



*Universidad de Matanzas*  
*Sede “Camilo Cienfuegos”*



*Facultad de Ciencias Económicas e Informática*  
*Departamento Industrial*

Tesis en opción al título de Ingeniero Industrial.

**Título:** Construcción de conchas acústicas para el estudio del comportamiento de las ondas sonoras en recintos al aire libre.

**Autor:** Alejandro Javier Hidalgo Goñi

**Tutor:** MSc. Yoel Almeda Barrios

## **Agradecimientos**

- A mis padres por apoyarme incondicionalmente en todo momento, a los que quiero con la vida.
- A Ernestico y Patry por ser los hermanos que no tengo y siempre estar ahí para mí, los que quiero muchísimo.
- A mi tía Patricia y mi tío Evelio por apoyarme en todo.
- A mi tío Felipito por quererme como un hijo.
- A mis abuelos: Nilda por su constante apoyo, cuidado y dedicación; Juan, Ondina y Goñi, que sé que me quieren muchísimo.
- A todos mis primos y tíos.
- A Tony por estar presente desde los inicios de mi etapa como estudiante y hoy ser un amigo incondicional.
- A todos mis amigos del barrio con quienes siempre puedo contar, en especial a Yoelvis que la vida no permitió que hoy estuviera aquí con nosotros.
- A Lianne que se ha integrado muy bien en la familia y hoy en día es una de mis primas.
- A mis compañeros de aula.
- A mi tutor Yoel por su dedicarme gran parte de su tiempo, sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de este trabajo de diploma.
- A todos los profesores que me han brindado sus enseñanzas a lo largo de toda mi vida.
- A todos los que han contribuido de una forma u otra a la construcción de estas conchas acústicas. En especial a Elvis y Dorgis.

### **Declaración de autoridad**

Yo, Alejandro Javier Hidalgo Goñi, único autor de este Trabajo de Diploma, como parte de la culminación de estudios en la especialidad de Ingeniería Industrial; en calidad de lo cual autorizo a la Universidad de Matanzas, Sede "Camilo Cienfuegos" hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

---

Alejandro Javier Hidalgo Goñi

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del tribunal

---

Miembro del tribunal

---

Miembro del tribunal

## Resumen

En Cuba no se tienen referentes del diseño y montaje de conchas acústicas para el control del sonido en recintos al aire libre. Por ello no se conoce el comportamiento de las ondas sonoras en recintos al aire libre con conchas acústicas lo cual constituye el problema científico a resolver. El objetivo general fue construir conchas acústicas para el estudio del comportamiento de las ondas sonoras en recintos al aire libre. Para darle cumplimiento se seleccionó el caso de estudio de Alarcon Aguirre Valdivia (2002), a partir del cual se fabricaron dos conchas acústicas de concreto a escalas 2:100 y 8:100 respectivamente con un costo asociado de 36,78 CUC. Se diseñaron pruebas experimentales para valorar la efectividad de las conchas construidas, donde se modificaron las siguientes variables: sonido generado, direccionalidad del sonido, presencia- ausencia de la concha y puntos de medición. Los resultados obtenidos con la realización de los experimentos demuestran la efectividad de las conchas acústicas para reforzar naturalmente los sonidos emitidos en el escenario y para disminuir los niveles de presión sonora detrás de la concha.

## **Abstract**

In Cuba, there are no references to the design and assembly of acoustic shells for the control of sound in outdoor venues. Therefore, the behavior of sound waves in open-air enclosures with acoustic shells is not known, which is the scientific problem to be solved. The general objective was to build acoustic shells for the study of the behavior of sound waves in open air spaces. To comply with it, the Alarcon Aguirre Valdivia case study (2002) was selected, from which two concrete acoustic shells were manufactured at scales 2: 100 and 8: 100 respectively with an associated cost of 36.78 CUC. Experimental tests were designed to assess the effectiveness of the built shells, where the following variables were modified: sound generated, directionality of the sound, presence-absence of the shell and measurement points. The results obtained with the realization of the experiments demonstrate the effectiveness of the acoustic shells to naturally reinforce the sounds emitted on the stage and to reduce the sound pressure levels behind the shell.

## Índice

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 1  |
| Capítulo I. Fundamentación teórica.....   | 6  |
| 1.1. El sonido .....  | 6  |
| 1.1.1. Parámetros que caracterizan el sonido .....  | 9  |
| 1.1.2. Comportamiento de las ondas sonoras .....  | 15 |
| 1.1.2.1. Reflexión .....  | 15 |
| 1.2. Propagación del sonido al aire libre.....  | 16 |
| 1.2.1. Atenuación por distancia.....  | 16 |
| 1.2.2. Atenuación por el aire .....   | 16 |
| 1.3. Acústica gráfica.....  | 17 |
| 1.3.1. Reflexión en superficies planas.....   | 18 |
| 1.3.2. Reflexión en superficies curvas.....   | 19 |
| 1.3.3. Determinación de una zona de eco .....   | 22 |
| 1.3.3.1. Trazado de la hipérbola.....   | 23 |
| 1.4. Conchas Acústicas como método de control acústico .....  | 24 |
| Capítulo II. Materiales y métodos para la construcción de conchas acústicas al aire libre. Caso de estudio para la investigación..... | 27 |
| 2.1. Consideraciones para el diseño de una concha acústica en un recinto al aire libre.....   | 27 |
| 2.1.1. Disposición del plano de audición.....   | 28 |
| 2.2. Métodos de diseño .....  | 30 |
| 2.2.1. El Método de Lyon.....   | 30 |
| 2.3. Descripción del caso de estudio seleccionado .....   | 35 |
| .....   | 38 |
| 2.4. Pruebas experimentales diseñadas para valorar la efectividad de las conchas acústicas construidas .....                          | 41 |
| Capítulo III. Construcción de conchas acústicas al aire libre. Desarrollo de pruebas experimentales.....                              | 46 |

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Construcción de la maqueta. Concha acústica a escala 2:100.....   | 46 |
| 3.2. Construcción de la concha acústica a escala 8:100 .....   | 48 |
| 3.3. Costos asociados.....   | 50 |
| 3.4. Resultados de las pruebas experimentales propuestas.....  | 50 |
| 3.4.1. Análisis de los resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en determinadas frecuencias ..... | 51 |
| 3.4.2. Resultados experimentales para la generación de estilos musicales.....  | 56 |
| Conclusiones.....  | 60 |
| Recomendaciones.....   | 61 |
| Referencias bibliográficas .....   | 62 |



## Introducción

El sonido está ligado indisolublemente con el desarrollo del hombre, su empeño por amplificarlo se evidencia desde la antigüedad, donde comienzan a improvisar sus propios instrumentos y ya tomaban medidas para lograr una buena audición.

