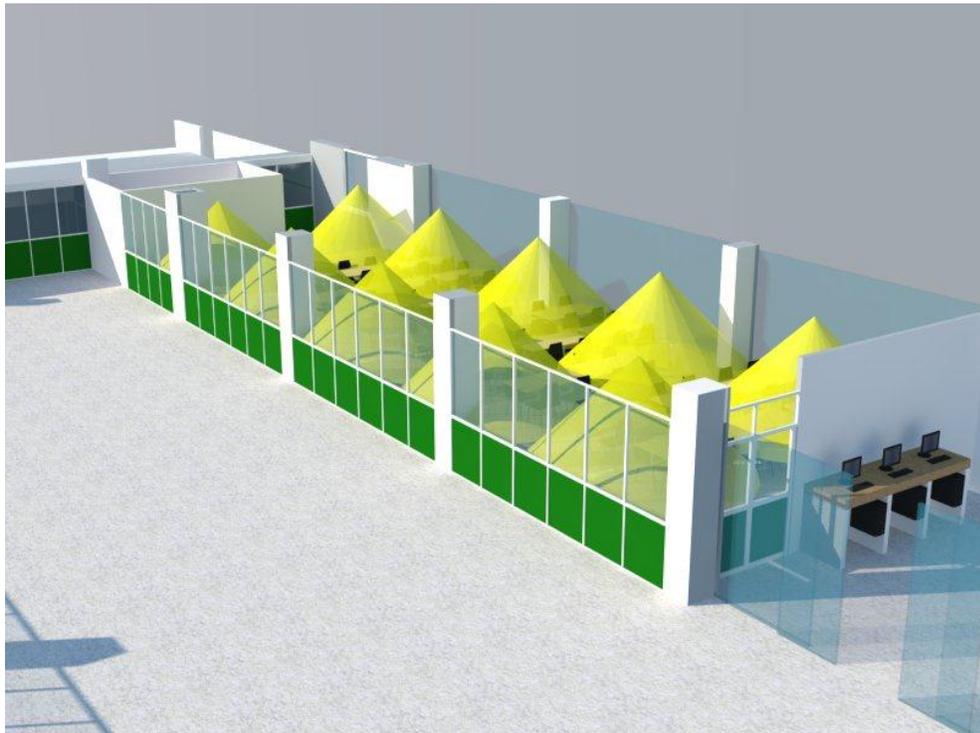


Figura 61 Distribución borde con borde, arreglo cuadrado.

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 \text{ W}$$

Potencia total requerida en este espacio es, sin pérdidas por transformadores:

$$P_T = N * EPR$$

$$P_T = 10 * 5.1 \text{ W}$$

$$P_T = 51 \text{ W}$$

En este caso, se analiza la red con porcentajes de eficiencias en los transformadores del 90% y la distribución de estos como la mostrada en la figura 62.

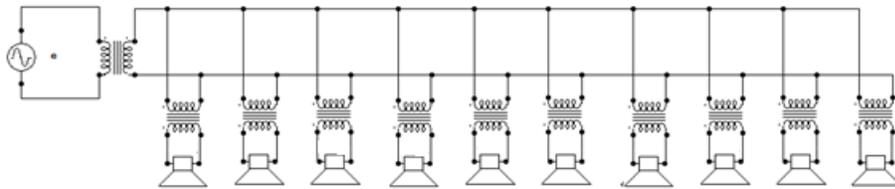


Figura 62 Distribución de los transformadores, conexión de los altavoces con impedancia de 8 ohmios. Sala de estudio No.1

Para efectos prácticos se utilizará en este caso un amplificador con una impedancia 4 ohm

Eficiencia de la red:

$$\eta_{red} = \eta_1 \eta_2$$

$$\eta_{red} = 0.9 * 0.9$$

$$\eta_{red} = 0.81$$

Potencia de la red:

$$P_{entrada} = \frac{P_{salida}}{\eta_{red}}$$

$$P_{entrada} = \frac{51 \text{ W}}{0.81}$$

$$P_{\text{entrada}} = 62.96 \text{ W}$$

Potencia del secundario del transformador reductor vista desde su primario:

$$P_{\text{secundario del transformador vista desde el primario}} = \frac{5.1}{\eta_{\text{T.reductor}}}$$

$$P_{\text{secundario del transformador vista desde el primario}} = \frac{5.1}{0.9} = 5.66 \text{ W}$$

El voltaje en bornes del altavoz:

$$V_3 = \sqrt{P_3 * Z_1} = \sqrt{5.66 * 4} = 5.95 \text{ Vrms}$$

El voltaje V2 será, 50 V, por valor normalizado configuración en alta impedancia.

$$V_2 = 50 \text{ V}$$

La relación de transformación del transformador reductor:

$$m_{\text{reductor}} = \frac{V_3}{V_2} \quad m_{\text{reductor}} = \frac{5.95}{50} \quad m_{\text{reductor}} = 0.119$$

La impedancia vista desde el primario de cada uno de los transformadores de la red se llamará Z2 y estará dada por:

$$Z_2 = \frac{Z_3}{\alpha^2} = \frac{8}{0.119^2} = 282.46 \Omega$$

La impedancia equivalente de los 10 altavoces de la red, Z2' es:

$$Z_2' = \frac{Z_2}{10} = \frac{282.46}{10} = 28.24 \Omega$$

Por lo tanto la relación de transformación de T1, suponiendo una impedancia de salida del amplificador de 4 Ω, es:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{Z_2'}{Z_1}} = \sqrt{\frac{28.24}{4}} = 2.65$$

T1 debe manejar una potencia de por lo menos 98.51 W, su relación de transformación igual a 2.79 y los voltajes en bornes a la entrada:

$$V_1 = \sqrt{P_1 * Z_1} = \sqrt{98.51 * 4} = 19.85 \text{ Vrms}$$

$$V_2 = \alpha_1 * V_1 = 2.65 * 19.85 = 52.6 \text{ Vrms}$$

(Sin pérdidas en el transformador).

parámetros mínimos para el correcto funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta la eficiencia del sistema

Impedancia de parlantes	8 Ω
Potencia de parlante	5.1 W
Potencia del amplificador	98.51 W
Impedancia del amplificador	4 Ω
Potencia de T1 (elevador)	98.51 W
Relación de transformación del transformador elevador	2.65
Potencia de los transformadores reductores	8.87 W
Relación de transformación del transformador reductor	0.119
Voltaje en bornes del transformador reductor	
Vsecundario	50 Vrms
Vprimario	5.96 Vrms
Voltaje en bornes del transformador elevador	
Vsecundario	50 Vrms
Vprimario	19.85Vrms

7.3 Biblioteca, sala de computadores No.1



Figura 63 sala de computadores No.1

Tabla 12 Cálculo del coeficiente de absorción promedio. Sala de computadores 1

Sala de computadores No.1		TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias					
				125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
PISOS		Enlozado	85.07	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035
TECHOS		techo falso	85.07	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76
P A R E D E S	1	paneles de madera	6.16	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		vidrio	14.13	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		hormigón pintado	8.61	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigón pintado	21.45	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		hormigón pintado	8.15	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	3	vidrio	28.79	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		hormigón pintado	14.82	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	4	vidrio	2.34	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
mesas de madera		20.7	0.1	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03	
superficies representativas		-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial		$\sum (S * \alpha_s)$		41.14	34.08	45	60.52	66.24	70.9
coeficiente de absorción promedio		$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.139	0.115	0.152	0.205	0.224	0.24

Tabla 13 Cálculo para el tiempo de reverberación. Sala de computadores No.1

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	295.29	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0.58

Para este caso se utiliza la distribución de células centro con centro y geometría cuadrada. Esta distribución requiere mayor número de parlantes pero, como ventaja, se obtiene una variación máxima en la zona cubierta menor que la de los casos anteriores, lo cual mejora la experiencia sonora aunque eleve los costos en comparación con la distribución borde con borde.

Radio de cobertura:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.6 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.6 \text{ m}$$

Área de cobertura:

$$Ac = 2r^2$$

$$Ac = 2 * 1.6^2$$

$$Ac = 5.12 \text{ m}^2$$

Número de parlantes (células centro con centro y geometría cuadrada):

$$N = \frac{A}{r^2}$$

$$N = \frac{85.07}{1.6^2}$$

$$N = 33.23$$

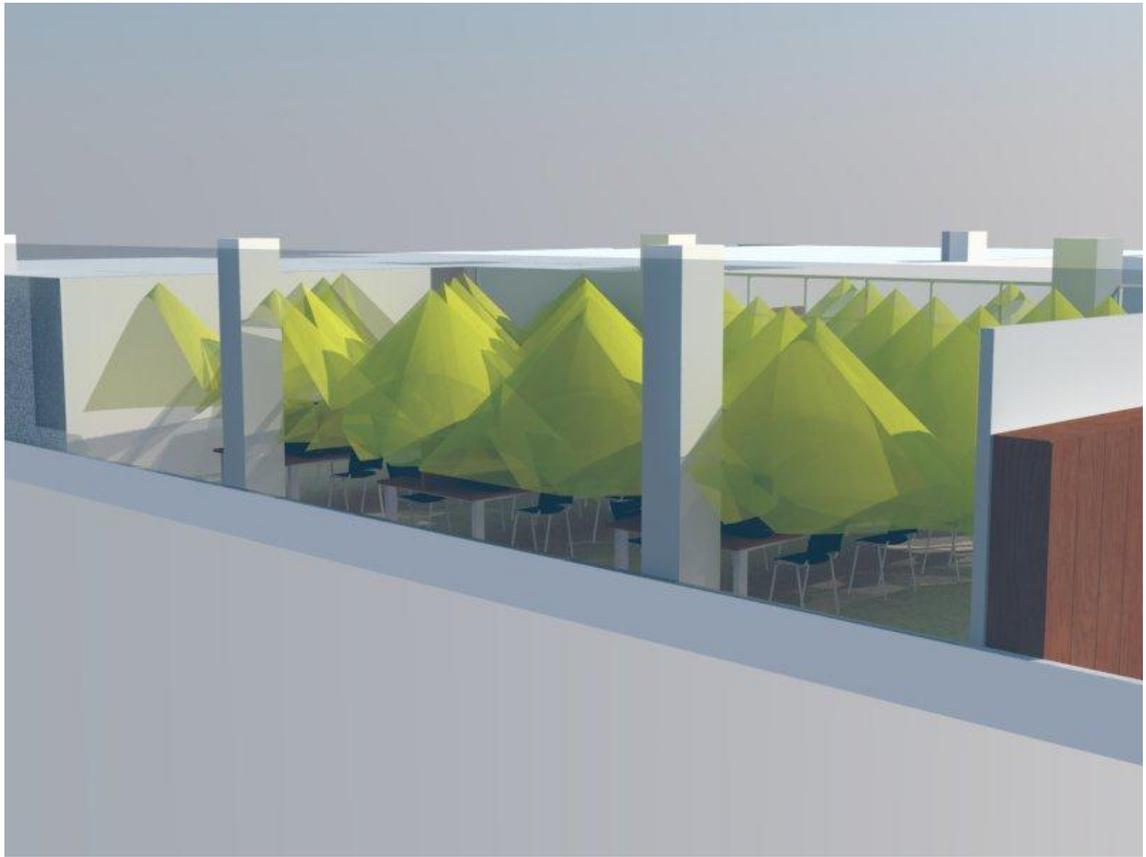


Figura 64 Distribución de células centro con centro con geometría cuadrada aplicada a la sala de computadores 1.

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1m$$

$$d_2 = 1.6 m$$

Remplazando este valor de d2, se tiene:

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 W$$

Cálculo de potencia, teniendo en cuenta los porcentajes de eficiencias de los transformadores:

$$\eta_{\text{red}} = \eta_1 \eta_2 \quad \eta_{\text{red}} = 0.9 * 0.9 \quad \eta_{\text{red}} = 0.81$$

Potencia requerida por la red:

$$P_{\text{entrada}} = n * \left(\frac{P_{\text{salida}}}{\eta_{\text{red}}} \right) \quad P_{\text{entrada}} = 33 * \left(\frac{5.1W}{0.81} \right) \quad P_{\text{entrada}} = 207.7 W$$

La potencia requerida en el secundario del transformador reductor, vista desde el primario y teniendo en cuenta la eficiencia, será:

$$P_{\text{requerida}} = \frac{EPR}{\eta_{\text{T.reductor}}} \quad P_{\text{requerida}} = \frac{5.1}{0.9} \quad P_{\text{requerida}} = 5.66 W$$

El voltaje en bornes del altavoz, V3, será:

$$V3 = \sqrt{P3 * Z1} = \sqrt{5.66 * 4} = 4.75V_{\text{rms}}$$

$$V2 = 50 V$$

Por su parte, la relación de transformación del transformador reductor es:

$$m_{\text{reductor}} = \frac{V3}{V2} \quad m_{\text{reductor}} = \frac{4.75}{50} \quad m_{\text{reductor}} = 0.095$$

La impedancia vista desde el primario hacia el secundario de cada uno de los transformadores de la red, Z2, estará dada por:

$$Z2 = \frac{Z3}{\alpha^2} = \frac{4}{0.095^2} = 443.21\Omega$$

La impedancia equivalente de los 33 altavoces de la red, Z2' es:

$$Z2' = \frac{Z2}{33} = \frac{443.21}{33} = 13.43\Omega$$

Por lo tanto la relación de transformación de T1, suponiendo una impedancia de salida del amplificador de 4 Ω , es:

$$m1 = \sqrt{\frac{Z2'}{Z1}} = \sqrt{\frac{13.43}{4}} = 1.82$$

T1 debe manejar una potencia de por lo menos 207.7 W, su relación de transformación igual a 1.83 y los voltajes en bornes a la entrada serán:

$$V1 = \sqrt{P1 * Z1} = \sqrt{207.7 * 4} = 28.82 \text{Vrms}$$

$$V2 = m1 * V1 = 1.82 * 28.82 = 52.45 \text{Vrms}$$

(Sin considerar las pérdidas en el transformador).

En resumen, los parámetros mínimos para el correcto funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta su eficiencia, serán

Impedancia de parlantes	8 Ω
Potencia de parlante	5.1 W
Potencia del amplificador	207.7 W
Impedancia del amplificador	4 Ω
Potencia de T1 (elevador)	207.7 W
Relación de transformación del transformador elevador	1.82
Potencia de los transformadores reductores	5.6 W
Relación de transformación del transformador reductor	0.095
Voltaje en bornes del transformador reductor	
Vsecundario	4.76 Vrms
Vprimario	50 Vrms
Voltaje en bornes del transformador elevador	
Vsecundario	50 Vrms
Vprimario	28.83 Vrms

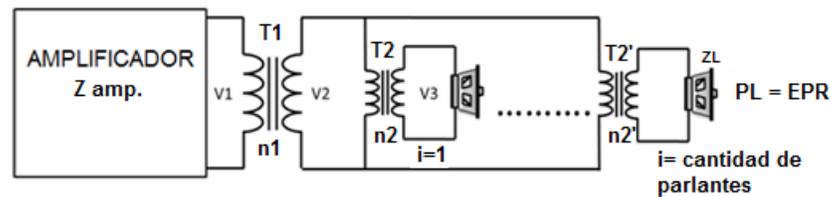


Figura 65 Diagrama eléctrico para la sala de computadores 1

Tabla 14 Guía aplicada a la sala de computadores 1, con un amplificador de 8 ohmios de impedancia de salida.

Z AMP (Ω)	8
P carga (w)	5,1
eficiencia elevador 'n1'	0,9
eficiencia reductor 'n2'	0,9
número de parlantes	33
EPR (W)	5,1
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	α reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	α elevador	V1 (V)	V2 (V)
207.78	5.66667	6.73	0.13466	441.18	13.37	1.29	40.77	52.70
Impedancia de los parlantes ZL (Ω)							8	
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)							5.1	
Potencia del amplificador (W)							207.78	
Impedancia del amplificador (Ω)							8	
Potencia de T1 (W)							207.78	
Relación de transformación de T1, α_1							1.2927	
Potencia de los transformadores reductores (W)							5.67	
Relación de transformación de T2 (α_2)							0.1347	
Voltaje en bornes del transformador reductor								
Vsecundario (V)			52.70					
Vprimario (V)			50					

7.4 Biblioteca, sala de estudio No.2

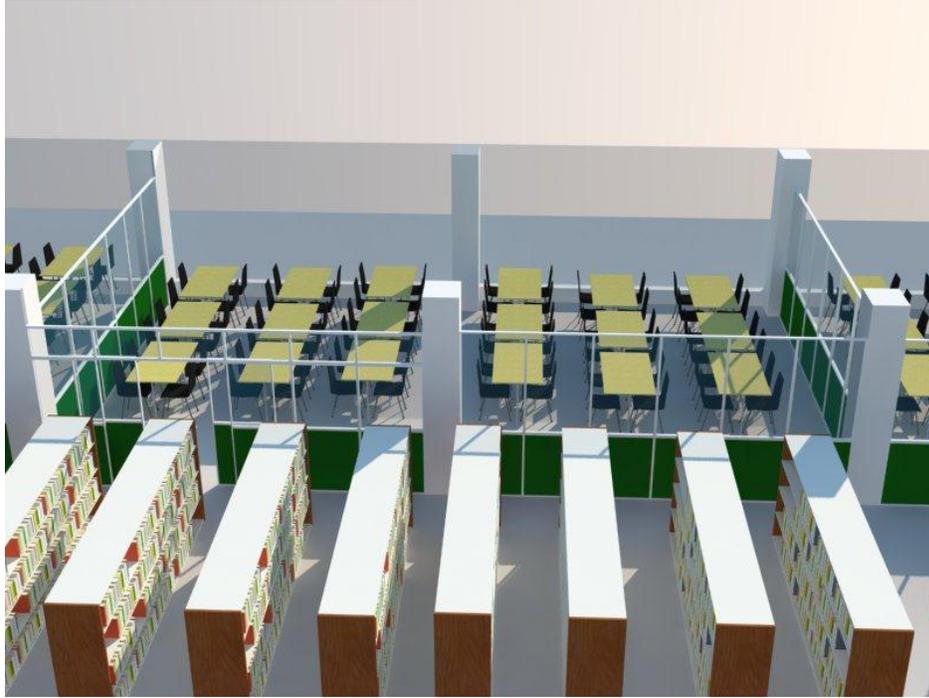


Figura 66 Sala de estudio No. 2

Se adopta una distribución de células con solapamiento mínimo y geometría hexagonal.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.6 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.6 \text{ m}$$

Área de cobertura:

$$Ac = \frac{3}{2} \sqrt{3} r^2$$

$$Ac = \frac{3}{2} \sqrt{3} 1.6^2$$

$$Ac = 6.65 \text{ m}^2$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{2 \cdot S}{3 \sqrt{3} r^2}$$

$$N = \frac{2 \cdot 82.79}{3 \sqrt{3} 1.6^2}$$

$$N = 12.45$$

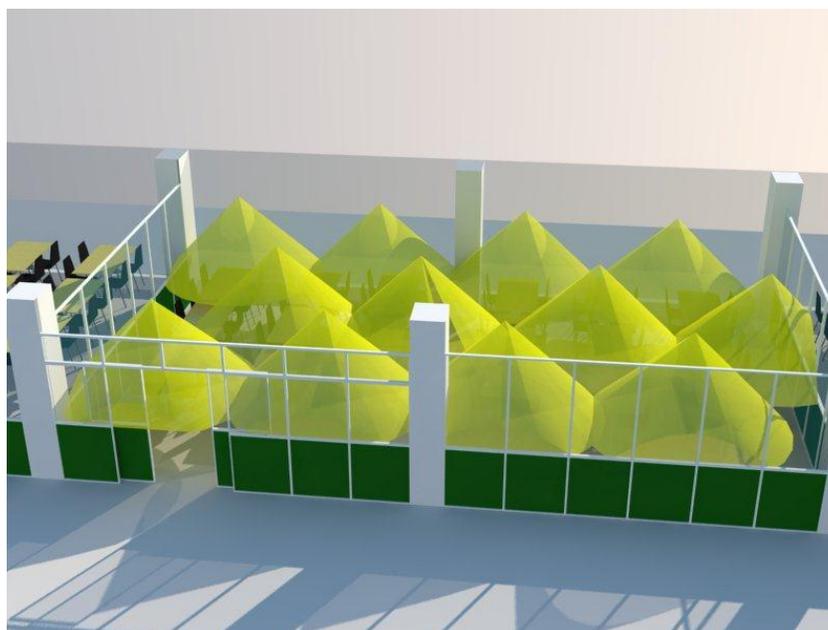


Figura 67 Solapamiento mínimo y geometría hexagonal. Sala de estudio No. 2

Tabla 15 Cálculo del coeficiente de absorción promedio. Sala de estudio No. 2

Sala de estudio No.2		TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias					
				125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
PISOS		Enlozado	82.75	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035
TECHOS		techo falso	82.75	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76
P A R E D E S	1	paneles de madera	11.33	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		vidrio	17	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	2	paneles de madera	6.28	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		hormigón pintado	3	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	9.6	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	3	hormigón pintado	5.17	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	31	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	4	hormigón pintado	2.94	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	9.6	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		paneles de madera		0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
superficies representativas		mesas de madera	25.65	0.1	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03
		-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial		$\sum (S * \alpha_s)$		45.5	35.85	45.73	59.96	65.24	70.06
coeficiente de absorción promedio		$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.158	0.125	0.159	0.209	0.227	0.244

Tabla 16 Cálculo para el tiempo de reverberación. Sala de estudio No.2

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	287,07	α a 1000Hz		0,21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0,66

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1m$$

$$d_2 = 1.6 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 W$$

Potencia total requerida en este espacio, sin tener en cuenta las pérdidas en los transformadores.

$$P_T = N * EPR$$

$$P_T = 13 * 5.1 W$$

$$P_T = 66.3 W$$

Cálculo de los parámetros mínimos para el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 17 Entrada de datos para sala de estudio 2.