Los estudios del sonido son sumamente importantes ya que, al conocer sus características y propiedades, se puede lograr una adecuada acústica en los locales. La acústica es la rama de la física encargada del estudio de la producción, transmisión, almacenamiento, percepción y reproducción del sonido, infrasonido y ultrasonido.

La acústica arquitectónica es una rama de la acústica aplicada a la arquitectura, que estudia el control acústico en los locales, para mejorar el acondicionamiento acústico en el interior de los mismos. La acústica arquitectónica estudia el control del sonido en lugares abiertos (al aire libre) o en espacios cerrados.

Aunque pueda parecer en cierto sentido un concepto novedoso, lo cierto es que estas técnicas ya se aplicaban muchos años atrás, cuando ni siquiera existía la tecnología adecuada para medir la calidad de las ondas sonoras. El inicio de esta teoría se puede encontrarla hace miles de años, con la teoría de la música de las esferas del matemático Pitágoras, en la que se relacionó por primera vez el espacio con el sonido. Obviamente, esta idea aún estaba por desarrollar, pero introdujo al mundo el concepto de que el sonido viaja por el espacio y puede variar según los obstáculos que se encuentre por el camino (Martínez, 2017).

Las primeras aplicaciones de la acústica arquitectónica se remontan a la construcción de los teatros Griegos, lo cual va desde el siglo V a. c al siglo III a. c. La construcción de estos teatros respondían al principio de reflexión del sonido, aprovechaban las propias gradas en donde se ubicaban los espectadores (gradas escalonadas con paredes verticales) como reflectores, se lograba así que el sonido reflejado reforzase el directo, además gracias a su sencilla arquitectura e inclinación, estas permitían una buena visibilidad. Su forma típica era de un arco de abanico de 210 grados, contaban con una pronunciada pendiente en sus gradas de entre 20 y 34 grados las que estaban acomodadas para alrededor de 14 000 espectadores.

El nivel sonoro en estos escenarios era bastante bueno, la voz se distribuía de manera uniforme en casi todos los lugares del recinto. Esto se daba principalmente por el hecho de que el teatro se hallaba en una zona de bajo ruido de fondo, el sonido directo, era reforzado por una plataforma circular altamente reflectante y las pronunciadas pendientes de las gradas, permitían obtener grandes ángulos de incidencia de los sonidos directo y reflejado, pero, estos tipos de

teatros tenían defectos acústicos, la concentración del sonido era el principal problema. Esto se debía, a la forma circular de las gradas, que originaban convergencias de sonidos en el lugar que se desarrollaba la acción.

Uno de los teatros Griegos más representativos es el de Epidauro, construido alrededor del año 300 a.C. y actualmente conservado en buen estado, donde el asiento más alejado se hallaba a 70 m del escenario y la inteligibilidad en dicho punto era sorprendentemente buena.

Posteriormente a los griegos, serían los romanos los que desarrollarían un sistema más complejo de estudio de la acústica en los teatros al aire libre, donde por detrás del escenario existía una pared muy elevada denominada scaenae frons y la zona denominada orchestra tenía una forma semicircular, al igual que las gradas del público, lo que permitía que se perdiese menor cantidad de sonido y lo focalizaban mejor hacia un mismo punto. La altura del escenario era menor a la de los teatros griegos, aproximadamente de 1,50 m y existía una elevada pendiente de las gradas de entre 30° y 34°. Si se escoge un teatro característico de la época romana como el teatro de Aspendos, se puede observar que su capacidad es de alrededor de 6.000 espectadores y la distancia entre el escenario y el asiento más alejado es de 53 m.

A finales del siglo XIX, la acústica arquitectónica como ciencia moderna, empezó a desarrollarse, gracias a los estudios del físico estadounidense Wallace Clement Sabine, quien actualmente es considerado el verdadero precursor de la acústica arquitectónica moderna, el cual en el periodo comprendido entre 1877 y 1905 realizó los primeros avances. En 1895 Sabine inició sus trabajos en el museo de Arte Fogg de la Universidad Harvard, con el objetivo de mejorar la pésima acústica del recinto, tras este logro, fue llamado para asesorar la construcción del nuevo Boston Symphony Hall, el cual está considerado desde el punto de vista acústico, como una de las mejores salas del mundo.

A partir del segundo cuarto del siglo XX, debido al desarrollo del amplificador, tubo de vacío, altavoces y micrófonos, es cuando los especialistas empezaron a acumular los datos exactos que harían de la acústica una ciencia efectiva de la ingeniería, ya que antes de que se inventaran los aparatos electrónicos, al especialista en acústica le faltaban los medios necesarios, para producir sonidos que correspondiesen a sus especificaciones, así como para medir la fuerza de los sonidos producidos. Antes de disponer de estos instrumentos, el que realizaba el diseño acústico de una sala, sólo podía hacerlo si se basaba en el estudio de otras salas, donde se consideraba qué características eran las responsables de la buena sonoridad

en algunos puntos de la misma, así como las sonoridades confusas en otras posiciones (Laviana Francisco, 2008).

Con el fin de la segunda guerra mundial, se produjo un gran auge cultural en los Estados Unidos de América, que trajo consigo la construcción de grandes salas de concierto, teatros de ópera, etc., para lo cual era necesario un mejor conocimiento de los requisitos de los campos sonoros en las grandes salas, por lo que se realizaron profundos estudios y medidas precisas en salas reconocidas por sus buenas cualidades acústicas, pero los arquitectos se negaban a copiar las salas antiguas de reconocida fama y buena acústica, ya que los gustos habían cambiado con los años y se empezaban a dejar a un lado las grandes decoraciones recargadas y con muchos relieves, estas comenzaban a ser reemplazadas por un estilo sobrio y funcional, con paredes prácticamente lisas, lo que producía grandes problemas de ecos y una mala distribución del sonido a lo largo de la sala. También estas salas fueron situadas en sitios céntricos para facilitar el acceso del público, por lo que el ruido producido principalmente por el tráfico rodado (el cual puede alcanzar grandes niveles) atentaba contra la buena acústica del local.

Actualmente en el mundo, son pocos los escenarios al aire libre que cumplen con las condiciones acústicas de reflejar el sonido de una manera óptima, que abarquen un amplio rango de área, de una fuente sonora ubicada en dicho lugar. Además, estos generalmente presentan problemas de tipo acústico, arquitectónico y climático, como puede ser el ruido ambiental, la atenuación del sonido con la distancia, el sonido en la atmósfera y las dimensiones óptimas.

En un recinto al aire libre es casi imposible, a distancias relativamente grandes, percibir un sonido de forma satisfactoria, si no se cuentan con las superficies adecuadas y la ubicación correcta de ellas, que ayuden a reforzar el sonido directo en el receptor.