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.1
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	13
EPR (W)	5.1
V2 (V)	50

Tabla 18 Datos de salida de la sala de estudio 2.

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevado r	V1 (V)	V2 (V)
81,85	5,66667	6,73	0,13466	441,18	33,94	2,06	25,59	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.1
Potencia del amplificador (W)		81.85
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		81.85
Relación de transformación de T1, α_1		2.0596
Potencia de los transformadores reductores (W)		5.67
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1347
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	25.59	

7.5 Biblioteca, sala de estudio No.3



Figura 68 sala de estudio No.3

Se adopta una distribución centro con centro, con geometría cuadrada.

Como la altura de la biblioteca es la misma en todos los espacios y ya que se utiliza el mismo tipo de parlantes, el radio de cubrimiento será el mismo en todos los espacios estudiados.

Area de cubrimiento:

$$Ac = 2 * r^2$$

$$Ac = 2 * 1.6^2$$

$$Ac = 5.12 m^2$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{r^2}$$

$$N = \frac{83.83}{1.6^2}$$

$$N = 32.75$$

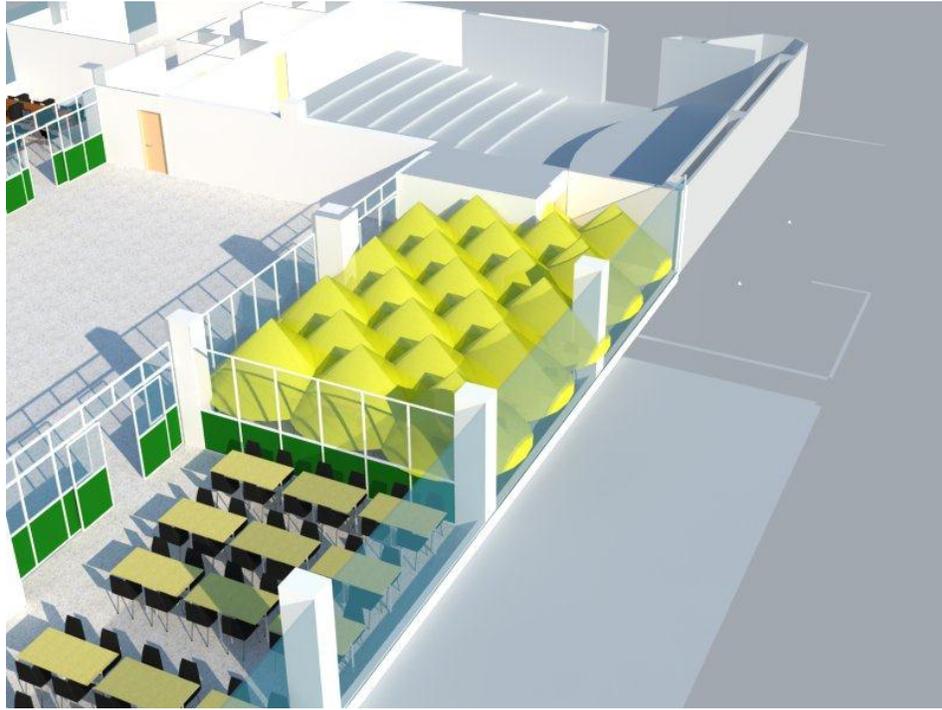


Figura 69 Distribución centro con centro, geométrica cuadrada

Tabla 19 Coeficiente de absorción promedio y tiempo de reverberación.

Sala de estudio No.3		TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias					
				125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
PISOS		Enlozado	68.93	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035
TECHOS		techo falso	68.93	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76
P A R E D E S	1	paneles de madera	8.88	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		vidrio	13.4	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	2	hormigón pintado	17.16	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		hormigón pintado	5.8	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	3	vidrio	32.45	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		hormigón pintado	2.94	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	4	vidrio	9.6	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		paneles de madera	11.33	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
superficies representativas		mesas de madera	17	0.1	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03
		-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial		$\sum (S * \alpha_s)$		38.09	30.26	38.57	50.49	54.93	59.16
coeficiente de absorción promedio		$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.149	0.118	0.15	0.197	0.214	0.231

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	256.42	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0.66

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1m$$

$$d_2 = 1.6 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 W$$

Cálculo de los parámetros mínimos para el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 20 Entrada de datos para sala de estudio 3.

Z AMP (Ω)	8
Z carga (Ω)	5.1
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	33
EPR (W)	5.1
V2 (V)	50

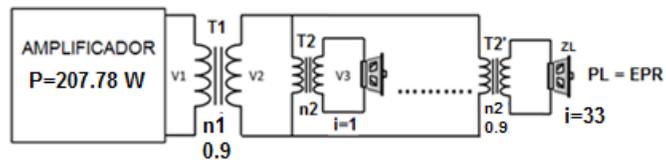


Tabla 21 Datos de salida de la sala de estudio 3.

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2' (Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
207,78	5,66667	6,73	0,13466	441,18	13,37	1,29	40,77	52,70

Impedancia de los parlantes Z_L (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.1
Potencia del amplificador (W)		207.78
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		207.78
Relación de transformación de T1, α_1		1.2927
Potencia de los transformadores reductores (W)		5.67
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1347
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	40.77	

7.6 Biblioteca, hemeroteca

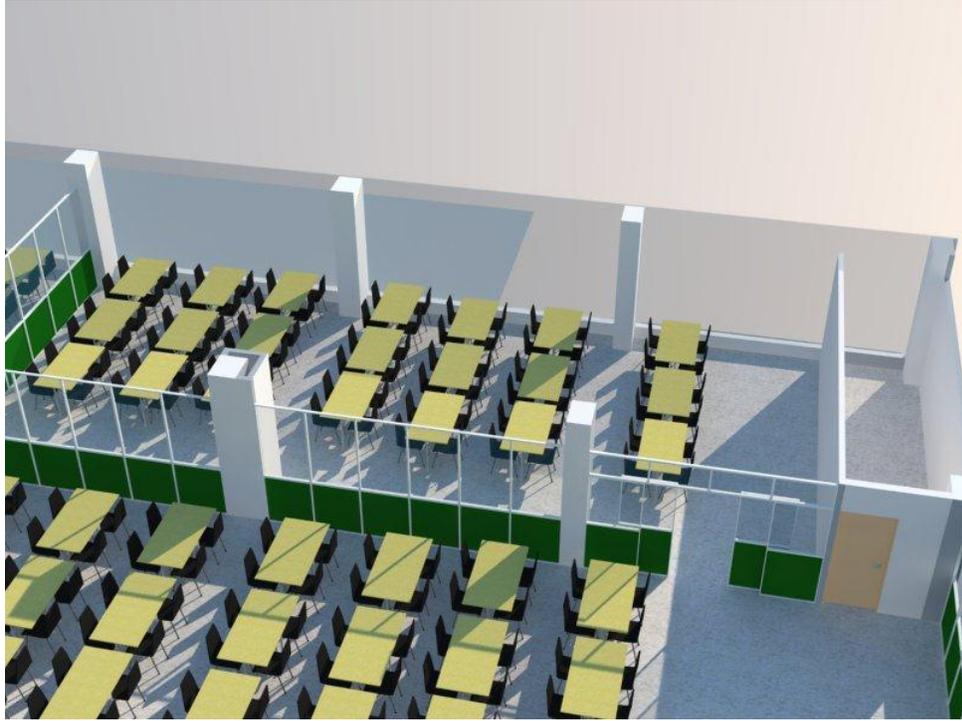


Figura 70 Hemeroteca

Área piso: 113.46 m²

Radio de cubrimiento: 1.6m

Tipo de distribución: Distribución de células con solapamiento mínimo, geometría hexagonal.

Área de cobertura:

$$Ac = \frac{3}{2} \sqrt{3} r^2$$

$$Ac = \frac{3}{2} \sqrt{3} 1.6^2$$

$$Ac = 6.65 \text{ m}^2$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{2 * S}{3 \sqrt{3} r^2}$$

$$N = \frac{2 * 113.46}{3 * \sqrt{3} 1.6^2}$$

$$N = 17$$

Tabla 22 Cálculo del Coeficiente de absorción promedio. Hemeroteca

HEMEROTECA	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	112.92	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	techo falso	112.92	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76	
	1	paneles de madera	15.11	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		vidrio	22.88	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		hormigón pintado	4.35	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigón pintado	2.94	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	9.57	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		paneles de madera	6.28	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
	3	hormigón pintado	7.55	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	47	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	4	hormigón pintado	14.82	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	superficies representativas	mesas de madera	20.7	0.1	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03
-		-	-	-	-	-	-	-	
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		58.33	46.9	61.08	80.81	88.28	94.93	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.155	0.124	0.162	0.214	0.234	0.252	

Tabla 23 Cálculo tiempo de reverberación para la hemeroteca.

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	377.04	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0.58

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1m$$

$$d_2 = 1.6 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

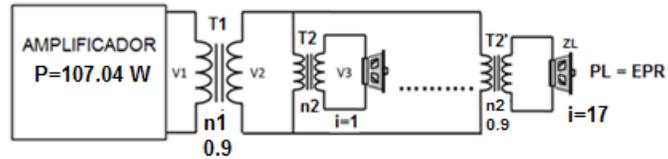
$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 W$$

Cálculo de los parámetros mínimos para el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 24 Datos de entrada y de salida para la hemeroteca.

Z AMP (Ω)	8
Z carga (Ω)	5.1
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	17
EPR (W)	5.1
V2 (V)	50



Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2' (Ω)	m elevado r	V1 (V)	V2 (V)
107,04	5,66667	6,73	0,13466	441,18	25,95	1,80	29,26	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.1
Potencia del amplificador (W)		107.04
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		107.04
Relación de transformación de T1, α_1		1.8011
Potencia de los transformadores reductores (W)		5.67
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1347
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	29.26	

7.7 Zona central

Esta zona es usada para dos propósitos: el primero es ubicar las estanterías de los libros, y el segundo es servir de zona de lectura auxiliar. Las personas que consultan los libros en las estanterías estarán de pie, por lo tanto la distancia del piso al oído promedio “ lp ” es diferente a los casos anteriores.

$$lp = 1.5 \text{ m}$$

Como se ha venido trabajando con el mismo tipo de parlante, los cálculos para el radio de cubrimiento son:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.6 - 1.65) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 0.95$$

$$\text{altura conos} = 2.6 - 1.65 = 0.95 \text{ m}$$

El tipo de distribución que se adoptará será el de borde con borde, con arreglo cuadrado.

Área de cobertura:

$$Ac = 2 * r^2$$

$$Ac = 2 * 0.95^2$$

$$Ac = 1.81 \text{ m}^2$$

Número de parlantes para zona de estanterías

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{360.27}{4 * 0.95^2}$$

$$N = 99.8$$

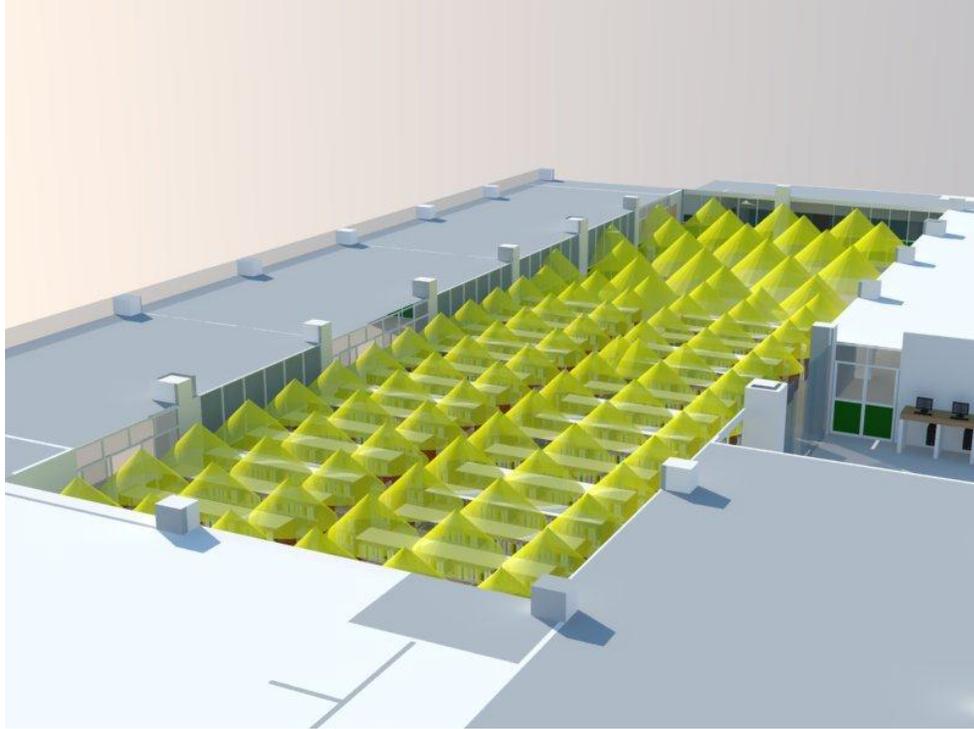


Figura 71 Distribución borde con borde, arreglo cuadrado. Zona central

Tabla 25 Cálculo del Coeficiente de absorción promedio. Zona central

Zona central	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	668,14	0,01	0,015	0,002	0,025	0,03	0,035	
TECHOS	techo falso	668,14	0,34	0,32	0,48	0,64	0,71	0,76	
P A R E D E S	1	paneles de madera	24,80	0,1	0,11	0,1	0,08	0,08	0,11
		vidrio	52,43	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		hormigón pintado	19,88	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	2	paneles de madera	6,28	0,1	0,11	0,1	0,08	0,08	0,11
		hormigón pintado	3	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
		vidrio	9,6	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
	3	hormigón pintado	5,17	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
		vidrio	31	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
	4	hormigón pintado	2,94	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
		vidrio	9,6	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		paneles de madera		0,1	0,11	0,1	0,08	0,08	0,11
	superficies representativas	mesas de madera	25,65	0,1	0,08	0,05	0,05	0,04	0,03
	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		258,31	235,77	330,85	451,78	500,61	538	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0,1692	0,1544	0,2167	0,2959	0,3279	0,352	

Tabla 26 Cálculo para el tiempo de reverberación. Zona central

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	1526.63	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0.71

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l) \quad d2 = 2.6m - 1.65m$$

$$d2 = 0.95 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(0.95)) / 10}$$

$$EPR = 1.8 W$$

Al estar dividida esta zona en dos grupos para diferente uso, se hacen inicialmente dos análisis de la potencia requerida.

Para la zona de lectura, las personas estarán la mayoría de su tiempo sentadas, por lo cual su altura será la misma que en los espacios anteriores.

$$Ac = 2r^2$$

$$Ac = 2 * 1.6^2$$

$$Ac = 5.12 \text{ m}^2$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{137.74}{4 * 1.6^2}$$

$$N = 13.45$$

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6\text{m} - 1\text{m}$$

$$d_2 = 1.6 \text{ m}$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 \text{ W}$$

El cálculo para las características eléctricas de los componentes, se realiza suponiendo que todas las personas estuvieran de pie, con lo cual $EPR=1.8 \text{ W}$.

Tabla 27 Datos de los transformadores de acople para la zona central con 14 parlantes.

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5,1
eficiencia elevador 'n1'	0,9
eficiencia reductor 'n2'	0,9
número de parlantes	14
EPR (W)	5,1
V2 (V)	50

Potencia red (W)	P3 (W)	V3 (V)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2' (Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
88,15	5,66667	6,73	0,13466	441,18	31,51	1,98	26,56	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)	8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)	5,1
Potencia del amplificador (W)	88,15
Impedancia del amplificador (Ω)	8
Potencia de T1 (W)	88,15
Relación de transformación de T1, α_1	1,9847
Potencia de los transformadores reductores (W)	5,67
Relación de transformación de T2 (α_2)	0,1347

Voltaje en bornes del transformador reductor	
Vsecundario (V)	52,70
Vprimario (V)	50

Voltaje en bornes del transformador elevador	
Vsecundario (V)	50
Vprimario (V)	26,56

Tabla 28 Datos de los transformadores de acople para la zona central con 100 parlantes.

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	1,8
eficiencia elevador 'n1'	0,9
Eficiencia reductor 'n2'	0,9
Número de parlantes	100
EPR (W)	1,8
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
222,22	2,00000	4,00	0,08000	1250,00	12,50	1,25	42,16	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)	8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)	5,1
Potencia del amplificador (W)	88,15
Impedancia del amplificador (Ω)	8
Potencia de T1 (W)	88,15
Relación de transformación de T1, α_1	1,9847
Potencia de los transformadores reductores (W)	5,67
Relación de transformación de T2 (α_2)	0,1347

7.8 Zona de estar y escaleras



Figura 72 Zona de estar y escaleras

Esta zona tiene una escalera doble que comunica la sala de docentes, la fotocopiadora y la sala de conferencias con el nivel superior, donde están ordenados y catalogados los libros. Como dato adicional para los cálculos, hay que tener en cuenta que este espacio tiene dos alturas diferentes, por lo cual los parámetros calculados son distintos.

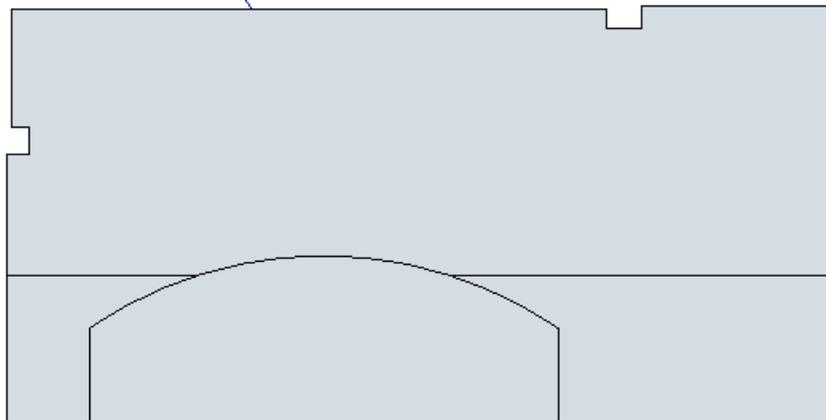


Figura 73 Área del piso de la zona de estar de la biblioteca.

Para la primera parte se tienen las siguientes medidas:

Altura: 2.6 m

Área: 21.83 m²

Largo: 10.96 m

Ancho: 3.52 m

Para la primera parte se encuentra un problema que consiste en que el espacio al cual se pretende hacer la sonorización es muy angosto, por lo tanto los parámetros serán inútiles en este espacio.

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (3.6 - 1.65) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.95$$

Al utilizar un tipo de distribución sencillo y que requiere pocos parlantes como el caso de borde con borde con arreglo cuadrado, se obtiene:

El área de cobertura:

$$Ac = 2 * r^2$$

$$Ac = 2 * 1.95^2$$

$$Ac = 7.61m^2$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{21.83}{4 * 1.95^2}$$

$$N = 1.44 \approx 2$$

Al ubicar los parlantes en el área, se obtiene un gran espacio que no se encuentra cubierto por la onda sonora directa, como se ve en la figura 74.

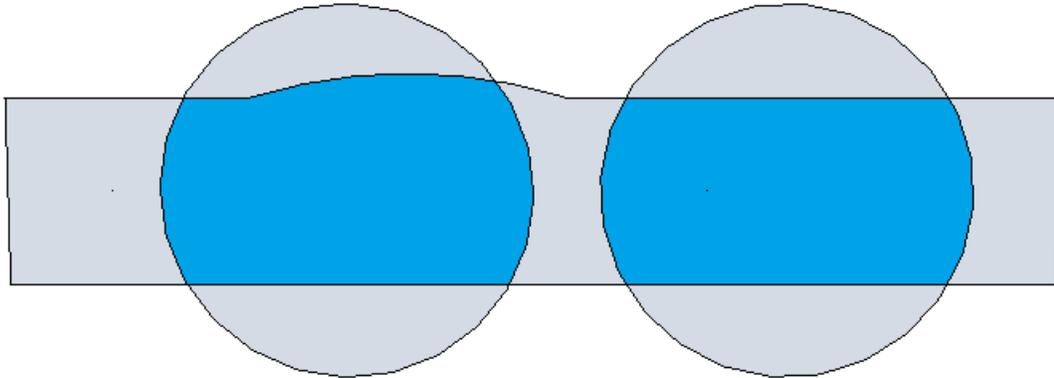


Figura 74 Área del cono acústico

Para solucionar este inconveniente se procede a utilizar parlantes más directivos que posean un ángulo de cubrimiento adecuado para esta zona. El radio de cubrimiento óptimo medido sobre la zona es $r=0.97$ metros.

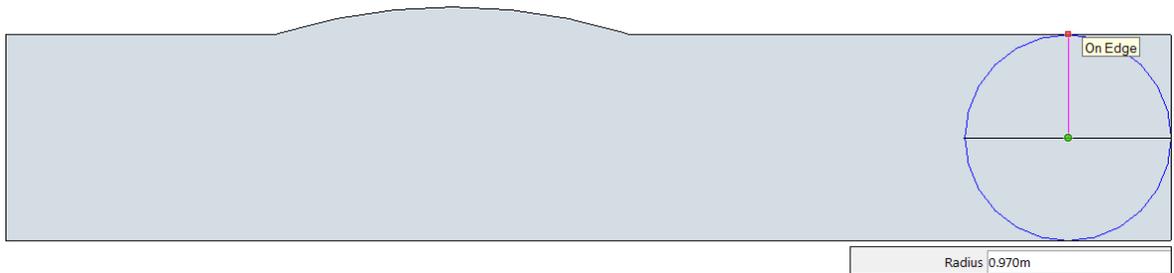


Figura 75 Radio de cubrimiento sobre la zona

Como se conoce la altura del salón, la altura del piso al oído y el radio de cubrimiento, se procede a calcular el ángulo de directividad del parlante.

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$\theta = 51.5^\circ$$

Luego, se determina el número de parlantes necesarios con el tipo de distribución borde con borde y arreglo cuadrado:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{21.83}{4 * 0.97^2}$$

$$N = 5.8$$

Al ubicar los parlantes más directivos se obtiene mayor área cubierta por las ondas sonoras directas emitidas por ellos. Como se trata de un pequeño corredor con escaleras, conviene localizar la zona del recorrido habitual de las personas en ese tramo, la cual se representa en la figura 76 mediante la franja roja.

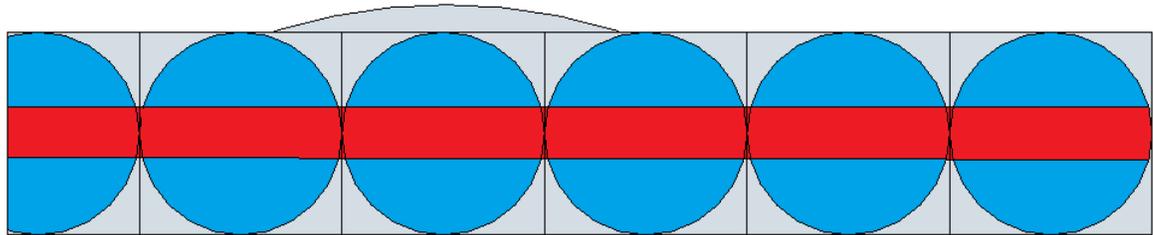


Figura 76 Parlantes Directivos

Como ya es habitual, antes de hallar la potencia eléctrica, se calcula la distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1m$$

$$d_2 = 1.6 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 W$$

Utilizando los parlantes con ángulo de directividad de 90 grados:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.6 - 1.65) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 0.95 m$$

Para el número de parlantes para la distribución borde con borde y arreglo cuadrado, se tiene:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{37.79}{4 * 0.95^2}$$

$$N = 10.47$$

Al ubicar los conos de las ondas sonoras en el plano, se observa que gran parte del área central queda sin cubrir. Para solucionar este problema se puede utilizar otro tipo de distribución o simplemente correr la hilera superior de los conos de tal manera que aunque se solape un poco con la hilera inferior, se mejorará el cubrimiento sonoro.

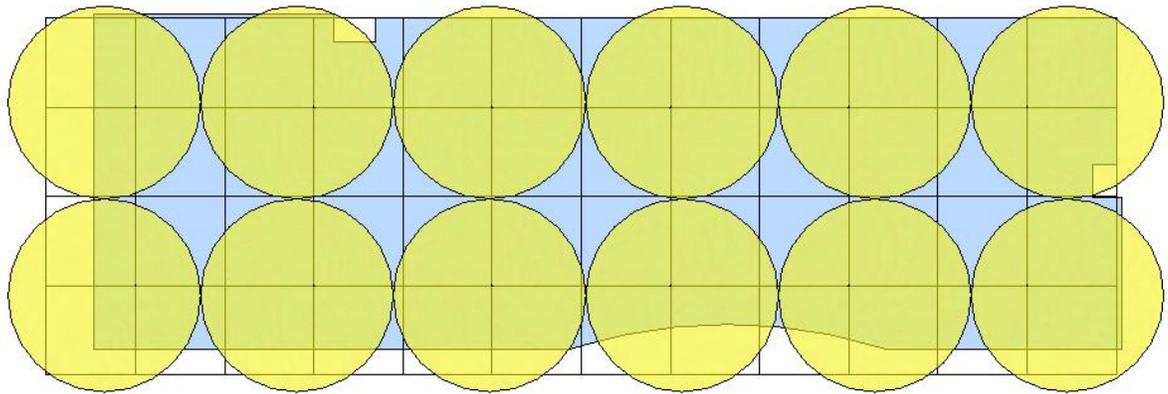


Figura 77 Distribución Borde con borde hexagonal. Zona de estar y escaleras

Para distribución borde con borde y arreglo hexagonal, el número de parlantes será:

$$N = \frac{S}{2 * \sqrt{3} r^2}$$

$$N = \frac{37.79}{2 * \sqrt{3} 0.95^2}$$

$$N = 12$$

Tabla 29 Cálculo del coeficiente de absorción promedio. Zona de estar y escaleras

ZONA DE ESTAR Y ESCALERAS	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	47.91	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Revoque yeso	47.91	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	
P A R E D E S	1	Puerta abierta	4.80	1	1	1	1	1	1
		paneles de madera	9.57	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		vidrio	12.74	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		hormigón pintado	17.38	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	paneles de madera	2.77	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		hormigón pintado	5	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	9.49	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	3	hormigón pintado	7.83	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		paneles de madera	6.22	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
		vidrio	9.49	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
4	vidrio	8.63	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	
	paneles de madera	5.69	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11	
superficies representativas	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		16.23	11.87	10.2	11.19	11.5	12.47	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.083	0.061	0.052	0.057	0.059	0.064	

Tabla 30 Cálculo para el tiempo de reverberación. Zona de estar y las escaleras

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	195.43	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	1.78

Como el Tiempo de reverberación es mayor a 1.5 segundos, se requiere un acondicionamiento acústico. Más adelante en el tema “Consideraciones generales para el acondicionamiento acústico”, se solucionará este problema

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1.65m$$

$$d_2 = 0.95 \text{ m}$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(0.95)) / 10}$$

$$EPR = 1.8 \text{ W}$$

Características de los componentes:

Tabla 31 Datos de entrada y de salida para la zona de estar de la biblioteca.

Z AMP (Ω)	8
P carga (W)	1.8
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	12
EPR (W)	1.8
V2 (V)	50

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)	8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)	5,1
Potencia del amplificador (W)	75,56
Impedancia del amplificador (Ω)	8
Potencia de T1 (W)	75,56
Relación de transformación de T1, α_1	2,1437
Potencia de los transformadores reductores (W)	5,67
Relación de transformación de T2 (α_2)	0,1347

Voltaje en bornes del transformador reductor	
Vsecundario (V)	52,70
Vprimario (V)	50

Voltaje en bornes del transformador elevador	
Vsecundario (V)	50
Vprimario (V)	24,59

7.9 Sala de profesores



Figura 78 Sala de profesores

Área del piso: 36.5 m^2 .

Tipo de distribución: Borde con borde, arreglo cuadrado.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$
$$r = (2.6 - 1) \tan \frac{90}{2}$$
$$r = 1.6 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$
$$N = \frac{36.50}{10.24}$$
$$N = 3.56$$

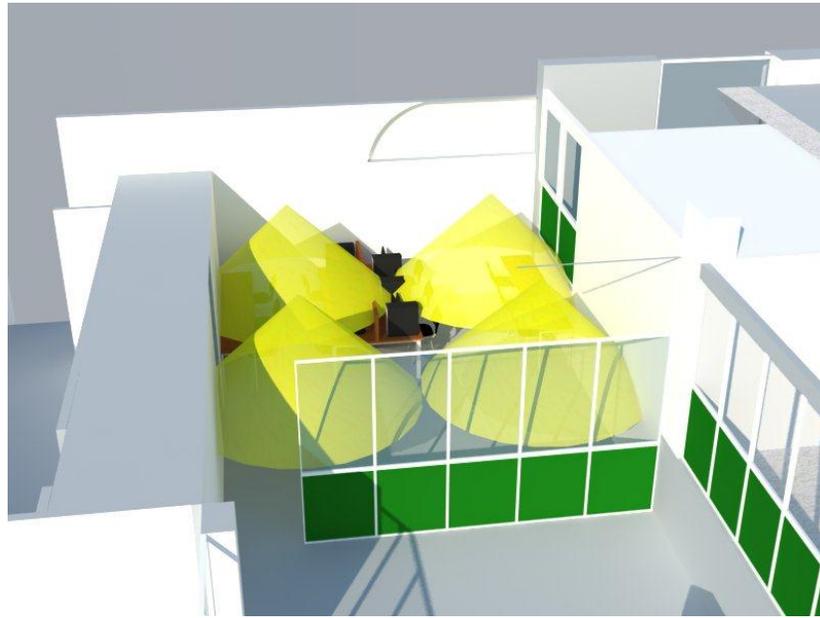


Figura 79 Sala de profesores con distribución borde con borde, geometría cuadrada.

Tabla 32 Cálculo del Coeficientes de absorción. Sala de profesores

SALA DE PROFESORES		TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias					
				125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
PISOS		Enlozado	47.91	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035
TECHOS		techo falso	47.91	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76
P A R E D E S	1	vidrio	8.63	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		paneles de madera	5.69	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
	2	hormigón pintado	17.38	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	3	hormigón pintado	14.3	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	4	hormigón pintado	17.38	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
superficies representativas		-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial		$\sum (S * \alpha_s)$		19.38	17.68	24.5	33.56	37.06	39.87
coeficiente de absorción promedio		$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.122	0.111	0.154	0.211	0.233	0.25

Tabla 33 Cálculo para el tiempo de reverberación. Sala de profesores

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	159.20	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0.59

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1m$$

$$d_2 = 1.6 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 W$$

Tabla 34 Datos de entrada y de salida para la zona de estar de la biblioteca.

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.1
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	12
EPR (W)	5.1
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevado r	V1 (V)	V2 (V)
75,56	5,66667	6,73	0,13466	441,18	36,76	2,14	24,59	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)				8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)				5.1
Potencia del amplificador (W)				75.56
Impedancia del amplificador (Ω)				8
Potencia de T1 (W)				75.56
Relación de transformación de T1, α_1				2.1437
Potencia de los transformadores reductores (W)				5.67
Relación de transformación de T2 (α_2)				0.1347
Voltaje en bornes del transformador reductor				
Vsecundario (V)	52.70			
Vprimario (V)	50			
Voltaje en bornes del transformador elevador				
Vsecundario (V)	50			
Vprimario (V)	24.59			

7.10 Fotocopiadora

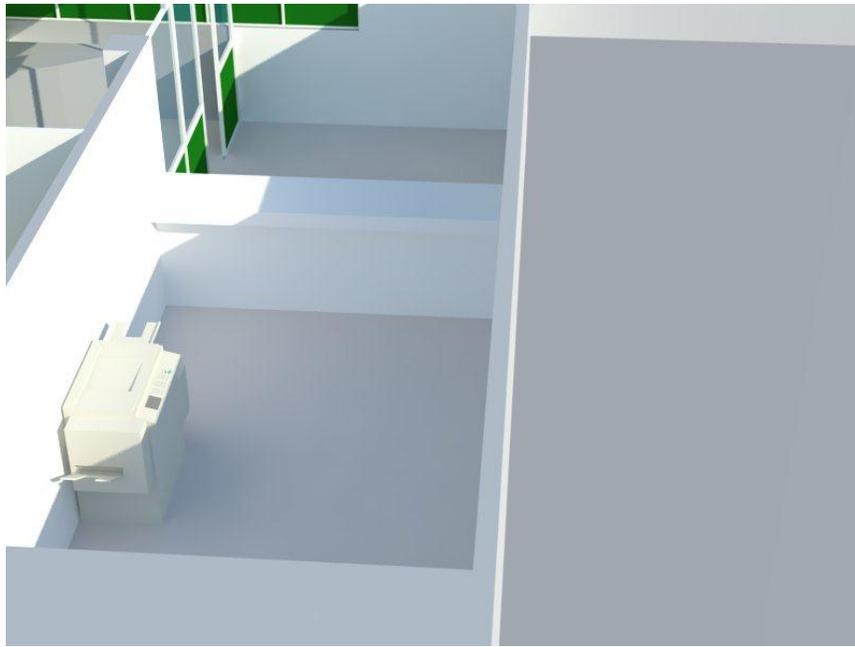


Figura 80 Fotocopiadora

Área del piso: 34.21 m².

Tipo de distribución: Borde con borde, arreglo cuadrado.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.6 - 1.65) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 0.95 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{34.21}{4 * 0.95^2}$$

$$N = 9.47$$

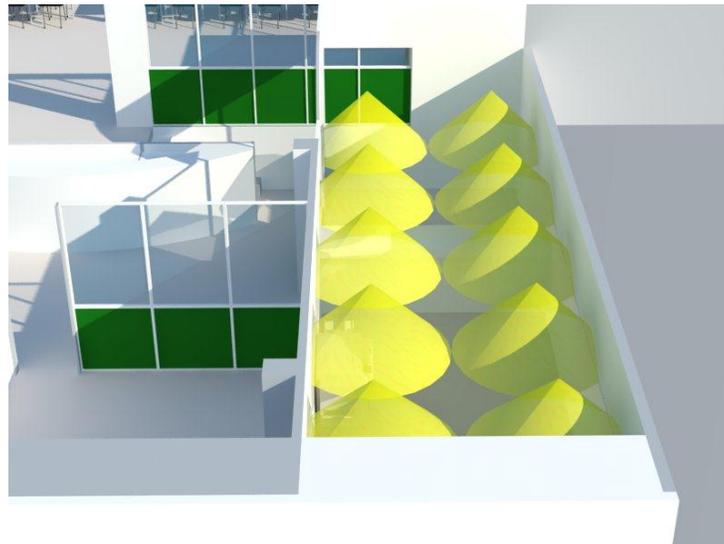


Figura 81 Fotocopiadora. Borde con borde, arreglo cuadrado

Tabla 35 Cálculo del Coeficientes de absorción. Fotocopiadora

FOTOCOPIADORA	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	36.96	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Revoque yeso	36.96	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	
P A R E D E S	1	vidrio	4.23	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		Puerta abierta	2.21	1	1	1	1	1	1
		paneles de madera	2.77	0.1	0.11	0.1	0.08	0.08	0.11
	2	hormigón pintado	8.65	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	3	hormigón pintado	28.59	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
4	hormigón pintado	8.65	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	
superficies representativas	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		4.816	4.521	3.928	5.509	6.021	6.289	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.037	0.035	0.03	0.043	0.047	0.049	

Tabla 36 Cálculo para el tiempo de reverberación. Fotocopiadora

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	129.02	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	2.79

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.6m - 1.65m$$

$$d_2 = 0.95 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(0.95)) / 10}$$

$$EPR = 1.8 W$$

Parámetros de selección de elementos:

Z AMP (Ω)	8
PL carga (W)	1.8
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	12
EPR (W)	1.8
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2' (Ω)	m elevado r	V1 (V)	V2 (V)
22,22	2,00000	4,00	0,08000	1250,00	125,00	3,95	13,33	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		1.8
Potencia del amplificador (W)		22.22
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		22.22
Relación de transformación de T1, α_1		3.9528
Potencia de los transformadores reductores (W)		2.00
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.0800
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	13.33	

7.11 Sala de reuniones 1

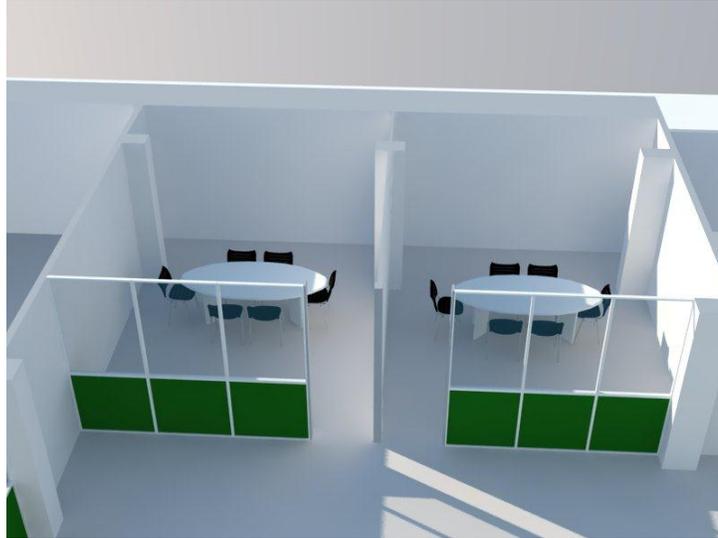


Figura 82 Sala de reuniones

Se trata de dos salones adjuntos con las mismas características acústicas. En este caso se calculará el tiempo de reverberación para uno de ellos y se utilizará este dato para el otro.