Una de las principales medidas utilizadas actualmente para solucionar este, es la construcción de una concha acústica en los escenarios para reforzar la fuente sonora. Esto sucede ya que, al emitir un sonido, este golpea el caparazón de la concha y por medio de su forma se refleja hacia la audiencia.

Para el correcto funcionamiento de las conchas acústicas se encuentran involucrados varios factores. Generalmente, el suelo fuera del caparazón debe estar inclinado, ya que esto permite una mejor visibilidad para el público y los asientos pueden disponerse en forma de anfiteatro. Las condiciones climáticas también son importantes para una operación adecuada, ya que el

viento podría causar distorsión en el sonido. También se deben considerar los materiales del entorno, porque ciertos elementos naturales, como el pasto, absorben las ondas sonoras, mientras que las superficies con agua propician la reflexión del sonido.

Existen experiencias en el mundo, de conchas acústicas diseñadas y emplazadas en recintos al aire libre, como el teatro Ángela Peralta, en México DF; la concha acústica de Brasilia; la concha acústica de Bello Monte, en Caracas Venezuela; “La Cáscara del Cuenco Hollywood Bowl” y “La Concha Reflectora del Parque de Atracciones de Madrid”. En estos recintos, se realizan conciertos de música clásica, obras de teatros y todo tipo de espectáculos relacionados con la música.

Cuba es un país, donde existen un elevado número de auditorios al aire libre, que se encuentran ubicados en todas las provincias del país. Esto está propiciado en cierta medida, porque son más económicos desde el punto de vista arquitectónico, ya que no implican costosas infraestructuras complejas.

Por otra parte, los escenarios al aire libre, propician que, con menos recursos, se logren áreas masivas donde se puedan reunir personas y se ofrezcan actividades políticas, culturales y recreativas. Esto por supuesto implica riesgos, porque existen los problemas derivados de los recintos al aire libre, donde el fenómeno preponderante es la difusión del sonido, lo que propicia que en estos recintos generalmente exista una mala calidad del sonido, por lo tanto es de suma importancia tratar de adoptar medidas en el sentido de lograr perfeccionar su calidad acústica, en la cual como se comentaba anteriormente, las conchas acústicas son uno de los elementos de mayor importancia y de mayor utilización.

Existen un conjunto de métodos, como el método experimental, el Método de Lyon y la utilización del software RABIT2D, que permiten, a partir de un conjunto de requisitos de entrada, el diseño de una concha acústica que satisface los requerimientos específicos de sonoridad del recinto al aire libre, pero esto debe ser verificado en la práctica, una vez construida la concha.

No obstante, en Cuba no se tienen referentes del diseño y montaje de conchas acústicas para el control del sonido en recintos al aire libre. La inexistencia de aval empírico de su utilidad, precisa entonces de estudios donde se logre el montaje y validación de estos elementos arquitectónicos, como medida eficiente para la mejora acústica e incluso para el control de las afectaciones provocadas por el ruido que se emite en estos escenarios, sobre personas que no son partícipes de las actividades, como por ejemplo habitantes cercanos a las disposiciones.

**Problema Científico:** no se conoce el comportamiento de las ondas sonoras en recintos al aire libre con conchas acústicas.

**Objetivo General:** construir conchas acústicas para el estudio del comportamiento de las ondas sonoras en recintos al aire libre.

**Objetivos específicos:**

1. Realizar una búsqueda bibliográfica que fundamente el estado del arte y de la práctica sobre el comportamiento de las ondas sonoras y las conchas acústicas como método de control.
2. Seleccionar un caso de estudio que permita la construcción de conchas acústicas para la realización de pruebas experimentales.
3. Construir conchas acústicas a escala que faciliten el estudio de las ondas sonoras en escenarios al aire libre a partir del caso de estudio seleccionado.
4. Aplicar pruebas experimentales con las conchas construidas para validar su efectividad como método de control del comportamiento de las ondas sonoras en recintos al aire libre.

La investigación está estructurada de la manera siguiente:

**Capítulo I.** En este capítulo se abordan aspectos teóricos que conforman la base de la presente investigación: el sonido, los parámetros que lo caracterizan, el comportamiento de las ondas sonoras, así como la acústica gráfica y las consideraciones para el diseño de una concha acústica en un recinto al aire libre.

**Capítulo II.** En este capítulo se exponen algunas consideraciones para el diseño de una concha acústica en un recinto al aire libre, así como los métodos de diseño que se analizaron para su construcción. Se profundiza en el “Método de Lyon” que es el método que se seleccionó para construir la concha, se realiza una descripción del caso de estudio seleccionado y se diseñan pruebas experimentales para valorar la efectividad de la concha acústica construida.

**Capítulo III.** En este capítulo se realiza el diseño y construcción de dos conchas acústicas a diferentes escalados a partir del caso de estudio seleccionado en el capítulo anterior. Además de ello se realiza la valoración económica y se aplican y analizan un conjunto de pruebas experimentales para valorar la efectividad de las conchas.

**Conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.**

## Capítulo I. Fundamentación teórica

En el presente capítulo se abordarán aspectos teóricos que conforman la base de la presente investigación: el sonido, los parámetros que lo caracterizan, el comportamiento de las ondas sonoras, así como la acústica gráfica y las consideraciones para el diseño de una concha acústica en un recinto al aire libre.

### 1.1. El sonido

Existe una gran variedad de conceptos para definir el sonido, en el cuadro 1.1 se hace referencia a un conjunto de definiciones abordadas por los diferentes autores.

**Cuadro 1.1.** Definiciones de sonido dadas por diferentes autores.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| (Quintana Martínez, 1993). | El sonido es una perturbación mecánica que se propaga a través de un medio elástico a una velocidad característica de este (Quintana Martínez, 1993).   |
| (Carrión Isbert, 1998)     | Vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. De dicha definición se desprende que, a diferencia de la luz, el sonido no se propaga a través del vacío y, además, se asocia con el concepto de estímulo físico (Carrión Isbert, 1998).   |
| (Miyara, 1999b)            | El sonido consiste en una vibración del aire que se propaga en forma de ondas de presión. En ausencia de sonido, la presión atmosférica alcanza un estado de equilibrio y es constante en el tiempo y en el espacio. Cuando aparece una perturbación, por ejemplo la vibración de un objeto, se producen variaciones de presión y estas variaciones no sólo se producen a lo largo del tiempo sino que se propagan también por el espacio con cierta velocidad $c$ , de tal modo que al cabo de |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>un tiempo <math>t</math> las variaciones de presión llegan a una distancia <math>c \cdot t</math> de donde se produjo originalmente la perturbación (Miyara, 1999b).</p>  |
| (Dominicana, 2003)                                     | <p>El Sonido es una perturbación mecánica que se propaga a través de un medio elástico (aire, líquido o sólido) a una velocidad característica de este (Dominicana, 2003).</p>   |
| (Sánchez Delgado, Dujovne Guzman, & Poo Barrera, 2006) | <p>El Sonido es cualquier variación de la presión en el aire que pueda ser detectada por el oído humano. Cuando un cuerpo vibra, produce una perturbación mecánica en un medio elástico que se propaga a lo largo del mismo. Las partículas, sometidas a vibración, no se desplazan, sino que oscilan una distancia muy pequeña en torno a su posición de equilibrio. No así la energía sonora, que se propaga con la perturbación y puede alcanzar grandes distancias (Sánchez Delgado et al., 2006).</p> |
| (Comisión Europea, 2009)                               | <p>El sonido es una vibración de partículas de aire que se propagan como una onda sonora (o acústica) a través de éste. El espacio por el que se extiende la onda sonora se llama campo sonoro (Comisión Europea, 2009).</p>   |
| (Cortés Polanco, 2010)                                 | <p>El sonido se genera cuando un cuerpo en oscilación pone en movimiento a las partículas de aire, líquido o sólido que lo rodean. Estas, a su vez, transmiten ese movimiento a las partículas vecinas y así sucesivamente (Cortés Polanco, 2010).</p>   |
| (UGT-Madrid, 2012)                                     | <p>El Sonido es una sensación auditiva agradable producida por la vibración de un objeto de forma rítmica y armónica (UGT-Madrid, 2012).</p>   |

|   |   |
|---|---|
| (Parejo Gamboa, 2013).                                | El sonido es una perturbación que se propaga por un medio, por ejemplo, el aire. Se puede asemejar el sonido con las ondulaciones producidas en un estanque al tirar una piedra: existe un foco (lugar de la superficie del agua donde cae la piedra) y una propagación de la perturbación producida (las ondas que se ven en la superficie). Con mayor precisión, se define sonido como la variación en la presión detectada por el oído humano (Parejo Gamboa, 2013).                                 |
| (García Dihigo, 2016)                                 | El término Sonido es definido como la sensación producida en el oído por determinadas oscilaciones de la presión exterior. Cuando un medio es perturbado por una fuente vibrante, este provoca fluctuaciones de presión y crea regiones donde existen incrementos de la misma (compresiones) y regiones donde la presión es menor (depresiones), las cuales viajan y se alejan de la fuente que les dio origen en todas direcciones, lo que produce las llamadas ondas de sonido (García Dihigo, 2016). |
| (Rodríguez González, Jáuregui, & Leyva Bruzón, 2007). | El sonido se define como una vibración mecánica en un medio elástico, gaseoso, líquido o sólido por el que se transmite la energía desde una fuente en forma de ondas progresivas (Rodríguez González et al., 2007).  |
| (Ambrosio Sanz, 2018).                                | El sonido es un tipo de onda mecánica que se propaga únicamente en presencia de un medio material y que su origen se debe a los cambios en la densidad de las partículas de   |



|                        |  |
|------------------------|--|
|                        | dicho medio debido a perturbaciones y/o fuerzas externas (Ambrosio Sanz, 2018).  |
| (Alvarez Bayona, 2018) | El sonido es un fenómeno vibratorio que a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, se propaga en ese medio, bajo la forma de una variación periódica de presión sobre la presión atmosférica, y que puede ser percibido por el oído (Alvarez Bayona, 2018). |

**Fuente:** elaboración propia.

A partir de las definiciones analizadas se considera que el sonido es cualquier fenómeno que involucre la propagación de ondas mecánicas (sean audibles o no), generalmente a través de un fluido (u otro medio elástico) que genere el movimiento vibratorio de un cuerpo.

### 1.1.1. Parámetros que caracterizan el sonido

Entre los parámetros más importantes que caracterizan el sonido se encuentran la longitud de onda, la velocidad, la frecuencia, la intensidad y la potencia. A continuación, se realiza un análisis de cada uno de dichos parámetros.

- **Longitud de Onda**

Se denomina longitud de onda a la distancia que separa a las moléculas extremas de una onda completa, es el espacio para que se verifique un ciclo de la perturbación en su totalidad; si no se dispone de éste, la onda no se podrá generar de forma completa: la longitud de onda es la distancia que existe entre dos puntos consecutivos que vibren en igual fase. En la acústica aplicada tiene una repercusión amplia, al relacionar la dimensión de los elementos que intervienen en el medio donde se propaga el sonido con la longitud de las ondas que lo constituyen. Su unidad es el metro (García Dihigo, 2016).

Cortés Polanco (2010); añade además que la longitud de onda es la distancia que existe entre dos partículas consecutivas en igual situación de fase y que también se puede definir como la distancia que recorre una onda en un período de tiempo.

Según Estellés Díaz (2010) y Rodríguez González et al. (2007) la relación entre la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad y la relación entre la longitud de onda, el período y la velocidad se expresan:

$$\lambda = c \times t = \frac{c}{f}$$

Donde:

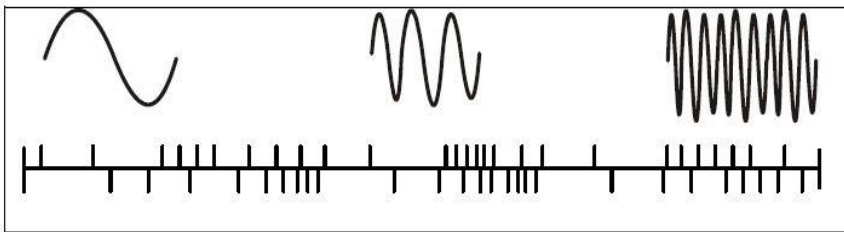
$\lambda$ = longitud de la onda

$t$  = período

$c$  = velocidad de la onda

$f$  = frecuencia de la onda

En la figura 1.1 se muestran las longitudes de onda correspondientes a diferentes frecuencias.



**Figura 1.1.** Relación entre longitud de onda y la frecuencia. **Fuente:** tomado de Rodríguez González et al. (2007).

La longitud de onda del sonido tiene importancia en relación con los obstáculos. Si la longitud de onda es mucho mayor que un obstáculo el sonido no se ve afectado, pero si la misma es mucho menor que el obstáculo, el sonido puede desviarse y/o atenuarse (Estellés Díaz, 2007).