Sala de reuniones 1:

Área del piso: 19.73 m².

Tipo de distribución para: Borde con borde, arreglo cuadrado.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$
$$r = (2.6 - 1) \tan \frac{90}{2}$$
$$r = 1.6 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$
$$N = \frac{19.73}{4 * 1.6^2}$$

$$N = 1.9$$

7.12 Sala de reuniones 2

Área del piso: 20.32 m².

Tipo de distribución para: Borde con borde, arreglo cuadrado.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.6 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.6m$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{20.32}{4 * 1.6^2}$$

$$N = 1.98$$

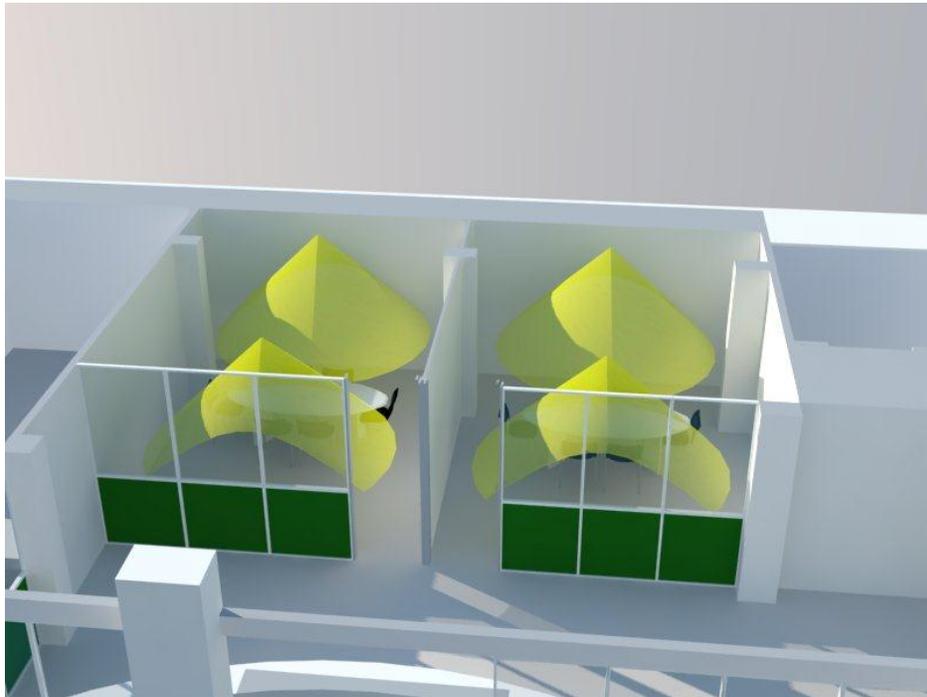


Figura 83 Sala de reuniones 1 y 2. Borde con borde, arreglo cuadrado

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.6)) / 10}$$

$$EPR = 5.1 \text{ W}$$

Parámetros para la selección de elementos:

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.1
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	4
EPR (W)	5.1
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
25,19	5,66667	6,73	0,13466	441,18	110,29	3,71	14,19	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.1
Potencia del amplificador (W)		25.19
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		25.19
Relación de transformación de T1, α_1		3.7131
Potencia de los transformadores reductores (W)		5.67
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1347
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	14.19	

7.13 Segundo piso: Recepción



Figura 84 Recepción segundo piso

Área del piso: 24.30 m².

Tipo de distribución: Solapamiento mínimo, geometría hexagonal.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1.65) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{3\sqrt{3} r^2}$$

$$N = \frac{24.3}{3\sqrt{3} * 1^2}$$

$$N = 4.67$$

$$N = 4.67$$

Tabla 37 Cálculo del Coeficientes de absorción. Recepción

RECEPCIÓN	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	23,66	0,01	0,015	0,002	0,025	0,03	0,035	
TECHOS	Revoque yeso	23,66	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	
P A R T E S	1	vidrio	7,76	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		puerta abierta	5,34	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	1,78	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	2	hormigon pintado	9,88	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
		ventana abierta	0,87	1	1	1	1	1	1
	3	hormigón pintado	14,88	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	4	hormigón pintado	11,3	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	superficies representivas	-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		7,9563	7,1432	6,6804	7,893	8,1702	8,2885	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0,0803	0,0721	0,0674	0,0796	0,0824	0,0836	

Tabla 38 Cálculo para el tiempo de reverberación. Recepción

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	99.13	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	1.28

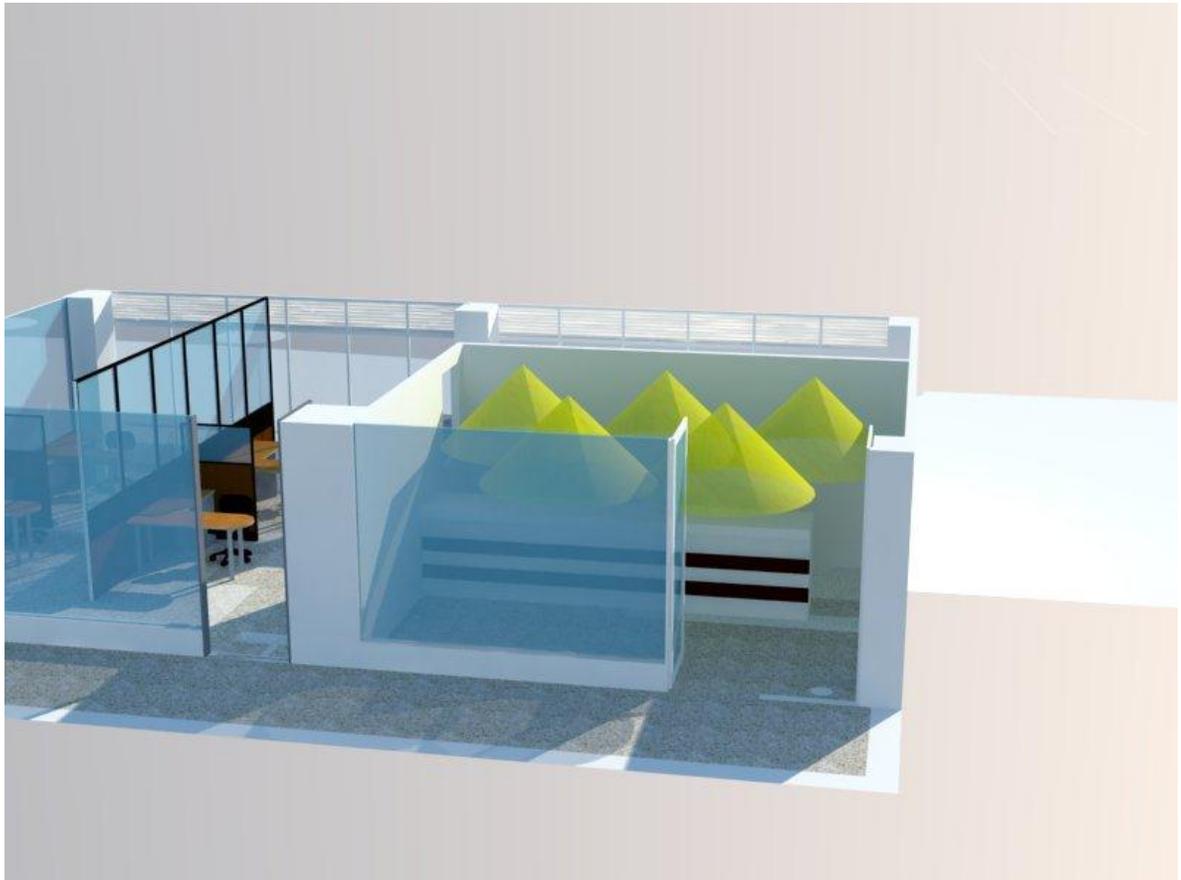


Figura 85 Recepción. Solapamiento mínimo, geometría hexagonal

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.67m - 1.65m$$

$$d_2 \approx 1 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1)) / 10}$$

$$EPR = 2 W$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	2
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	5
EPR (W)	2
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
12,35	2,22222	4,22	0,08433	1125,00	225,00	5,30	9,94	52,70

7.14 Oficina Comunicaciones y relaciones públicas

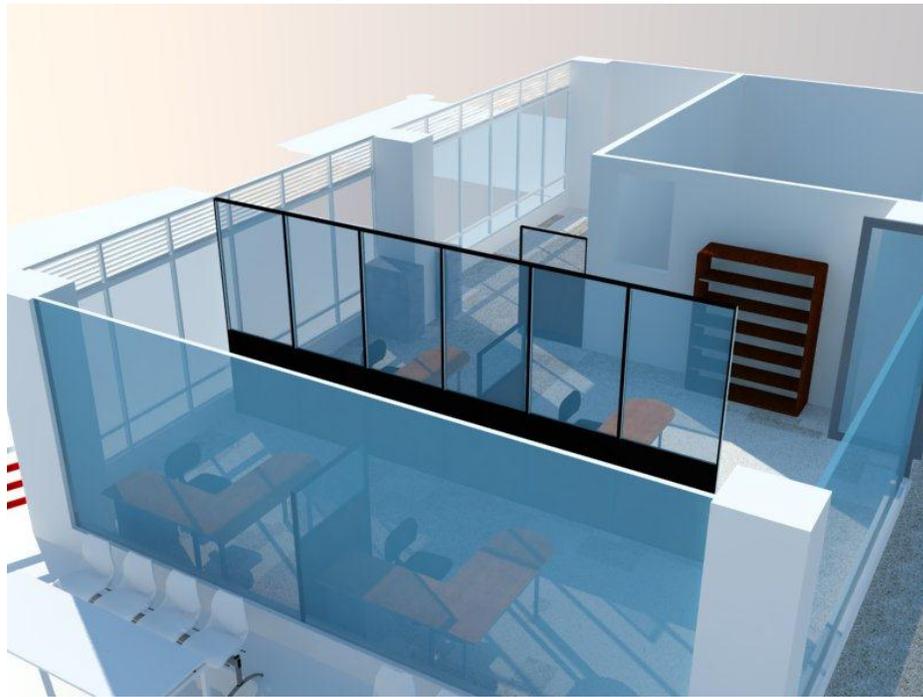


Figura 86 Oficina de comunicaciones y relaciones públicas

Área del piso: 58.54 m².

Tipo de distribución: Borde con borde, geometría cuadrada.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.67 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4r^2}$$

$$N = \frac{58.54}{4 * 1.67^2}$$

$$N = 5.24$$

Tabla 39 Cálculo del Coeficientes de absorción promedio. Oficina de comunicaciones y relaciones públicas

	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	45.48	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Revoque yeso	45.48	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	
	1	vidrio	10.66	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		puerta abierta	2.67	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	4.2	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	4.75	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	14.45	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	3	hormigón pintado	4.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	10.34	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		Rejilla de ventilación	4.48	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	4	hormigón pintado	12.81	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		entradas abiertas	6.8	1	1	1	1	1	1
superficies representativas	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		12.91	8.887	7.138	8.319	8.422	8.426	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.124	0.098	0.087	0.095	0.096	0.096	

Tabla 40 Cálculo para el tiempo de reverberación. Oficina de comunicaciones y relaciones públicas

DIMENSIONES		CÁLCULOS	
ÁREA TOTAL	159.34	α a 1000Hz	0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$

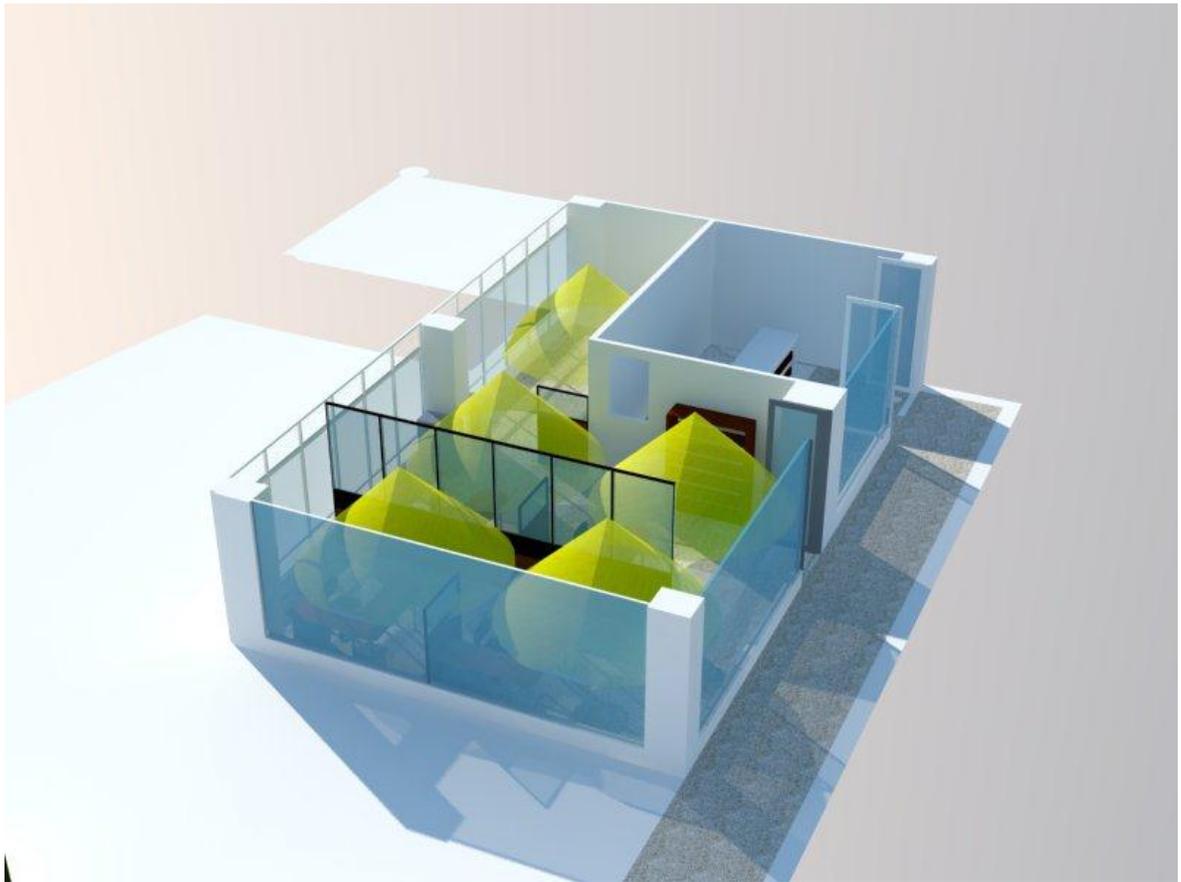


Figura 87 Oficina de comunicaciones y relaciones públicas. Borde con borde, geometría cuadrada

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l) \qquad d_2 = 2.67m - 1m$$

$$d_2 = 1.67 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 90 + 20 \log(1.67)) / 10}$$

$$EPR = 0.55 W$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	0.55
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	5
EPR (W)	0.55
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
3,40	0,61111	2,21	0,04422	4090,91	818,18	10,11	5,21	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		0.55
Potencia del amplificador (W)		3.40
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		3.40
Relación de transformación de T1, α_1		10.1130
Potencia de los transformadores reductores (W)		0.61
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.0442
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	5.21	

7.15 Zona de estar

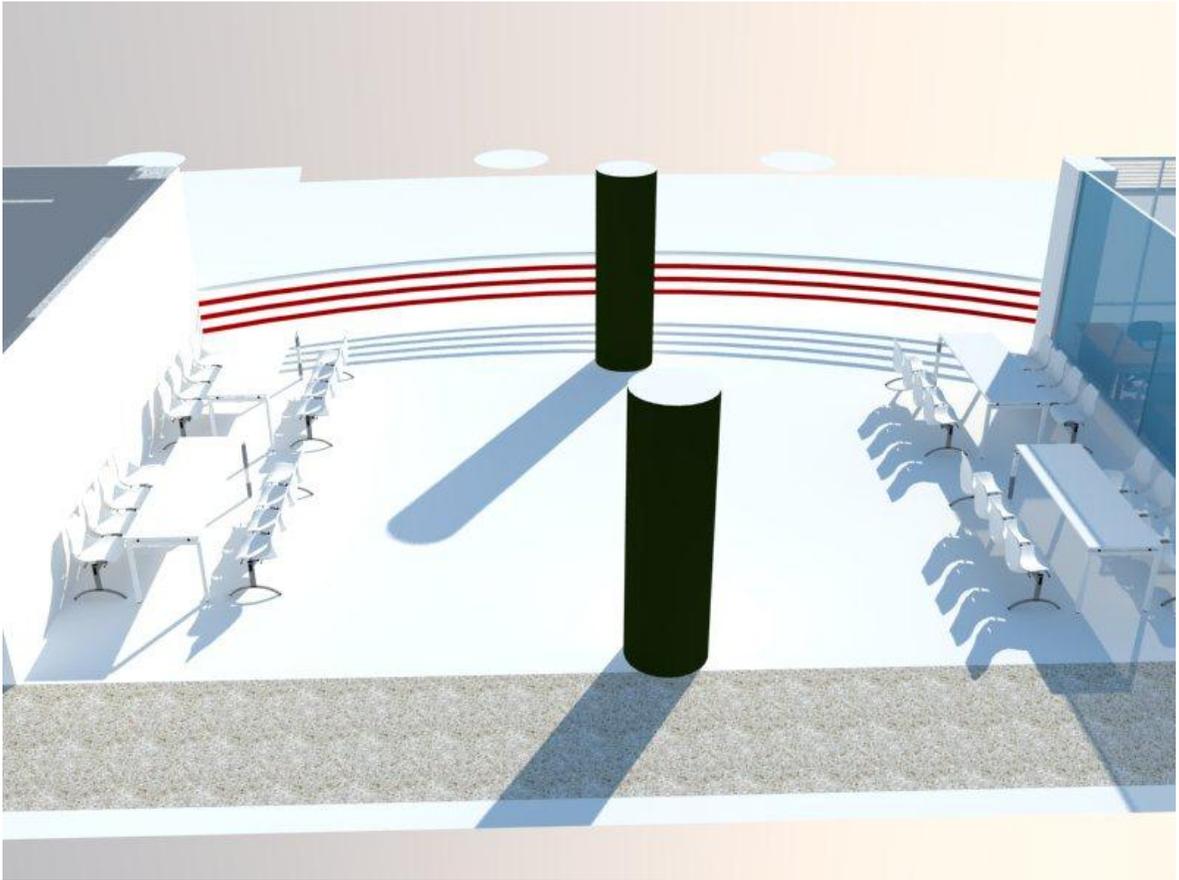


Figura 88 Zona de estar

Esta zona se utiliza para dos propósitos principalmente, el primero como zona de estar y estudio. El otro propósito es como zona de baile de las bailarinas de ballet y porristas.

Para los cálculos del lugar utilizado como zona de estudio, se considera que las personas se encuentran sentadas, $l = 1$ m.

Área del piso: 84 m^2 .

Tipo de distribución: Borde con borde, geometría cuadrada.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.67 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4r^2}$$
$$N = \frac{84}{4 * 1.67^2}$$
$$N = 7.52$$

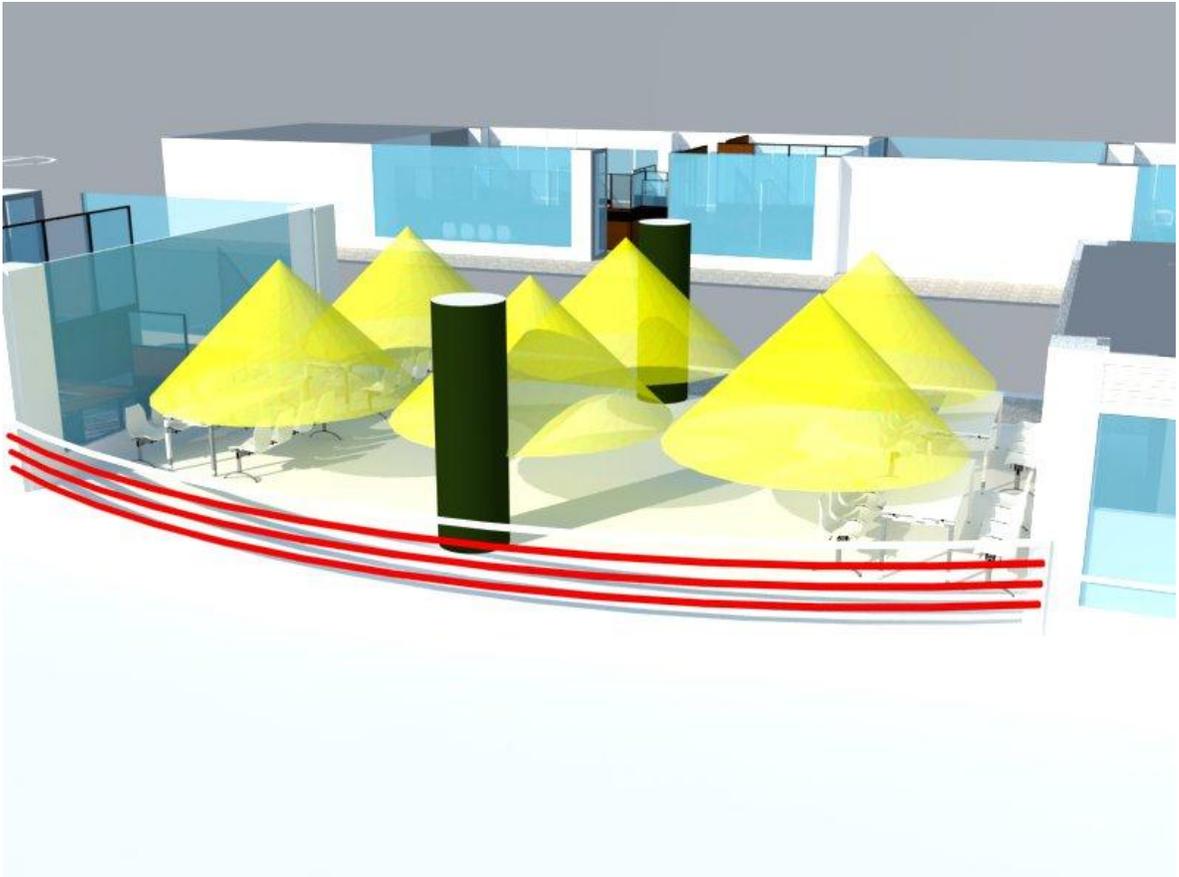


Figura 89 Zona de estar. Borde con borde, geometría cuadrada.

En este espacio no se requiere tabla para determinar el tiempo de reverberación TR_{60} , puesto que, al ser un espacio semi-abierto, no existe reverberación de las ondas sonoras.

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d2 = 2.67m - 1m$$

$$d2 = 1.67 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 90 + 20 \log(1.67)) / 10}$$

$$EPR = 5.5 W$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.5
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	16
EPR (W)	5.5
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2' (Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
108,64	6,11111	6,99	0,13984	409,09	25,57	1,79	29,48	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.5
Potencia del amplificador (W)		108.64
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		108.64
Relación de transformación de T1, α_1		1.7877
Potencia de los transformadores reductores (W)		6.11
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1398
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	29.48	

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1.5) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.17 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4r^2}$$

$$N = \frac{84}{4 * 1.17^2}$$

$$N = 15.34$$

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.67 \text{ m} - 1.5 \text{ m}$$

$$d_2 = 1.17 \text{ m}$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.17)) / 10}$$

$$EPR = 2.73 \text{ W}$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	2.73
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	16
EPR (W)	2.73
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2' (Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
53,93	3,03333	4,93	0,09852	824,18	51,51	2,54	20,77	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		2.73
Potencia del amplificador (W)		53.93
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		53.93
Relación de transformación de T1, α_1		2.5375
Potencia de los transformadores reductores (W)		3.03
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.0985
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	20.77	

7.16 Promoción académica:



Figura 90 Promoción académica

Área del piso: 41,36 m².

Tipo de distribución: Solapamiento mínimo, geometría hexagonal.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.67 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{41.36}{4 * 1.67^2}$$

$$N = 3.7 \approx 4$$

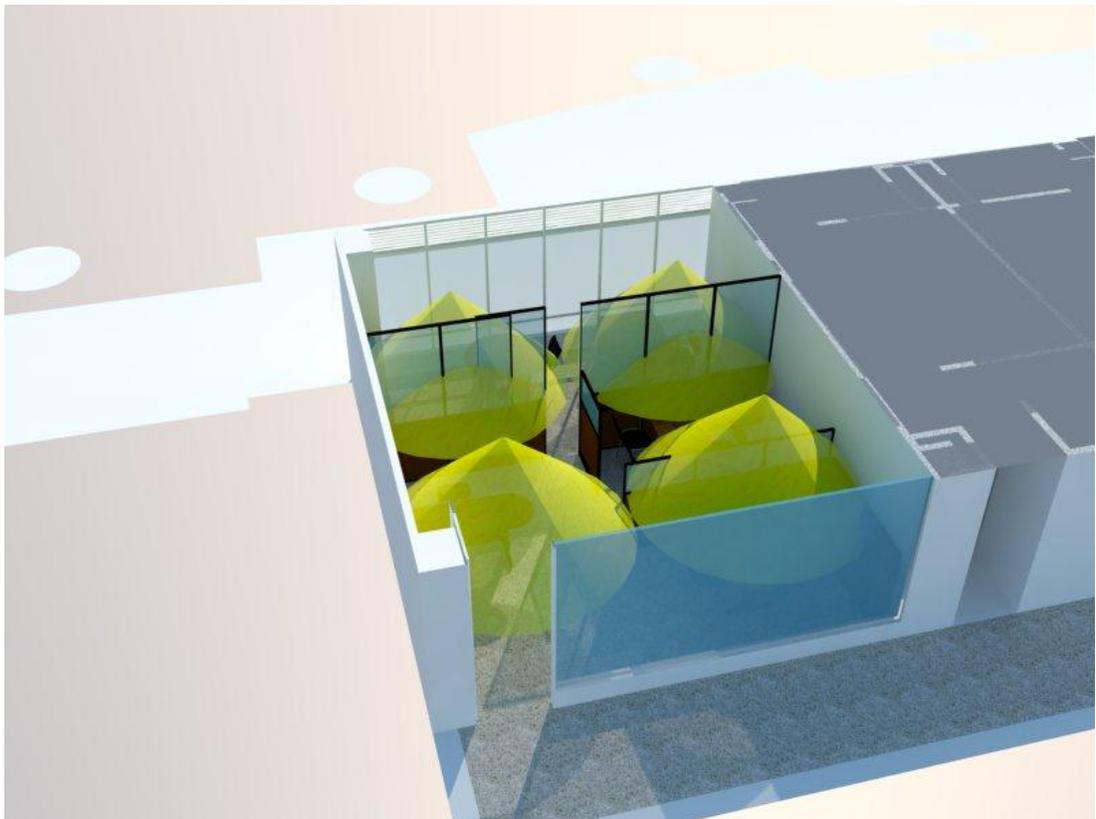


Figura 91 Promoción académica. Solapamiento mínimo, geometría hexagonal.

Tabla 41 Cálculo del Coeficientes de absorción. Promoción académica

PROMOCIÓN ACADEMICA	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción αs (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	41.81	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Revoque yeso	41.81	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	
P U E R T A S	1	puerta abierta	2.67	1	1	1	1	1	
		hormigón pintado	2.41	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	10.66	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	19.22	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		3	hormigón pintado	1.99	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	Vidrio		10.23	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	Rejilla de ventilación		2.8	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	4	hormigón pintado	19.32	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
superficies representivas	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		7.615	6.596	5.568	7.155	7.54	7.609	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.05	0.043	0.036	0.047	0.049	0.05	

Tabla 42 Cálculo para el tiempo de reverberación. Promoción académica

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	152.92	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	2.50

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.67m - 1m$$

$$d_2 = 1.67 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(2.67)) / 10}$$

$$EPR = 5.5W$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.5
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	4
EPR (W)	5.5
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
27,16	6,11111	6,99	0,13984	409,09	102,27	3,58	14,74	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5,5
Potencia del amplificador (W)		27,16
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		27,16
Relación de transformación de T1, α_1		3,5755
Potencia de los transformadores reductores (W)		6,11
Relación de transformación de T2 (α_2)		0,1398
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52,70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	14,74	

7.17 Liquidaciones



Figura 92 Liquidaciones

Área del piso: 87 m².

Tipo de distribución: Borde con borde, geometría cuadrada.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$
$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$
$$r = 1.67 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4r^2}$$

$$N = \frac{87}{4 * 1.67^2}$$

$$N = 7.79$$

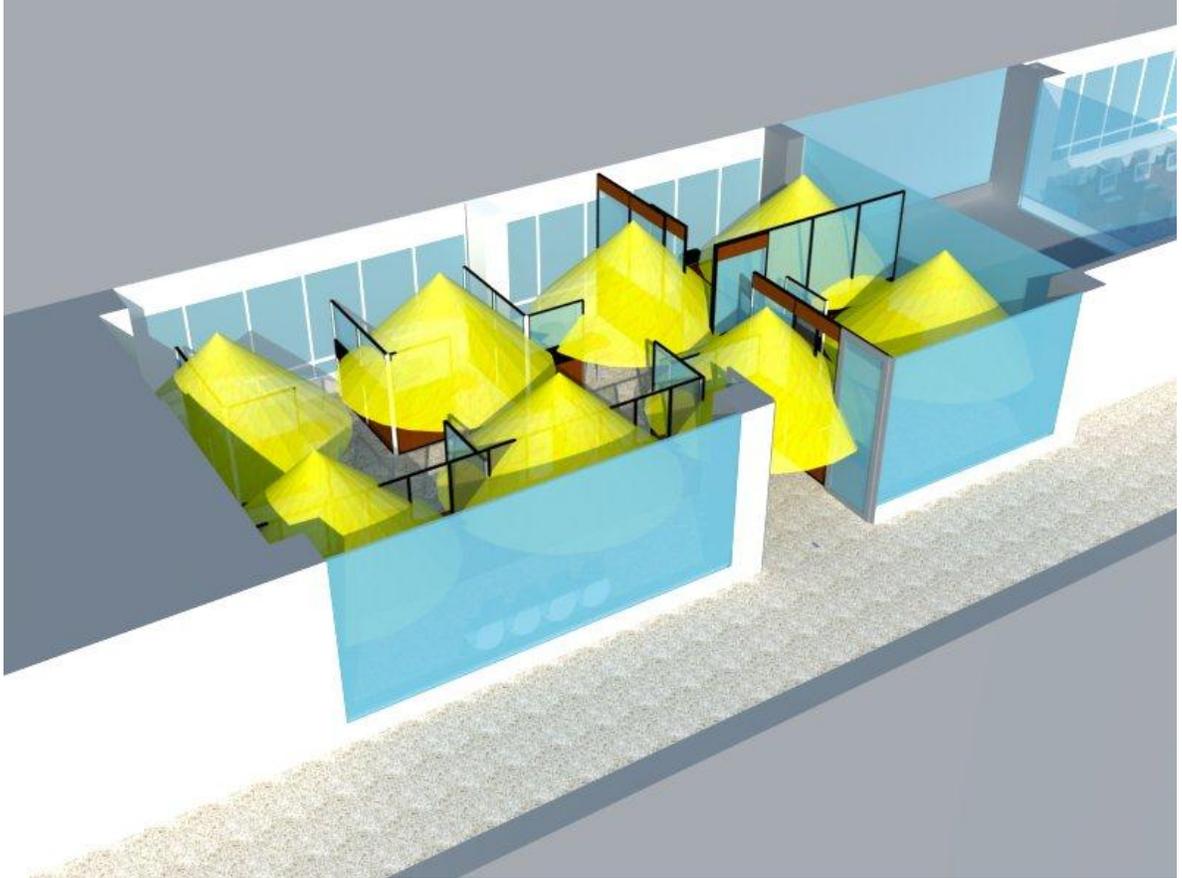


Figura 93 Liquidaciones. Borde con borde, geometría cuadrada.

Tabla 43 Cálculo del Coeficientes de absorción. Liquidaciones

LIQUIDACIONES	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	87.00	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Revoque yeso	87.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	
P A R T E S	1	vidrio	21.33	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		puerta abierta	5.13	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	5.66	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	12.11	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		espacio vacio	6.85	1	1	1	1	1	1
	3	hormigón pintado	5.72	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	20.88	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		rejilla de ventilacion	8.96	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	4	hormigón pintado	18.96	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	superficies representivas	-	-	-	-	-	-	-	-
-		-	-	-	-	-	-	-	
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		22.81	17.66	14.02	16.45	16.63	16.36	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.082	0.063	0.05	0.059	0.059	0.059	

Tabla 44 Cálculo para el tiempo de reverberación. Liquidaciones

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	279.6	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	2.26

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.67m - 1m$$

$$d_2 = 1.67 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.67)) / 10}$$

$$EPR = 5.5 W$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.5
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	8
EPR (W)	5.5
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2' (Ω)	m elevado r	V1 (V)	V2 (V)
54,32	6,11	6,99	0,1398	409,09	51,14	2,53	20,85	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.5
Potencia del amplificador (W)		54.32
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		54.32
Relación de transformación de T1, α_1		2.5282
Potencia de los transformadores reductores (W)		6.11
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1398
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	20.85	

7.18 Sala de capacitaciones de NTIC's



Figura 94 Sala de capacitaciones de NTIC's

Área del piso: 43 m².

Tipo de distribución: Borde con borde, geometría cuadrada.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$
$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$
$$r = 1.67 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4r^2}$$
$$N = \frac{43}{4 * 1.67^2}$$
$$N = 3.85$$

Tabla 45 Cálculo del Coeficientes de absorción. Sala de capacitaciones NTIC's

Sala de capacitaciones	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	43.00	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Revoque yeso	43.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	
P A R E D E S	1	vidrio	7.52	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		puerta abierta	2.56	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	2.21	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	18.96	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		hormigón pintado	3.84	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	3	vidrio	8.28	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		rejilla de ventilacion	4.2	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	4	hormigón pintado	18.96	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		mesas de madera	25.65	0.1	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03
	superficies representivas	-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		11.8	9.605	7.54	9.031	9.051	8.8	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.066	0.054	0.042	0.051	0.051	0.049	

Tabla 46 Cálculo para el tiempo de reverberación. Sala de capacitaciones NTIC's

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	178.18	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	2.29

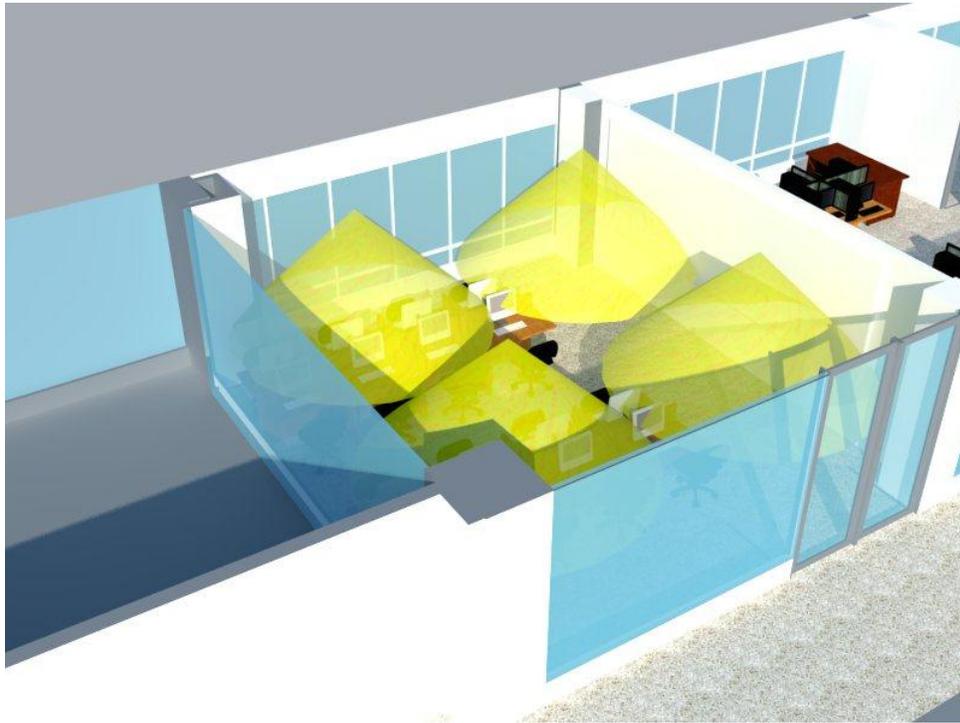


Figura 95 Sala de capacitaciones de NTIC's. Borde con borde, geometría cuadrada.