- **Velocidad**

Según García Dihigo (2016) la velocidad del sonido es una variable que estará en función de la temperatura del aire y de la humedad que este contenga, pero prácticamente estas variaciones afectan la velocidad en solo unos 20 m/seg al considerar los límites climáticos extremos. El valor práctico de velocidad más comúnmente generalizado es de 340 m/seg. La velocidad del sonido depende de la temperatura absoluta del aire y está dada por:

$$v = \left[ 332 \sqrt{\left( 1 + \frac{t}{273.1} \right)} \right]$$

Donde:

$v$  =velocidad del sonido  $m/s$

T=temperatura del aire °C

De acuerdo con Rodríguez González et al. (2007) la velocidad depende de la masa y elasticidad del medio. La elasticidad del aire, que se ha determinado experimentalmente, es una constante multiplicada por la presión atmosférica que para el rango de temperatura que usualmente se trata en acústica es de 1,4.

$$c = \sqrt{1.4 \times \frac{P_{atm}}{\rho}}$$

Donde:

**c** = velocidad del sonido

**P<sub>atm</sub>** =presión atmosférica

**ρ** = densidad del aire

El sonido se propaga con una velocidad **c** que en el aire a 23°C vale **c** = 345 m/s o bien **c** = 1242 km/h. Esta velocidad varía algo con la temperatura (un 0.17%/°C), por eso en diversos textos pueden encontrarse valores ligeramente diferentes. Una observación importante es que la velocidad del sonido es independiente de la intensidad de la perturbación (Miyara, 1999a).

La velocidad del sonido es la velocidad con que las ondas sonoras se alejan de la fuente, su unidad está dada en m/seg y depende del medio de propagación y también de las condiciones ambientales (presión y temperatura) (Cremaschi & Saenz, 2016).

- **Frecuencia**

Según García Dihigo (2016) la frecuencia del sonido es la velocidad a la cual se completa un ciclo de regiones de alta y baja presión producidas por una fuente, es decir, es la cantidad de veces que se repiten las compresiones y dilataciones en la unidad de tiempo. La unidad de la frecuencia es Hertz. Un hertz es igual a 1 ciclo/seg. El tiempo que se demora la oscilación en repetirse es el período.

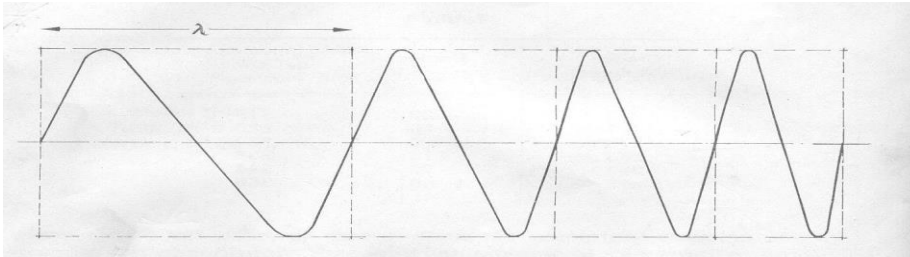
$$f = \frac{1}{t}$$

Donde:

**f** = frecuencia

**t** = período

En la Figura 1.2 se representa un sonido cuya frecuencia aumenta.



**Figura 1.2.** Representación de un sonido cuya frecuencia aumenta; su longitud de onda sufre un progresivo acortamiento. **Fuente:** tomado de (Pérez Miñana, 1969).

Las curvas de igual sonoridad describen las distintas sensibilidades auditivas del hombre frente a los sonidos de diferentes frecuencias. La máxima sensibilidad se encuentra entre 500 y 5.000 Hz; la sensibilidad decrece rápidamente en los extremos del espectro de frecuencias (Hernández Calleja, 1998).

Según Rodríguez González et al. (2007) el rango audible de estas oscilaciones, para un hombre joven y sano va desde 20 Hz a 20000 Hz, donde quedan por debajo de 20 Hz los infrasonidos y por encima de 20 000 Hz los ultrasonidos.

En la figura 1.3, se puede observar este comportamiento.

|                  |                                   |               |               |                  |
|------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|------------------|
| ← Infrasonidos → | ← Rango de frecuencias audibles → |               |               | ← Ultrasonidos → |
|                  | Ruidos graves                     | Ruidos medios | Ruidos agudos |                  |
| 0                | 20                                | 400           | 1 600         | 20 000 Hz        |

**Figura 1.3.** Esquema de frecuencias audibles. **Fuente:** tomado de (Rodríguez González et al., 2007).

- **Intensidad**

La intensidad acústica es la cantidad de energía, que, en la unidad de tiempo, atraviesa una unidad de superficie situada perpendicularmente a la dirección de propagación de las ondas sonoras. Se mide en Watios/m<sup>2</sup> (CC.CO, 2009).

De acuerdo con García Dihigo (2016) La intensidad acústica ( $w/ m^2$ ) en cualquier punto específico puede definirse como la energía acústica promedio por unidad de tiempo que transita

a través de una unidad de área normal a la trayectoria de propagación. Para una onda sonora progresiva libre, la intensidad puede expresarse:

$$I = \frac{P^2}{\rho \times v}$$

Donde:

I=Intensidad sonora,  $W/m^2$

P=presión sonora, Pa

$\rho$ =densidad del medio,  $Kg/m^3$

v=velocidad del sonido en el medio,  $m/s$

Según Alarcon Aguirre Valdivia (2002) cuando el sonido encuentra una superficie en donde reflejarse, tendrá una intensidad reflejada:

$$I' = \frac{WQ'(1-\alpha)}{4\pi r'^2}$$

Donde

$\alpha$  : Coeficiente de absorción de la superficie reflectora.

$r'$  : Distancia que recorre el sonido reflejado.

$Q'$  : Factor de directividad del sonido reflejado.

En la práctica, se supone que la fuente sonora es omnidireccional, es decir,  $Q=1$  para todo ángulo de incidencia (Sommerhoff Hyde, 1987).

Rodríguez González et al. (2007) plantea que las unidades de intensidad sonora al igual que las de presión sonora cubren un amplio rango por lo que generalmente se usa el nivel db para comprimir la escala de medición, por lo que el nivel de intensidad sonora será:

$$Li = 10 \times \log \frac{I}{I_0}$$

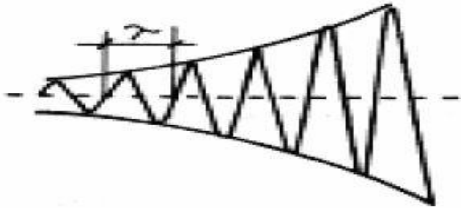
Donde:

LI = nivel de intensidad sonora

$I$  = intensidad sonora medida,

$I_0$  = intensidad sonora de referencia, ( $10^{-12}$  w/m<sup>2</sup> que corresponde a la referencia de presión de 20  $\mu$  Pa)

En la Figura 1.4 se representa una onda de sonido cuya intensidad aumenta.



**Figura 1.4.** Representación de una onda de sonido cuya intensidad aumenta. **Fuente:** tomado de (García Dihigo).

- **Potencia**

La Potencia Acústica es la energía acústica total emitida desde una fuente por unidad de tiempo y se mide en Watts/m<sup>2</sup> (Dominicana, 2003).