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.67m - 1m$$

$$d_2 = 1.67 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.67)) / 10}$$

$$EPR = 5.5 W$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.5
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	4
EPR (W)	5.5
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
27,16	6,11	6,99	0,1398	409,09	102,27	3,58	14,74	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.5
Potencia del amplificador (W)		27.16
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		27.16
Relación de transformación de T1, α_1		3.5755
Potencia de los transformadores reductores (W)		6.11
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1398
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	14.74	

7.19 Conjunto de oficinas: Nuevas tecnologías, ICETEX, dirección de biblioteca

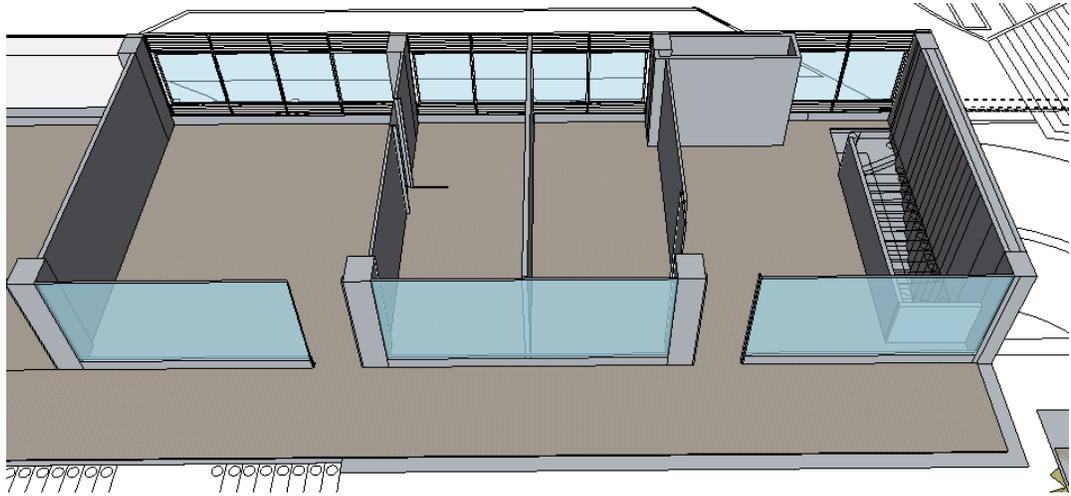
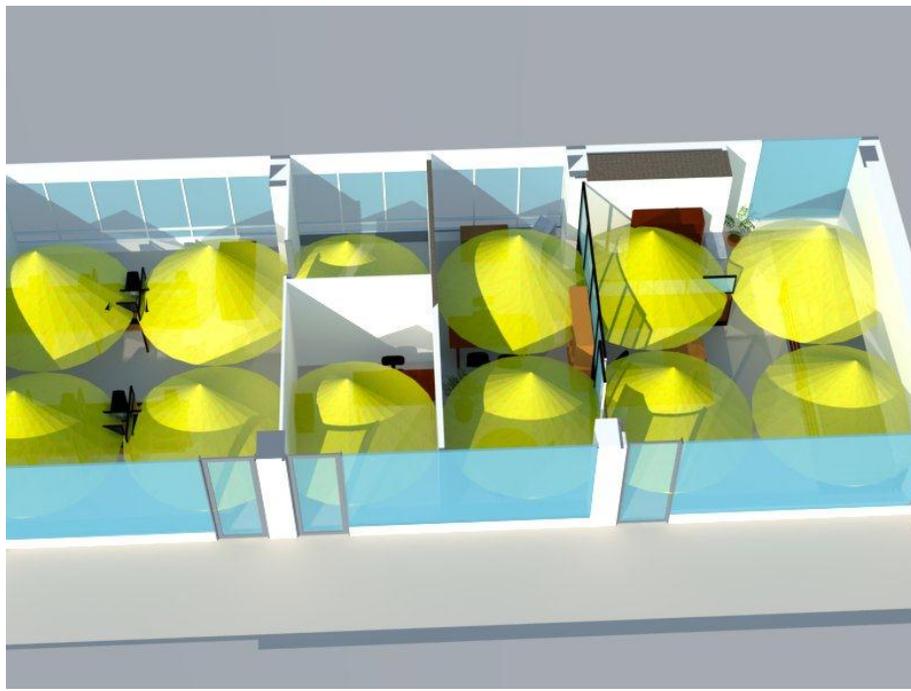


Figura 96 Nuevas tecnologías, ICETEX, dirección de Biblioteca

Son espacios iguales, con la diferencia la oficina del centro, tiene un acople modular que divide la oficina en dos.

Tabla 47 Nuevas tecnologías, ICETEX, dirección de Biblioteca. Borde con borde, geometría cuadrada



7.20 Nuevas tecnologías



Figura 97 Nuevas tecnologías

Área del piso: 42,32 m².

Tipo de distribución: Solapamiento mínimo, geometría hexagonal.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.67 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4 * r^2}$$

$$N = \frac{42.32}{4 * 1.67^2}$$

$$N = 3.79$$

Tabla 48 Cálculo del Coeficientes de absorción. Nuevas tecnologías

NUEVAS TECNOLOGÍAS		TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α (sabine) para diferentes frecuencias					
				125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
PISOS		Enlozado	62,19	0,01	0,015	0,002	0,025	0,03	0,035
TECHOS		Revoque yeso	62,19	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
P A R E D E S	1	vidrio	10,66	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		puerta abierta	2,56	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	2,21	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	2	hormigon pintado	18,96	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
		hormigón pintado	2,37	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	3	vidrio	8,76	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		rejilla de ventilacion	4,65	0,5	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25
		hormigón pintado	19,08	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	4	espacio vacio	2,21	1	1	1	1	1	1
		superficies representivas	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial		$\sum (S * \alpha_s)$		12,883	10,863	9,2012	11,253	11,759	11,84
coeficiente de absorción promedio		$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0,0658	0,0555	0,047	0,0575	0,06	0,06

Tabla 49 Cálculo para el tiempo de reverberación. Nuevas tecnologías

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	195.84	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	2.36

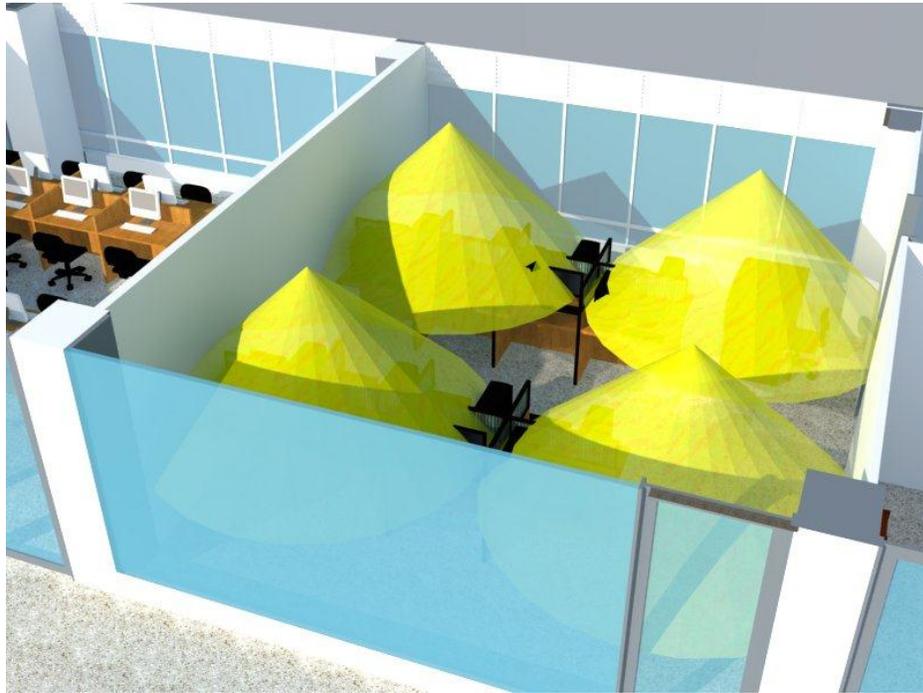


Figura 98 Nuevas tecnologías. Solapamiento mínimo, geometría hexagonal.

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.67m - 1m$$

$$d_2 = 1.67 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(2.67)) / 10}$$

$$EPR = 5.5W$$

La potencia total requerida en este espacio utilizando la distribución borde con borde, arreglo cuadrado:

$$P_T = N * EPR \quad P_T = 4 * 0.55 W$$

$$P_T = 2.2 W$$

7.21 ICETEX

Es un espacio de dimensiones iguales a los anteriores solo que está dividido en dos partes.

Área del piso: 19.79 m².

Tipo de distribución: Borde con borde, geometría cuadrada.

Radio de cubrimiento:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2}$$

$$r = 1.67 \text{ m}$$

Número de parlantes:

$$N = \frac{S}{4r^2}$$

$$N = \frac{19.79}{4 * 1.67^2}$$

$$N = 1.77$$

Tabla 50 Cálculo del Coeficientes de absorción. ICETEX

ICETEX		TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α (sabine) para diferentes frecuencias					
				125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
PISOS		Enlozado	19.79	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035
TECHOS		Revoque yeso	19.79	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
P A R T E S	1	puerta abierta	2.21	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	16.59	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	0.72	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	4.22	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		rejilla de ventilacion	2.21	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	3	hormigón pintado	18.96	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	4	vidrio	6.39	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	superficies representativas		-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial		$\sum (S * \alpha_s)$		12.36	10.01	8.633	10.23	10.39	10.37
coeficiente de absorción promedio		$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.136	0.11	0.095	0.113	0.114	0.114

Tabla 51 Cálculo para el tiempo de reverberación. ICETEX

DIMENSIONES		CÁLCULOS		
ÁREA TOTAL	90.88	α a 1000Hz		0.21
		Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$	0.83

Distancia al punto:

$$d_2 = (h - l)$$

$$d_2 = 2.67m - 1m$$

$$d_2 = 1.67 m$$

Potencia eléctrica necesaria:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(83 - 80 + 20 \log(1.67)) / 10}$$

$$EPR = 5.5 W$$

Z AMP (Ω)	8
Potencia de carga (W)	5.5
eficiencia elevador 'n1'	0.9
eficiencia reductor 'n2'	0.9
número de parlantes	2
EPR (W)	5.5
V2 (V)	50

Potencia red W (W)	P3 (W)	V3 (V3)	m reductor	Z2 (Ω)	Z2'(Ω)	m elevador	V1 (V)	V2 (V)
13,58	6,11	6,99	0,1398	409,09	204,55	5,06	10,42	52,70

Impedancia de los parlantes ZL (Ω)		8
Potencia requerida por un parlante, EPR (W)		5.5
Potencia del amplificador (W)		13.58
Impedancia del amplificador (Ω)		8
Potencia de T1 (W)		13.58
Relación de transformación de T1, α_1		5.0565
Potencia de los transformadores reductores (W)		6.11
Relación de transformación de T2 (α_2)		0.1398
Voltaje en bornes del transformador reductor		
Vsecundario (V)	52.70	
Vprimario (V)	50	
Voltaje en bornes del transformador elevador		
Vsecundario (V)	50	
Vprimario (V)	10.42	

7.22 Dirección de biblioteca

Igual que nuevas tecnologías e ICETEX, se puede escoger cualquiera de los dos diseños anteriores ya que las oficinas poseen las mismas características geométricas aunque con diferentes elementos y materiales de construcción.

CAPÍTULO 8: ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

8.1 Consideraciones generales para el acondicionamiento acústico.

A continuación se presentan los elementos representativos para esta labor:

8.1.1 Absorción del público y de las sillas²⁰

El grado de reverberación asociado a un recinto cualquiera viene determinado principalmente por los materiales absorbentes utilizados como revestimientos de sus superficies así como por la absorción producida por el público y las sillas existentes. Si se considera que el público se halla más o menos disperso, como es el caso de los asistentes a un polideportivo, en lugar de hacer uso del coeficiente de absorción unitario α (es decir, absorción por m^2), suele utilizarse la absorción por persona A_{pp} . En tal caso, la absorción total del público A_p es:

$$A_p = NA_{pp}(\text{en sabins})$$

en donde:

N= número de personas.

A_{pp} =absorción de una persona de pie o sentada.

La absorción total A_{tot} del recinto se obtiene sumando este término con la absorción producida por sus superficies límite:

$$A_{tot} = \sum_i S_i \alpha_i + A_p$$

en donde:

S_i =superficie "i".

α_i = coeficiente de absorción de la superficie "i".

Si se desea asignar al público un coeficiente de absorción unitario α_p , se divide A_p por la superficie ocupada por el mismo, S_p :

$$\alpha_p \frac{A_p}{S_p}$$

²⁰ CARRIÓN ISBERT Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Ediciones UPC, 1998. 108 p.

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de absorción para tres casos.

Tabla 52 Ejemplos de absorción de una persona App.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Persona de pie con abrigo	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Persona de pie sin abrigo	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Músico sentado con instrumento	0,60	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08

Si ahora se considera la disposición habitual del público en salas destinadas a espectáculos públicos, se observa que los asistentes están agrupados; por esto, se utilizan coeficientes de absorción unitarios (por m^2) en lugar de la absorción por persona.

En tal caso, se usan dos conjuntos de coeficientes de absorción: Los correspondientes a las sillas ocupadas y los asociados a las sillas vacías. Ello es debido a que las sillas, por sí mismas, presentan una notable absorción que siempre hay que tener en cuenta.

El motivo de este planteamiento en el cálculo de la absorción es que la absorción de las sillas (vacías u ocupadas) aumenta en proporción directa a la superficie que ocupan, casi con total independencia del número de las mismas existente en dicha superficie.

La absorción total de las sillas A_s se calcula de la siguiente forma:

$$A_s = S_A \alpha_s$$

en donde,

S_A = superficie acústica efectiva ocupada por las sillas (en m^2): formada por la superficie real S_s ocupada por las mismas más la superficie total de las bandas perimetrales de 0,5 m de anchura que bordean los diferentes bloques de sillas (exceptuando las zonas contiguas a una pared).

α_s = coeficiente de absorción unitario de las sillas, vacías u ocupadas

En la figura 97 se muestra un ejemplo de la forma de calcular S_A .

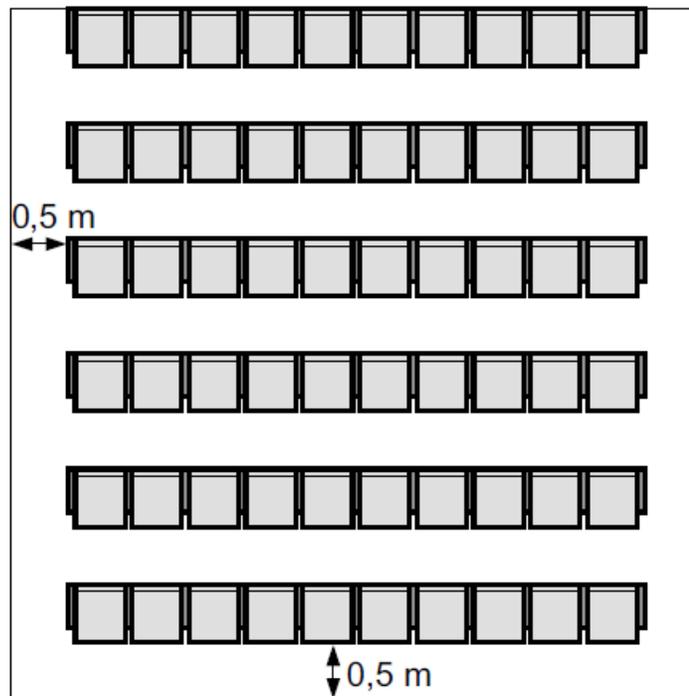


Figura 99 Superficie acústica efectiva S_A ocupada por las sillas, calculada a partir de la superficie real S_S y de la banda perimetral de anchura 0,5m²¹

8.1.2 Materiales y elementos utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos.²²

Si, al realizar el análisis para el cálculo del tiempo de reverberación, se obtiene como resultado un valor mayor a 1.5 segundos, se aconseja realizar un acondicionamiento acústico en el interior del espacio. Este acondicionamiento acústico consiste en dotar al espacio tratado de materiales que cubran las superficies que presenten mayor coeficiente de absorción para que, de esta forma, al producirse una señal sonora, ésta sea absorbida con la mayor rapidez posible.

En un recinto, la reducción de la energía sonora se debe principalmente a:

- El público y las sillas
- Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto (esto dispuesto así en sala de conciertos).

²¹ *Ibíd.*, p. 110.

²² *Ibíd.*, p. 72.

- Todas aquellas superficies límite de la sala susceptible de entrar en vibración (como, por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- El aire
- Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (como, por ejemplo, el hormigón).

Para realizar cualquier diseño acústico, es importante conocer los coeficientes de absorción de los materiales donde incidan las ondas sonoras; estos datos se obtienen mediante ensayos de laboratorio según un procedimiento homologado.

A continuación se da una descripción de los materiales y elementos más incidentes en la absorción de la energía sonora.

8.1.3 Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techos.²³

Los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techos son materiales rígidos con porosidad nula, que dan lugar a una mínima absorción del sonido. Este tipo de materiales, disipan la energía sonora en forma de calor en sus capas de aire adyacentes; además, son utilizados en las cámaras reverberantes, diseñadas y adecuadas para realizar pruebas técnicas, con el fin de determinar los coeficientes de absorción.

En la figura 98 se muestra una cámara reverberante; el laboratorio presenta superficies límite revestidas con materiales totalmente reflectantes; dispone también de elementos convexos suspendidos del techo con una orientación y distribución irregulares, cuya misión es crear un campo sonoro difuso. Cabe decir también, que la sala es asimétrica.

²³ Ibíd., p. 72.



Figura 100 Cámara reverberante.²⁴

8.1.4 Absorción del aire.²⁵

La absorción producida por el aire es solamente significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias mayores o iguales a 2 Khz y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%). Dicha absorción se representa por la constante m .

La fórmula de Sabine puede ser replantada para considerar la absorción del aire, basta agregar un factor '-4mV' en el denominador.

$$\text{Tiempo de reverberación}(TR_{60}) = \frac{0.161 * V}{S * \bar{a}_s - 4mV} [s]$$

en donde el nuevo parámetro, -4mV, es un coeficiente de absorción del aire dependiente de la humedad, la frecuencia y la temperatura.²⁶

En la figura 101 se presenta una gráfica mediante la que es posible determinar el valor del producto 4m en condiciones estándares de presión y temperatura ($P_0 = 10^5$ Pa y 20 °C), para distintas frecuencias y porcentajes de humedad relativa del aire.

²⁴ Cámara reverberante. (s.f).{Citado 09-oct-2012} disponible en internet: <http://www.ccadet.unam.mx/secciones/depar/sub3/acusvi/acust.html>

²⁵ Carrión Isbert Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC,1998; Pag.73.

²⁶http://www.labc.usb.ve/paginas/EC4514/AUDIO/ACUSTICA_ARQUITECTONICA/Reverberacion.html

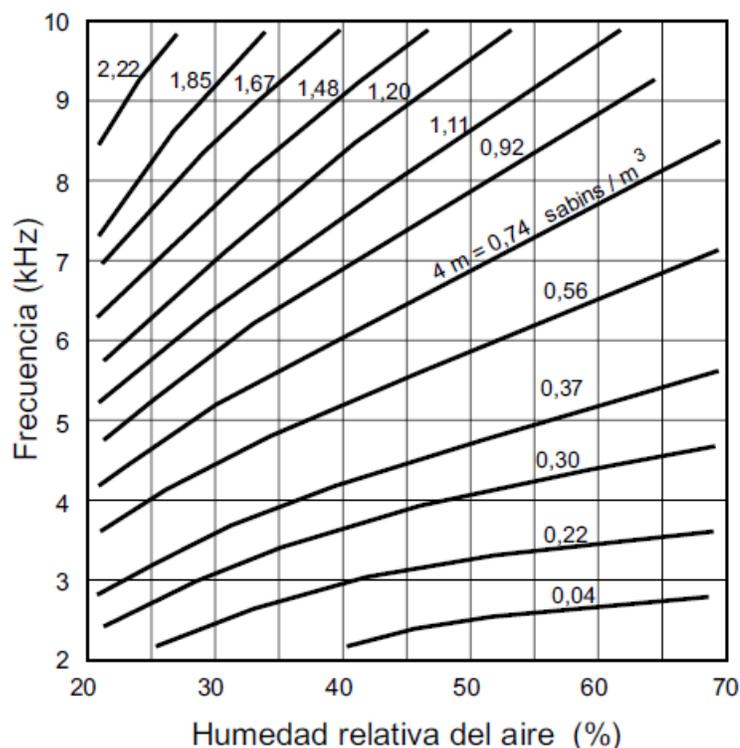


Figura 101 Atenuación del sonido en función de la frecuencia y la humedad relativa del aire.²⁷

$$RT = \frac{0.161 V}{S * \bar{\alpha}_s + 4mV}$$

8.1.5 Absorción de las superficies vibrantes²⁸

La presencia en una sala de superficies límite susceptibles de entrar en vibración, como puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras, da lugar a una cierta absorción. Sin embargo, esta labor queda fuera del alcance de este trabajo, pues esto ocurre principalmente por falta de aislamiento acústico, el cual no ha sido tenido en cuenta.

8.1.6 Materiales absorbentes²⁹

La absorción de las ondas sonoras, producto de la interacción con este tipo de materiales, varía notablemente de un material a otro. Por tal motivo, es importante

²⁷ Carrión Isbert Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 1998. p. 74

²⁸ Ibíd., p. 74.

²⁹ Ibíd., p. 75.

la correcta elección de los mismos, pues permitirá obtener la absorción más adecuada en todas las bandas de interés.

Los materiales absorbentes, aplicados al acondicionamiento acústico, se utilizan generalmente para conseguir uno de los siguientes objetivos:

- Obtención de los tiempos de reverberación adecuados en función de la actividad a la cual se haya previsto destinar el espacio.
- Prevención o eliminación de ecos
- Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos.

Estos materiales presentan un gran número de micro canales, en los cuales una parte de la onda sonora penetra el material, se atenúa y alcanza de nuevo su superficie después de reflejarse en la pared rígida posterior. La energía remanente se divide, nuevamente, en una parte que atraviesa la superficie del material y otra que vuelve a la pared posterior a través del material. Este proceso, es el responsable de la gran parte de la absorción de las ondas sonoras. La siguiente gráfica muestra de manera simplificada el proceso.

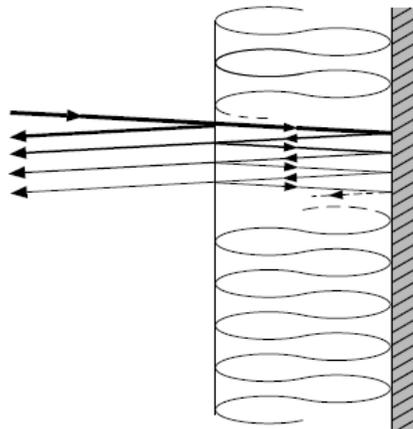


Figura 102 Representación de la absorción de los materiales absorbentes.³⁰

Los elementos absorbentes comerciales están, en su mayoría, fabricados a partir de los siguientes materiales.

- Lana de vidrio.
- Lana mineral.
- Espuma a base de resina de melanina.
- Espuma de poliuretano.

³⁰ Imagen tomada de: CARRIÓN ISBERT Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 1998; Pag.76.

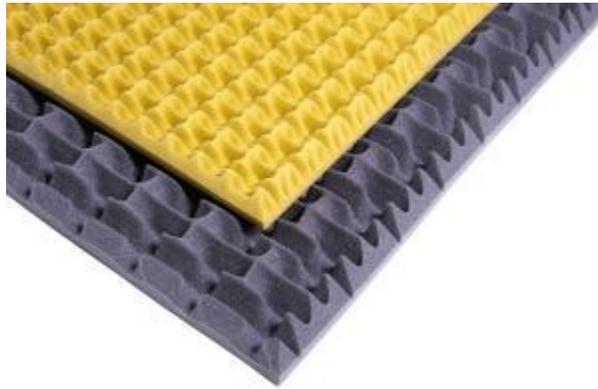


Figura 103 Material absorbente hecho con espuma de poliuretano.³¹

8.2 Acondicionamiento acústico.³²

En el acondicionamiento acústico, es común que el diseñador cubra el techo con estos materiales a manera de cielo raso. La razón de eso es que, por lo general, esta parte presenta la mayor área dentro de un recinto. Otra causa de esta práctica es que en algunas ocasiones no es posible, por causas funcionales o estéticas, cubrir las paredes o ventanales de estos espacios.

Además de lo anterior, resulta conveniente cubrir los materiales absorbentes por la cara expuesta al recinto. Los principales motivos son los siguientes:

- Algunos materiales desprenden partículas que pueden llegar a contaminar el aire de la sala.
- Los materiales pueden resultar dañados por manipulación de las personas cercanas.
- Se desea ocultarlos por razones eminentemente estéticas.

A continuación se presentan 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.
- Placa de viruta de madera fina aglomerada con magnesita o cemento
- Lámina de plástico o de papel
- Listones de madera.

³¹ Servidata - Fonac Economy 75mm. (s.f).{Citado 09-oct-2012} disponible en internet: <http://www.servidata.net/producto.php?id=917>

³² Ibíd., p. 71.

8.3 Obtención del tiempo de reverberación deseado.³³

Para esta labor, es importante definir primero las superficies que deberán ser tratadas acústicamente y los materiales absorbentes a utilizar, a fin de que el tiempo de reverberación, en condiciones de ocupación, se halle dentro de los márgenes establecidos en dicho apartado.

El proceso de cálculo es el siguiente:

- Se define cuáles son las superficies a tratar. En principio, con independencia de la tipología considerada, las superficies óptimas son el techo (o falso techo) y las partes superiores de las paredes.
- Se asigna a las superficies elegidas los materiales absorbentes que se utilizarán como revestimientos.
- Se calculan los coeficientes de absorción a frecuencias de 500 Hz y 1KHZ, el resto de superficies podrán ser tratados con materiales reflectantes.
- Se determina la absorción correspondiente al público en las bandas de octava de 500 Hz 1 kHz:
- Si se trata de un espacio donde las personas no están agrupadas, se parte de la absorción asociada a una persona, y los correspondientes valores se multiplicarán por el número estimado de personas.
- Si se trata de un espacio donde las personas se hallan agrupadas y sentadas, será necesario utilizar los coeficientes unitarios de absorción proporcionados por el fabricante de la silla que se vaya a utilizar, en condiciones de silla ocupada. En el caso, de no disponer de los mismos, habrá que recurrir al uso de una base de datos con el riesgo de error que ello conlleva.
- Es preciso tener presente que la superficie correspondiente no será exclusivamente la ocupada por las sillas, sino que deberá considerarse la denominada superficie acústica efectiva de audiencia S_A .³⁴

La absorción total de las sillas será $A_s = S_A \alpha_s$.

- Si se trata de una sala de conferencias o un aula, se procederá de forma análoga al caso anterior.

³³ *Ibíd.*, p. 146.

³⁴ Carrión Isbert Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC,1998; Pag.108

8.4 Acondicionamiento acústico aplicado a los espacios que lo requieran.

El primer lugar encontrado que necesita de este tipo de acondicionamiento es la zona de estar de la biblioteca, que, a diferencia de los espacios aledaños, no cuenta con un techo falso, que es en definitiva el material que absorbe en mayor medida la energía acústica generada en esta sala. Lo mismo sucede con la totalidad de las oficinas presentes en el segundo piso.

Siguiendo el procedimiento anteriormente expuesto, se escogen los techos como lugares óptimos para asignar las nuevas superficies. Estos se cubren con láminas a base de poliuretano con el fin de reducir los tiempos de reverberación considerablemente.

Lo siguiente es asignar a estas superficies el material seleccionado para recalcular el tiempo de reverberación a partir del coeficiente de absorción a 500Hz y 1 KHz. A continuación se presentan las tablas con los cálculos para los diferentes espacios.

Tabla 53 Cálculo del coeficiente de absorción y tiempo de reverberación con acondicionamiento acústico en el techo, para la recepción

RECEPCIÓN	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	23.66	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Techo falso	23.66	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76	
P U E R T A S	1	vidrio	7.76	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		puerta abierta	5.34	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	1.78	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	9.88	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		ventana abierta	0.87	1	1	1	1	1	1
	3	hormigón pintado	14.88	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	4	hormigón pintado	11.3	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	superficies representativas	-	-	-	-	-	-	-	-
Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		15.53	14.24	17.56	22.33	24.02	25.32	
coeficiente de absorción promedio	$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.157	0.144	0.177	0.225	0.242	0.255	

sumatoria superficies	99.13
Volumen	63.1722
Área del suelo	23.66
altura	2.67

DIMENSIONES		CÁLCULOS			
ÁREA TOTAL	99.13	Tiempo de reverberación TR60 (s)	$0.16 * V$	1KHz	2KHz
			$S * a$	0.45	0.58

Tabla 54 Cálculo del coeficiente de absorción y tiempo de reverberación con acondicionamiento acústico en el techo, para la oficina de comunicaciones y relaciones públicas.

COMUNICACIONES Y RELACIONES PÚBLICAS	TIPOS DE SUPERFICIES	AREA m ²	Coeficiente de absorción α_s (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	45.48	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	techo falso	45.48	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76	
P A R E D E S	1	vidrio	10.66	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		puerta abierta	2.67	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	4.2	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	4.75	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	14.45	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	3	hormigón pintado	4.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	10.34	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		Rejilla de ventilación	4.48	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	4	hormigón pintado	12.81	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		entradas abiertas	6.8	1	1	1	1	1	1

Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$	27.47	22.53	28.06	36.06	38.89
Coeficiente promedio	$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$	0.215	0.184	0.219	0.269	0.287

sumatoria superficies	159.34	DIMENSIONES		CÁLCULOS			
Volumen	121.4316	ÁREA TOTAL	159.34	Tiempo de reverberación TR60 (s)	$0.16 * V$	1Hz	500 Hz
Área del suelo	45.48				$S * a$	0.45	0.56
altura	2.67						

PROMOCIÓN ACADEMICA	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción αs (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	41.81	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Techo falso	41.81	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76	
P U E R T A S	1	puerta abierta	2.67	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	2.41	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		vidrio	10.66	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	19.22	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		3	hormigón pintado	1.99	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	Vidrio		10.23	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	Rejilla de ventilación		2.8	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	4	hormigón pintado	19.32	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	Sumatoria parcial	$\sum (S * \alpha_s)$		20.99	19.14	24.8	32.66	35.55	37.71
	coeficiente de absorción promedio	$\bar{\alpha}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$		0.137	0.125	0.162	0.214	0.232	0.247
DIMENSIONES		CÁLCULOS							
ÁREA TOTAL	152.92	Tiempo de reverberación TR60 (s)	$\frac{0.16 * V}{S * a}$		1Khz	500 Hz			
					0.55	0.55			

Tabla 55 Cálculo del coeficiente de absorción y tiempo de reverberación con acondicionamiento acústico en el techo, para la oficina de nuevas tecnologías.

NUEVAS TECNOLGÍAS	TIPOS DE SUPERFICIE	AREA m ²	Coeficiente de absorción αs (sabine) para diferentes frecuencias						
			125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
PISOS	Enlozado	43.00	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035	
TECHOS	Techo falso	43.00	0.34	0.32	0.48	0.64	0.71	0.76	
P A R E D E S	1	vidrio	7.52	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
		puerta abierta	2.56	1	1	1	1	1	1
		hormigón pintado	2.21	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	2	hormigon pintado	18.96	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
		3	hormigón pintado	3.84	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	vidrio		8.28	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	rejilla de ventilacion		4.2	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
	4	hormigón pintado	18.96	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	Sumatoria superficies	152.53	DIMENSIONES		CÁLCULOS				
	Volumen	129	ÁREA TOTAL	152.53	α a 1000Hz			0.21	
Área del suelo	43.00	Tiempo de reverberación TR60 (s)			$\frac{0.16 * V}{S * a}$		1Khz	500 Hz	
Altura	3						0.607	0.607	

Las oficinas restantes tienen las mismas medidas que el anterior espacio tratado, por lo cual se omitirán sus correspondientes tablas.

8.5 Ejemplo de diseño

Se empieza por el cálculo del tiempo de reverberación del recinto a tratar, para lo cual es importante conocer los coeficientes de absorción de los materiales que componen las superficies internas para las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hertz, así como sus respectivas áreas.

Adicionalmente, se hará el diseño con un conjunto de altavoces existentes en el laboratorio de la Universidad, cuyas especificaciones son las siguientes: Sensibilidad de 82 dB (1W, 1m), Impedancia de 8 ohmios y un Ángulo de cubrimiento igual a 90°.

Se tiene un espacio tal como el mostrado en la figura 104, cuyas paredes se enumeran tal como allí se indica:

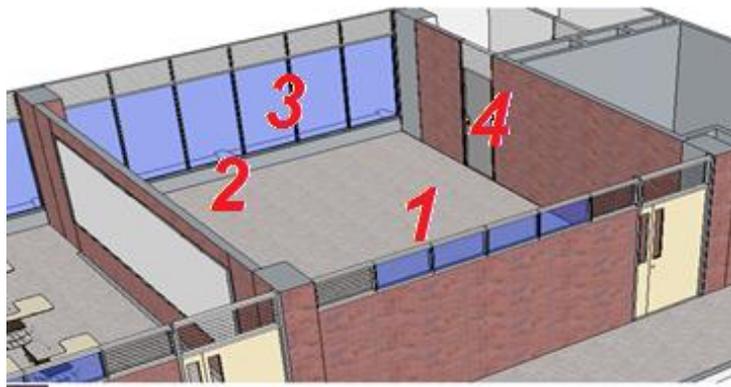


Figura 104 Vista superior de la sala de profesores, con la numeración de sus paredes

La pared que contiene la puerta de acceso es siempre la número uno.

Lo siguiente es identificar los tipos de materiales y sus correspondientes áreas, para el cálculo del coeficiente de absorción. Así, para la pared N°1, se tiene:



Figura 105 Vista frontal de la pared N°1.

Paso siguiente: identificar los tipos de superficies y sus respectivas áreas

TIPO DE MATERIA	ÁREA(m)
Ladrillo sin pintar	10
Rejilla de ventilación	1.3
Vidrio	1.48
Puerta de metal	2.37

Ya identificados los materiales y sus áreas, se procede a la siguiente pared:

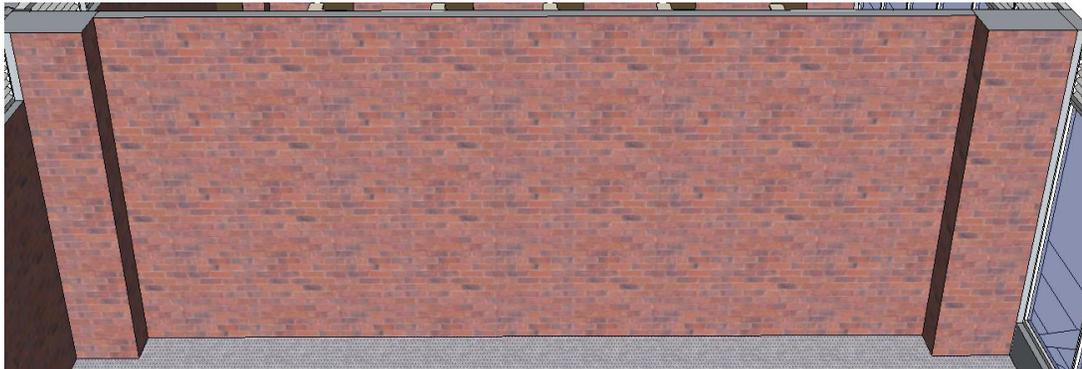


Figura 106 Vista frontal pared N°2

El ladrillo desnudo es la única superficie de esta pared:

TIPO DE MATERIA	ÁREA(m)
Ladrillo sin pintar	19.17

A continuación el Ventanal grande (pared N°3):

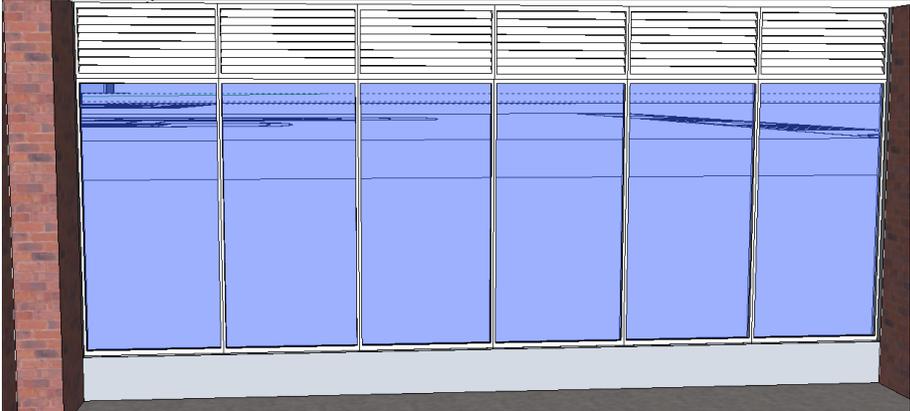


Figura 107 Cara opuesta de la pared de acceso.

TIPO DE MATERIA	ÁREA(m)
Ladrillo sin pintar	0.78
Rejilla de ventilación	2.8
Vidrio	10.47
Hormigón pintado	1.68

Terminando con el análisis de las superficies, se encuentra la pared N° 4, tal como se observa.

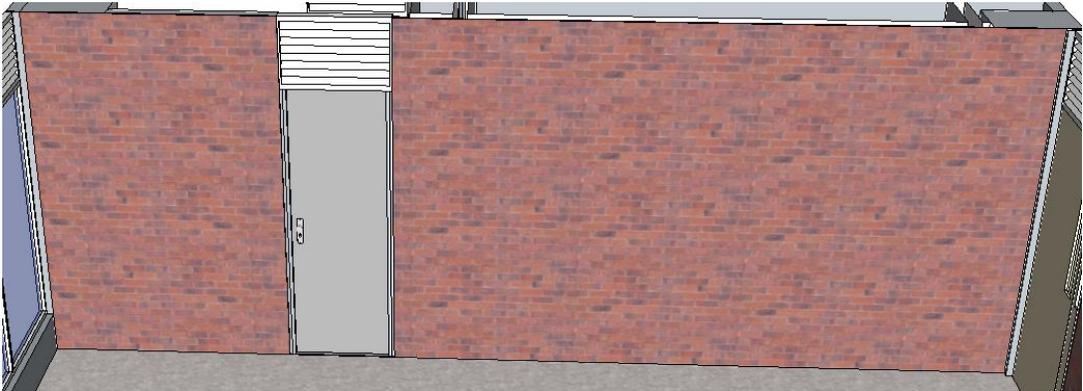


Figura 108 Vista de la pared 4

Las superficies, omitiendo la puerta por ser de metal, tienen las siguientes áreas:

TIPO DE MATERIA	ÁREA(m)
Ladrillo sin pintar	17
Rejilla de ventilación	0.43

Lo siguiente es conseguir los coeficientes de absorción de los materiales, para luego multiplicarlos en cada una de sus frecuencias por su área. La siguiente tabla muestra los coeficientes de absorción a diferentes frecuencias de la pared número uno.

Tabla 56 Coeficientes de absorción de los materiales de la pared N°1.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Ladrillo, sin enlucir	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Rejilla de ventilación	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
Vidrio	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Puerta de metal	-	-	-	-	-	-

En la anterior tabla, no se rellenaron los coeficientes de absorción de la puerta, ya que los metales tienen capacidad nula para absorber las ondas sonoras.

La tabla 57 explica el cálculo de los parámetros. Para tener una referencia respecto al texto, cada acción hará referencia a la parte de dicha tabla que tiene el color del símbolo entre paréntesis:

- Se suman las áreas de las superficies analizadas (●▲●).
- Se realiza el producto de cada coeficiente por su área y para cada frecuencia ($S * \bar{\alpha}_s$) (●▲).
- Se calcula
$$a_s = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i * \alpha_i)}{S}$$
 (●▲●).

Tabla 57 Tabla para hallar el coeficiente de absorción promedio.