Según García Dihigo (2016) la potencia sonora se utiliza para describir la fuente sonora en términos de la cantidad de energía acústica que ella produce por unidad de tiempo. Se puede definir la potencia sonora como la intensidad sonora promedio producida en un campo libre a una distancia  $r$  de una fuente puntual.

$$W = \bar{I} \times 4 \pi \times r^2$$

$\bar{I}$  = intensidad promedio

$r$  = distancia desde la fuente del sonido, la cantidad  $4 \pi r^2$  es el área de una esfera alrededor de la fuente puntual sobre la cual la intensidad es promediada.

De acuerdo con Rodríguez González et al. (2007) las unidades de potencia también se pueden dar en términos de nivel db de la forma siguiente:

$$L_w = 10 \times \log \frac{W}{W_0}$$

Donde:

$W$  = Potencia de la fuente

$W_0$  = Potencia de referencia ( $10^{-12} W$ )

A diferencia del Nivel de presión sonora, el Nivel de potencia sonora es independiente de las características del local (Rodríguez González et al., 2007).

### **1.1.2. Comportamiento de las ondas sonoras**

Las ondas sonoras al encontrar un obstáculo producen diversos fenómenos: reflexión, refracción y difracción.

Será motivo de estudio la reflexión, ya que, en la teoría geométrica con la cual se trabajará, la propagación en línea recta, es el principal postulado, y se desprecian otros dos fenómenos (Recuero López, 1993).

#### **1.1.2.1. Reflexión**

Generalmente una onda sonora experimentará una reflexión siempre que exista una discontinuidad o un cambio en el medio a través del cual se propaga la onda (Cortés Polanco, 2010).

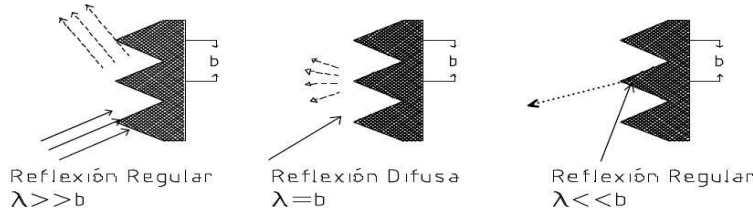
Cuando la onda acústica incide sobre el material, parte de ella rebota y se refleja, lo que provoca un cambio de dirección. Así, la reflexión del sonido representa el porcentaje de energía acústica incidente que refleja la superficie (Parejo Gamboa, 2013).

Para evitar que las superficies de reflexión, no absorban las frecuencias bajas y reflejen en todo el espectro de frecuencia, se recomienda utilizar materiales que posean una densidad superficial como mínima, de 20 Kg/m<sup>2</sup> (Sommerhoff Hyde, 1987).

Según Alarcon Aguirre Valdivia (2002)

- Si la longitud de onda del sonido incidente, es mucho mayor que las irregularidades que presenta la superficie, se produce una reflexión regular, cumpliéndose así la ley de reflexión, en donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado.
- Si las irregularidades de la superficie se comparan con el tamaño de la onda incidente, se produce una reflexión difusa.
- Si la longitud de onda es mucho menor que las asperezas de la superficie, se produce nuevamente una reflexión regular, pero esta vez, es debido a cada una de las irregularidades de la superficie.

En la Figura 1.5 se pueden apreciar estas reflexiones.



**Figura 1.5.** Reflexión de las ondas sonoras sobre una superficie para distintas longitudes de ondas. **Fuente:** tomado de (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002)

## 1.2. Propagación del sonido al aire libre

Al propagarse el sonido al aire libre en ausencia de superficies reflectantes, aumenta la distancia entre la fuente y el receptor lo que origina una disminución del nivel sonoro.

### 1.2.1. Atenuación por distancia

Según Alarcon Aguirre Valdivia (2002) a medida que un receptor se aleja de una fuente, el nivel de presión sonora resultante disminuye en forma inversa con el cuadrado de la distancia, lo cual provoca un descenso en el nivel sonoro de 6 dB cada vez que ésta se duplique.

$$A_{Dis\ tan\ cia} = 20 \log \left( \frac{r}{r_{ref}} \right)$$

Donde

r: Distancia desde la fuente al receptor.

rref: Distancia desde la fuente a un punto de referencia.

### 1.2.2. Atenuación por el aire

Como es bien conocido para todos los movimientos de ondas, incluido el sonido, se pierde parte de esta energía por la propagación a través de la variable media del aire. La atenuación de sonido en el aire depende principalmente de la frecuencia de la onda del sonido, la humedad relativa y la temperatura. Sonidos con ondas de gran longitud no son tan influenciados por las propiedades micro meteorológicas de la atmósfera pero los sonidos con ondas de longitud pequeña son sujetos de fluctuaciones violentas (Reyes Cordero, 2012).



Según Harris (1998) Cada vez que el sonido se propaga a través de la atmósfera, su energía se convierte gradualmente en calor, lo que corresponde a la absorción del aire y la atenuación viene dada por .

$$A_{\text{aire}} = \alpha \cdot d$$

Donde

a: Coeficiente de atenuación del aire en dB/100m dependiente de la frecuencia, temperatura y humedad relativa del ambiente. (Ver tabla 1.1)

d: Distancia a la que se quiere obtener la atenuación.

**Tabla 1.1.** Coeficiente de atenuación a por cada 100m.

| Humedad relativa % | Temperatura °C | Coeficiente de Atenuación del aire (dB/100m) |       |       |       |        |        |        |        |
|--------------------|----------------|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                    |                | 63Hz   | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1000Hz | 2000Hz | 4000Hz | 8000Hz |
| 25                 | 15             | 0.02   | 0.06  | 0.13  | 0.24  | 0.59   | 1.93   | 6.69   | 19.80  |
|                    | 20             | 0.02   | 0.06  | 0.15  | 0.26  | 0.54   | 1.55   | 5.37   | 18.05  |
|                    | 25             | 0.02   | 0.06  | 0.16  | 0.31  | 0.56   | 1.35   | 4.36   | 15.34  |
|                    | 30             | 0.01   | 0.05  | 0.17  | 0.37  | 0.65   | 1.30   | 3.70   | 12.82  |
| 50                 | 15             | 0.01   | 0.04  | 0.12  | 0.24  | 0.43   | 1.03   | 3.32   | 11.84  |
|                    | 20             | 0.01   | 0.04  | 0.12  | 0.28  | 0.50   | 1.00   | 2.81   | 9.74   |
|                    | 25             | 0.01   | 0.03  | 0.12  | 0.32  | 0.62   | 1.08   | 2.56   | 8.22   |
|                    | 30             | 0.01   | 0.03  | 0.11  | 0.34  | 0.74   | 1.28   | 2.54   | 7.24   |
| 75                 | 15             | 0.01   | 0.03  | 0.10  | 0.24  | 0.45   | 0.87   | 2.37   | 8.16   |
|                    | 20             | 0.01   | 0.03  | 0.09  | 0.27  | 0.55   | 0.96   | 2.20   | 6.91   |
|                    | 25             | 0.01   | 0.02  | 0.09  | 0.28  | 0.65   | 1.15   | 2.24   | 6.15   |
|                    | 30             | 0.01   | 0.02  | 0.08  | 0.27  | 0.74   | 1.42   | 2.40   | 6.84   |

**Fuente:** tomado de (Crocker Malcolm, 1998).

Los datos de la tabla muestran que la atenuación del sonido en el aire, puede ser insignificante para distancias cortas desde la fuente (distancias inferiores a varios cientos de metros), salvo, para frecuencias muy altas (por encima de los 5000 Hz) (Harris, 1998).

A distancias grandes, donde la atenuación por absorción del aire es significativa para todas las frecuencias, el nivel sonoro ha de calcularse en función de cada una de ellas, a la temperatura y humedad relativa especificada (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).

### 1.3. Acústica gráfica

La acústica gráfica es un instrumento eficaz para detectar y valorar problemas derivados de la distribución sonora en el interior de un local. Con su ayuda se pueden analizar fenómenos como las focalizaciones sonoras o la presencia, por el contrario, de determinadas zonas sordas;

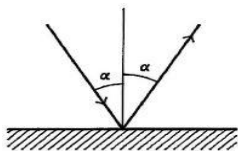
determinar con cierta aproximación las posibles zonas de eco; valorar la importancia de un paramento reflectante en el refuerzo de los niveles sonoros, etc. Se puede afirmar que la correcta utilización de la acústica gráfica evitará, en muchos casos, cometer errores de difícil corrección, especialmente en lo referente a la elección de determinadas geometrías; y será de gran ayuda en la toma de decisiones cuando se desee obtener unas buenas condiciones sonoras en el interior de un local (Pérez Miñana, 1969).

Además, la acústica arquitectónica es una rama de la arquitectura, y que trata de dar una solución al control de sonidos. Para ello, emplea diferentes ecuaciones que servirán para crear estancias donde las ondas sonoras emitidas sigan la trayectoria y la intensidad deseada. Las técnicas usadas pueden responder a distintos fenómenos acústicos, como el de absorción, reflexión, refracción, difusión, etc (Martínez, 2017).

En la teoría geométrica, el concepto de onda se reemplaza por el de rayo sonoro, lo que permite trabajar con mayor facilidad y descubrir las posiciones perjudiciales para las condiciones acústicas de un determinado lugar. Esta teoría, consiste en la construcción de diagramas que muestran el camino de los rayos sonoros reflejados, la misma que se utiliza con la luz, al suponer que las reflexiones son especulares y se emplea con mayor precisión en el caso límite de longitudes de ondas muy pequeñas, es decir, para frecuencias altas. Esta consideración es correcta, si las dimensiones de las superficies son grandes comparadas con la longitud de onda del sonido incidente (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).

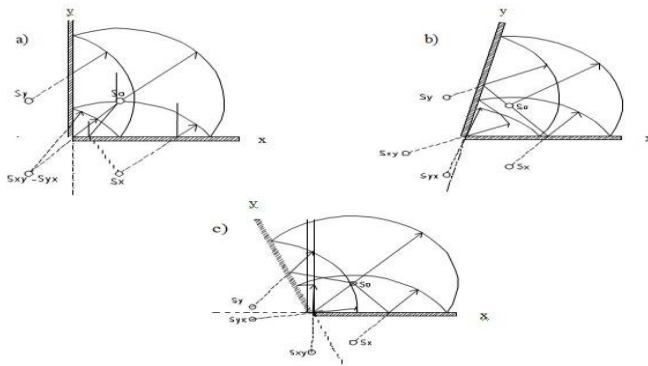
### 1.3.1. Reflexión en superficies planas

Según Sendra Salas (1992) cuando las ondas sonoras inciden sobre la superficie de separación de dos medios, parte de la energía sonora se refleja, de tal modo que el ángulo de incidencia y de reflexión son iguales (reflexión especular). Al aplicar este concepto al rayo sonoro, la reflexión del mismo sobre una superficie plana se produce como plantea la ley anterior (Figura 1.6).

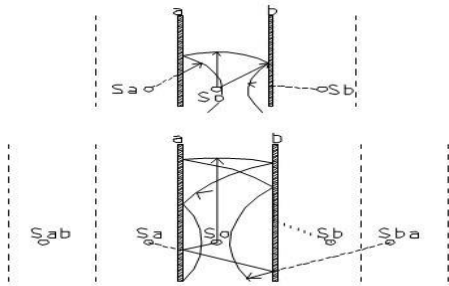


**Figura 1.6.** Reflexión de las ondas sonoras al incidir sobre la superficie de separación de dos medios. **Fuente:** tomado de (Sendra Salas, 1992).

Según Alarcon Aguirre Valdivia (2002), las reflexiones sobre planos que formen ángulos de  $360/n$  con  $n$  número entero, producirán  $n-1$  ondas reflejadas, las cuales forman con la onda directa un círculo de radio  $r=c*t$ . Para el caso de ángulos que no sean múltiplos enteros de  $360^\circ$ , las ondas de segundo orden no formarán curvas cerradas, produciéndose brechas en ángulos obtusos y cruzamientos en ángulos agudos (Figura 1.7). Una tercera forma de superficies planas, son las paredes paralelas, que originan múltiples fuentes imágenes y, por ende, reflexiones de orden superior. Estas disposiciones son muy peligrosas, ya que, son potenciales superficies generadoras de ecos (Figura 1.8).



**Figura 1.7.** Reflexiones sobre planos con distintas inclinaciones. a) Ángulo de  $90^\circ$ ; b) ángulo agudo; c) ángulo obtuso. **Fuente:** tomado de (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).

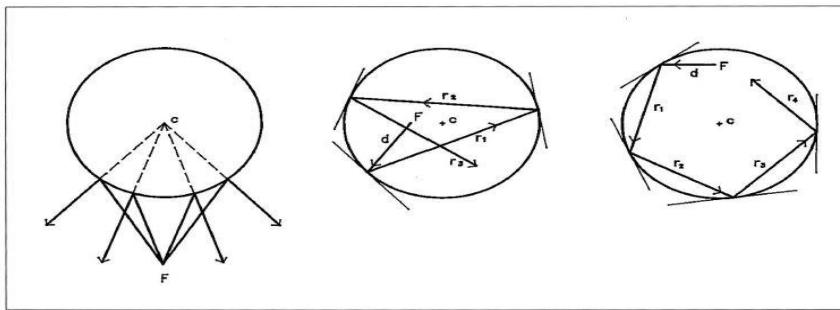


**Figura 1.8.** Reflexión en superficies paralelas. **Fuente:** tomado de (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).