P A R E D E S	1	TIPO DE MATERIA	ÁREA(m)	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
		Ladrillo enlucir	10	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
	Rejilla de ventilación	1.3	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25	
	Vidrio	1.48	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	
	Puerta de metal	2.37	-	-	-	-	-	-	
	2	Ladrillo sin enlucir	19.17	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
	3	Ladrillo sin enlucir	0.78	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
		Rejilla de ventilación	2.8	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25
		Vidrio	10.47	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	4	Hormigón pintado	2.37	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Ladrillo sin enlucir		17	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	
	Rejilla de ventilación	0.43	0.5	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25	
	PISO	Enlizado	41.24	0.01	0.015	0.002	0.025	0.03	0.035
	TECHO	Revoque de yeso	41.24	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
	SUMATORIA DE LAS SUPERFICIES		150.65						
				0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
	Volumen	110.1108		0.65	0.65	0.65	0.65	0.455	0.455
	Área del suelo	41.24		0.2664	0.0888	0.0888	0.0888	0.0444	0.0444
	altura	2.67		-	-	-	-	-	-
			αs	0.5751	0.5751	0.5751	0.5751	0.7668	0.7668
				0.0234	0.0234	0.0234	0.0234	0.0312	0.0312
				1.4	1.4	1.4	1.4	0.98	0.98
				1.8846	0.6282	0.6282	0.6282	0.3141	0.3141
				0.0237	0.0237	0.0237	0.0237	0.0474	0.0474
				0.51	0.51	0.51	0.51	0.68	0.68
				0.215	0.215	0.215	0.215	0.1505	0.1505
				0.4124	0.6186	0.6186	0.6186	1.031	1.031
				0.8248	0.8248	0.8248	0.8248	1.2372	1.2372
				$\sum_{i=1}^n (S_i * \alpha_i)$	7.0854	5.8576	5.8576	5.8576	6.1376
			$\bar{a}_s = \frac{\sum (S * \alpha_s)}{S}$	0.04703	0.03888	0.03888	0.03888	0.04074	0.04074

- Por último, se calcula el tiempo de reverberación.

$$(TR_{60}) = \frac{0.161 * V}{S * \bar{a}_s} [s]$$

$$TR_{60} = \frac{0.161 * 110.11}{150.65 * 0.038} [s]$$

$$TR_{60} = 1 [s]$$

En el caso actual de diseño, se establece lo siguiente:

Si $TR_{60} \geq 1.5[S]$, el espacio requerirá acondicionamiento acústico, para lo cual se deberá recalcular el tiempo de reverberación con las nuevas superficies instaladas.

El ejemplo se desarrolla utilizando un parlante con ángulo de cobertura de 90° , así:

en donde,

$$L=1[m]$$

$$h=2.67[m]$$

$$\theta=90^\circ$$

Para solapamiento mínimo, conforme a la tabla N°5, se calculara el número de parlantes:

$$n = \frac{2 * S}{3\sqrt{3}r^2}$$

Para r,

$$r = d * \tan \frac{90}{2},$$

$$r = (2.67 - 1) \tan \frac{90}{2},$$

$$r = 1.67[m]$$

Entonces, para distribuirlos de forma hexagonal:

$$n = \frac{2(41.24m^2)}{3\sqrt{3}(1.67m)^2}$$

$$n = 5.69$$

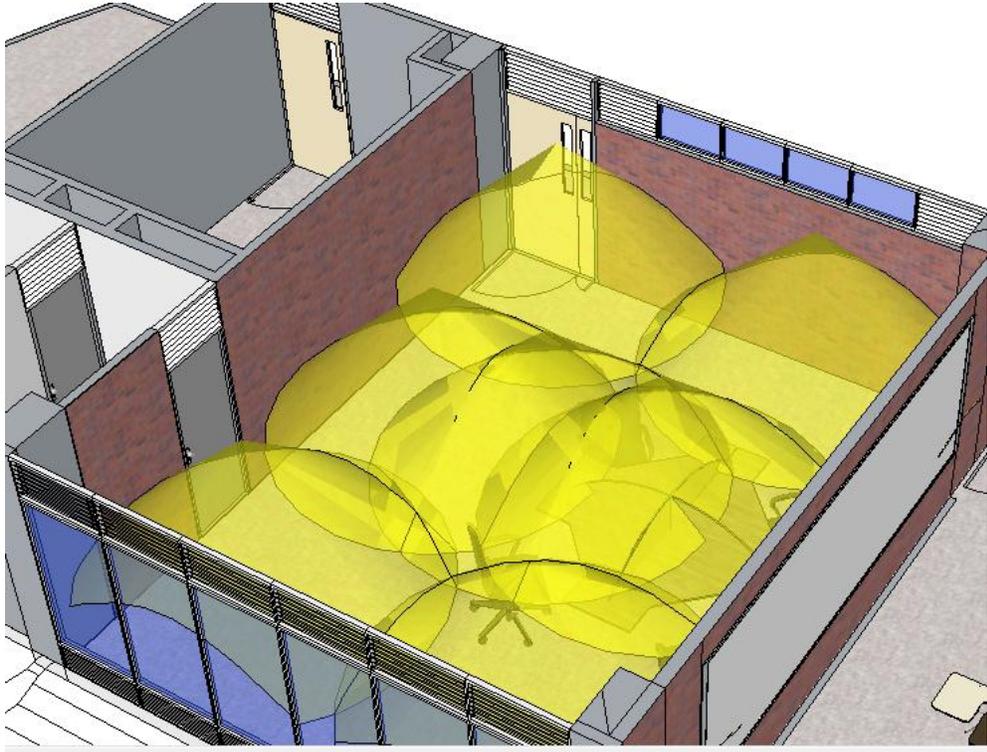


Figura 109 Espacio tratado con la representación de las ondas sonoras directas

Si se considera que el ruido ambiente es de 50dB, se establece que la cota mínima del nivel del refuerzo sonoro debe ser 25 dB por encima de este. Por lo tanto el nivel de presión sonora en el oído del oyente debe ser de 75 dB.

Lo siguiente es determinar el EPR de un parlante, para lo cual se sabe que d_2 es igual 1.67 m. Por lo tanto:

$$EPR = 10^{(L'_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(78 - 82 + 20 \log(1.67)) / 10}$$

$$EPR = 1.11 W$$

El siguiente paso es determinar la potencia mínima del amplificador, teniendo en cuenta las pérdidas en los transformadores y que se tiene una red de alta impedancia. Para el desarrollo de este paso se considera que la eficiencia del transformador elevador es de 0.9 y el del reductor de 0.85.

Entonces,

$$\eta_{\text{red}} = \eta_1 \eta_2$$

$$\eta_{\text{red}} = 0.9 * 0.85$$

$$\eta_{\text{red}} = 0.77$$

La potencia mínima que del parlante teniendo en cuenta las pérdidas:

$$P_{\text{entrada}} = \left(\frac{P_{\text{salida}}}{\eta_{\text{red}}} \right)$$

$$P_{\text{entrada}} = \left(\frac{1.11W}{0.77} \right)$$

$$P_{\text{entrada}} \approx 1.5 W$$

Se calcula, entonces, la potencia mínima que debe tener el amplificador:

$$P_{\text{entrada}} = n * \left(\frac{P_{\text{salida}}}{\eta_{\text{red}}} \right)$$

$$P_{\text{entrada}} = 6 * \left(\frac{1.11W}{0.77} \right)$$

$$P_{\text{entrada}} \approx 9W$$

También se calculan los parámetros de los transformadores y los voltajes en bornes para el acople de impedancias:

El valor EPR determina la potencia mínima necesaria de los parlantes, por lo tanto,

$$V_{\text{bornes del parlante}} = \sqrt{P_{\text{parlante}} * Z_{\text{parlante}}} = \sqrt{1.5 * 8} = 3.46V_{\text{rms}}$$

Se debe considerar para distribuciones en alta impedancias, Voltaje de línea de 50 V o 100V, por lo tanto:

Voltaje de línea =50 V

$$\alpha_2 = \frac{V_{\text{bornes del parlante}}}{V_{\text{Linea}}}$$

$$\alpha_2 = \frac{3.46}{50} \approx 0.07$$

La impedancia vista desde el primario de un solo altavoz será

$$Z_{\text{vista desde el primario}} = \frac{Z_L}{\alpha_2^2} = \frac{8}{0.07^2} \approx 1630\Omega$$

La impedancia vista desde el primario de todos los altavoces será

$$Z_{2'} = \frac{Z_2}{10} = \frac{1630}{6} \approx 272\Omega$$

La relación de transformación del transformador elevador, utilizando un transformador de impedancia de salida de 8 ohmios, será

$$m_1 = \sqrt{\frac{Z_{2'}}{Z_1}} = \sqrt{\frac{272\Omega}{8\Omega}} = 5.8$$

Entonces, se necesita que el amplificador sea capaz de suministrar de 9W como mínimo con voltaje de salida V1, que estará dado, entonces, por

$$V_1 = \sqrt{P_1 * Z_1} = \sqrt{9 * 8} = 8.48 \text{ Vrms}$$

CAPÍTULO 9 VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

La aplicabilidad de este diseño se debe llevar a cabo en un tiempo donde los espacios a sonorizar no sean utilizados por el personal de la Universidad ya que para la ejecución del proyecto es necesario llevar a cabo una serie de modificaciones físicas y estructurales en estas zonas, queriendo evitar algún tipo de imprevisto. El tiempo tentativo para el desarrollo de la obra es de dos a tres meses, en el cual esta abarcado el periodo de vacaciones de final de año.

Viabilidad técnica

El panorama actual facilita la cotización y compra de los equipos necesarios para la implementación del sistema de sonorización. Además, en el mercado se encuentran una amplia gama de productos que satisfacen las necesidades para la compra e instalación del mismo.

Una característica importante a la hora de implementar cualquier sistema de sonorización es la elección de los altavoces, pues ellos determinan la potencia necesaria para producir el nivel de presión sonora requerido. Por ejemplo, en el caso de dos altavoces con la misma impedancia, la misma potencia nominal, pero con una variación de 3dB de sensibilidad (87 dB -90 dB), al momento de requerir una cantidad de presión sonora en un punto ubicado en el eje, el de menor sensibilidad necesitará el doble de potencia eléctrica para lograr la SPL (nivel de presión sonora) que logra el otro. Esta característica se observa a continuación:

Se tienen dos parlantes, uno con sensibilidad de 90 dB (1W,1m) y el otro de 87 dB, y se necesita que cada uno de ellos ofrezca una SPL de 80dB a dos metros de distancia en el eje. Se pide calcular la potencia eléctrica necesaria de cada uno.

Para el parlante con sensibilidad de 90 dB:

$$EPR = 10^{(L_{p(a)}(d) - S_a + 20 \log d_2)/10}$$

$$EPR = 10^{(80dB - 90dB + 20 \log 2)/10} = 0.4 W$$

Para el parlante con sensibilidad de 87 dB:

$$EPR = 10^{(L_p(a)(d) - S_a + 20 \log d_2) / 10}$$

$$EPR = 10^{(80dB - 87dB + 20 \log 2) / 10} \approx 0.8 W$$

Esto se puede traducir en un ahorro de potencia de trabajo en el sistema, pues se requerirá solo la mitad de la potencia para lograr el objetivo. Sin embargo, los parlantes con mayor sensibilidad cuestan muchísimas veces más que uno de sensibilidad estándar.

Las posibilidades de diseño, adquisición y montaje de este sistema son totalmente factibles, pues el sistema es flexible en cuanto a consecución de elementos.

Los diseñadores expertos suelen recomendar dispositivos como los siguientes:

Altavoces

Jbl profesional 8138 de techo



Figura 110 Altavoz Jbl profesional 8138 de techo

Tabla 58 Especificaciones técnicas

Respuesta en frecuencia	95Hz - 18kHz (-10dB)
Ángulo de Cobertura	90° cónico
Sensibilidad	97dB
Manejo de potencia máxima	40W (160W Pico), 2 Horas 25W (100W Pico), 100 Horas
Diámetro	12.9" (327mm)
Peso	3 lbs

Se recomienda este tipo de altavoz por su alta fidelidad y bajo costo, además de que trae un transformador de 6 vatios que permite ser usado en líneas de 50V o 100V. Otra característica importante es que, gracias a su elevada sensibilidad, transmite los máximos niveles de sonido con un mínimo de potencia de salida del amplificador, lo cual hace posible su uso de amplificadores de menor potencia. Su diseño elegante es otra razón por la cual se recomienda, ya que este se instalará en espacios que así lo requieren.

En el ejercicio realizado, se utilizaron altavoces con una sensibilidad de 80dB lo que implica un valor elevado en la potencia de salida de los amplificadores y del transformador elevador.

Para que el análisis de viabilidad sea favorable, se recomienda utilizar altavoces de 90dB en adelante, con el fin de reducir la potencia eléctrica necesaria por parte de los altavoces en una décima parte, facilitando la obtención de los transformadores elevadores y la reducción de costos de los amplificadores.

Amplificadores

AT 300 USB



Figura 111 Amplificador AT 300 USB

Tabla 59 Especificaciones técnicas entregadas por el fabricante

Alimentación	:	117 VAC 60Hz
Consumo	:	100W
Potencia Nominal (RMS)	:	30W
Salida de Altavoz 100V / 70V 4Ω	:	333Ω / 163Ω / 11V
Salida Booster	:	550mV (-5.2 dBV) +/- 10% RCA
Entrada Auxiliar	:	500mV (-6 dBV) +/- 10% RCA
Micrófono 1/3 (balanceado)	:	MIC1 2 mV (-54dBV) XLR
Micrófono 2/4 línea (Sw)	:	MIC2 2 mV Line 400mV TS
Entrada USB	:	USB
Respuesta en Frecuencia @100V	:	65 Hz (-3dB) ~ 17.5 KHz (-3dB)
Distorsión Armónica total (THD @1KHz)	:	> 0.45%
Relación Señal-Ruido (S/N) @4Ω	:	> 80 dB
Prioridades	:	Prioridad MIC1 sobre el resto de las entradas con control de nivel
Protecciones	:	Sobrecarga y corto circuito
Control de Tono	:	Graves +/-5 dβ @ 100Hz y agudos +/-5 dβ @ 10KHz
Diseño Slim	:	2 unidades de rack
Dimensiones Producto (Al. x An. x Prof.) mm.	:	92 x 300 x 241
Peso neto / con USB	:	4.7 Kg.

Se recomienda este tipo de amplificador por su potencia nominal de 30w, más que suficiente para el propósito en cuestión. Ya que los altavoces poseen una sensibilidad alta, el amplificador no necesita entregar valores elevados de potencia. Otra característica de este amplificador es su funcionalidad a un bajo costo. Por otra parte, teniendo en cuenta que la marca Challenger es nacional, se facilita la atención al cliente para efectos de soporte técnico y garantías.

Transformador elevador

Los transformadores a utilizar poseen relaciones de transformación diferentes para cada zona a sonorizar; por esta razón se recomienda mandarlos a construir con un fabricante local. Los datos suministrados para esta fabricación serán: voltaje en el primario, voltaje en el secundario y potencia nominal.

Otros materiales

Cable dúplex polarizado No. 18, Tubo en PVC de ½ pulgada, accesorios varios, costos de obra.

Estos materiales se pueden conseguir por medio de distribuidores locales.

Viabilidad económica.

El análisis de costos en la planeación y ejecución del proyecto en un tiempo especificado da como resultado la siguiente tabla, donde se abarca el coste requerido por el diseño de sonorización, compra de equipos importados y nacionales y mano de obra.

Tabla 60 Costos de ejecución

Producto	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Total	Observaciones	
Diseño			20.000.000,00		
Altavoz	302	450.000,00	135.900.000,00	En el precio está incluido los costos de importación y transporte	
Amplificador	42	250.000,00	10.500.000,00	En el precio está incluido los costos de transporte	
Cable No. 18 x metro	1500	2.000,00	3.000.000,00		
Transformador elevador	42	50.000,00	2.100.000,00		
Tubo PVC 1/4 x metro	600	650,00	390.000,00		
Accesorios varios			1.000.000,00	Estimado de accesorios que se necesiten sobre la marcha	
Costos de obra			5.000.000,00	Estimado de obra civil, demolición y reparacion de muros y techos	
		TOTAL	177.890.000,00		
Mano de Obra	Cantidad	Salario día (\$)	No. De días	Total	Observaciones
Ingeniero Residente	1	70.000,00	60	4.200.000,00	
Maestro de obra	1	50.000,00	60	3.000.000,00	
ayudantes	2	25.000,00	60	3.000.000,00	
Técnicos	2	30.000,00	30	1.800.000,00	
			TOTAL	12.000.000,00	
Imprevistos				7.229.500,00	
		TOTAL PROYECTO		197.119.500,00	

El objetivo final de la implementación del diseño es lograr cumplir el alcance en un tiempo establecido y con un costo definido, por lo cual se llega a la conclusión de que la ejecución del proyecto es viable.

Por medio de los resultados obtenidos, se pueden detallar con claridad los costos de ejecución para un tiempo estimado de dos meses.

Los directamente beneficiados serán los interesados y toda la comunidad bolivariana, generando bienestar y comodidad. Indirectamente, también se verá

beneficiado el buen nombre de la Universidad, ya que esto genera un valor agregado a la hora de sobresalir ante las demás universidades de la región, por su inversión en tecnología.

CONCLUSIONES

Una característica importante a la hora de implementar cualquier sistema de sonorización es la elección de los altavoces, pues estos determinan la potencia necesaria para producir el nivel de presión sonora requerido; una variación de solo 3dB determina el doble o la mitad de potencia eléctrica necesaria en el parlante para lograr el nivel de presión sonora requerida.

Resulta importante conocer las características de absorción de los distintos tipos de materiales absorbentes. Sin embargo este trabajo está dirigido hacia el diseño de un sistema de sonorización ambiental, el cual parte en su etapa inicial, del tiempo de reverberación calculado por la fórmula de Sabine; esta fórmula permite cierta tolerancia hacia las posibles variaciones en los valores de los coeficientes de absorción.

Idealmente, la manera de determinar el tiempo de reverberación es a partir de la obtención de los coeficientes de absorción reales por parte de los fabricantes. Sin embargo, esta labor se hace difícil en Colombia, pues los fabricantes regionales no están acostumbrados ni capacitados para manejar los protocolos y normas internacionales para la obtención de estos parámetros.

El entendimiento y aplicación de este tipo de metodología de diseño abre la puerta a nuevas oportunidades de negocios pues, aunque existe mucha información referida a este tema, es difícil organizarla, sintetizarla y aplicarla en nuestro contexto. El presente trabajo logra condensar de manera exitosa la serie de procedimientos necesarios para iniciar y finalizar un diseño de sonorización ambiental.

RECOMENDACIONES

Antes de empezar el diseño de sonorización, se deben tener muy presente los requerimientos del usuario, pues son ellos los que determinan el tipo de diseño a realizar. El punto de partida es lo que el usuario desea.

Es importante conocer la disponibilidad de elementos en el entorno local para facilitar las adquisiciones.

Conviene utilizar parlantes con sensibilidades iguales o mayores a 90dB para evitar requerimientos de potencias elevadas.

Para el adecuado diseño sonoro, se debe conocer el ángulo de cubrimiento del tipo de altavoz a utilizar, con la finalidad de asegurar que los oyentes reciban el mensaje sonoro de manera entendible. En caso de no disponer de ese dato, se le debe caracterizar. No es muy frecuente (al menos en nuestro medio) que este dato sea entregado por el proveedor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PUEO, Basilio y ROMÁ Miguel. Electroacústica. Altavoces y micrófonos. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2003.
- [2] Carrión Isbert Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 1998
- [3] Self Douglas, AUDIO POWER AMPLIFIER design handbook, editorial Newnes. Cuarta edición.
- [4] Douglas Self, SELF ON AUDIO, editorial Newnes.
- [5] Boixareu editores, MANUAL DE ALTA FIDELIDAD Y SONIDO PROFESIONAL, Serie: mundo electrónico, BOIXAREU EDITORES.
- [6] RUIZ VASSALLO Francisco. Diseño y fabricación de bafles. Creaciones copyright 2007
- [7] BALLOU Glen. Handbook for sound engineers. SAMS 1991
- [8] LUNA Erik. Tesis: Acondicionamiento acústico de un salón para eventos sociales. Instituto Politécnico Nacional. 2012
- [9] GORMAZ GONZALES, Isdoro. Técnicas y procesos en las Instalaciones Singulares en los Edificios. Paraninfo S.A 2da edición 3era reimpresión 2010. 27 p.
- [10] Transformer under load. (18-abril-2007).{Citado 09-oct-2012} disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>