### 1.3.2. Reflexión en superficies curvas

El resultado de las reflexiones sobre una circunferencia será muy diferente según el foco esté fuera del perímetro (superficie convexa) o dentro (superficie cóncava). En este último caso,

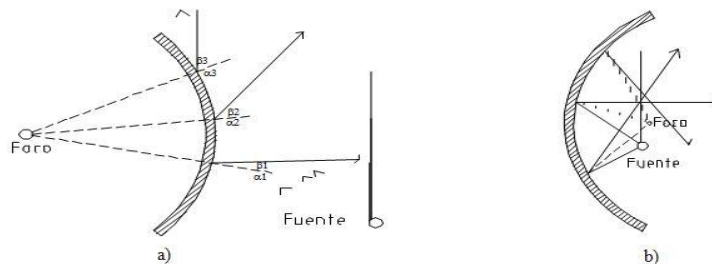
también se producirán variaciones importantes si el foco está situado en posiciones próximas al centro de la circunferencia, o por el contrario se sitúa cercano al perímetro (figura 1.9). Si las reflexiones se producen sobre la superficie convexa, hay una dispersión de los rayos sonoros. En cambio, si el foco está próximo al centro de la circunferencia, se origina una concentración hacia ese centro de los rayos sonoros tras las sucesivas reflexiones. En el caso singular de que el foco coincida con ese centro, todos los rayos sonoros reflejados pasan por ese centro. Ya por último, si el foco está próximo al perímetro, las reflexiones de los rayos sonoros se pueden producir de modo que se ajusten mucho al mismo, tanto más cuanto menor sea la longitud de los rayos sonoros (Sendra Salas, 1992).



**Figura 1.9.** Reflexiones sobre una circunferencia con el foco fuera y dentro del perímetro. **Fuente:** tomado de (Sendra Salas, 1992).

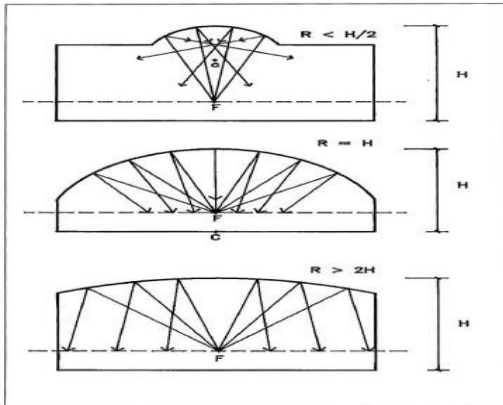
Alarcon Aguirre Valdivia (2002) plantea que, como regla general, toda superficie curva (cóncava), es potencialmente un peligro serio para una buena condición acústica si no se usan adecuadamente, y debe, por tanto, ser examinada cuidadosamente para considerar sus efectos de concentración de sonido. Se producirán concentraciones del sonido cuando las superficies sean cóncavas y dispersión, cuando sean convexas.

En la Figura 1.10 se podrán apreciar las reflexiones en superficies convexas y cóncavas.



**Figura 1.10.** Reflexiones en superficies curvas. a) Superficie convexa. b) Superficie cóncava. **Fuente:** tomado de (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).

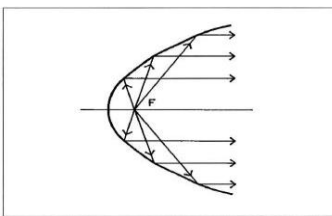
El fenómeno de la focalización sonora es especialmente acusado en los espacios abovedados que, en principio, no serán apropiados para conseguir una buena acústica. No obstante, la afirmación anterior habría que matizarla pues ese comportamiento dependerá de la relación entre el radio de curvatura de la bóveda y la altura de dicho espacio (Figura 1.11) (Sendra Salas, 1992).



**Figura 1.11.** Focalización sonora de acuerdo a la relación entre el radio de curvatura de la bóveda y la altura de dicho espacio. **Fuente:** tomado de Sendra Salas (1992).

En efecto, tal y como expone Pérez Miñana (1969) para radios de curvatura comparativamente pequeños ( $R < H/2$ ) las concentraciones pueden producirse por encima del plano de audición. Para radios de curvatura relativamente grandes ( $R > 2H$ ), las concentraciones no llegan a producirse, pues antes se efectúa la reflexión sobre el plano del suelo. En ambos casos no se manifestaría el fenómeno de la focalización en el plano de la audición. Por consiguiente, los radios de curvatura más problemáticos serán los comprendidos entre  $H/2$  y  $2H$ .

Por último, de acuerdo con Sendra Salas (1992) conviene destacar otra particularidad que ofrece una figura, la parábola, en lo que se refiere a la reflexión: si el foco sonoro coincide con el foco de la parábola, tras la reflexión en la misma, el rayo sonoro seguirá una trayectoria paralela al eje de la parábola (Figura 1.12).

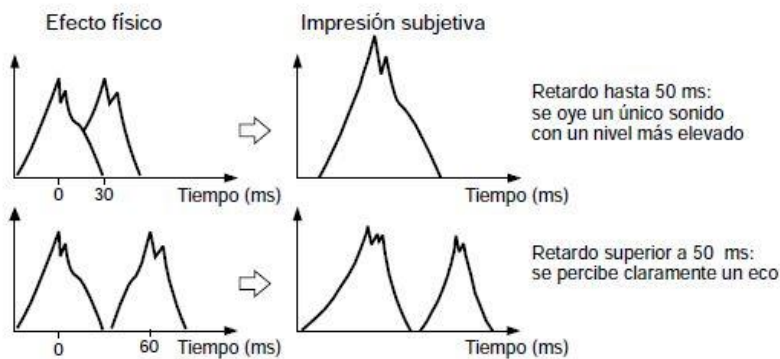


**Figura 1.12.** Reflexión en una parábola al coincidir el foco sonoro con el foco de la parábola. **Fuente:** tomado de (Sendra Salas, 1992).

### 1.3.3. Determinación de una zona de eco

El eco se puede definir de formas muy diversas. De todas ellas, las más habituales son las siguientes:

De acuerdo con Carrión Isbert (1998) todas aquellas reflexiones que llegan a un oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo. Por el contrario, la aparición en un punto de escucha de una reflexión de nivel elevado con un retardo superior a los 50 ms es totalmente contraproducente para la obtención de una buena inteligibilidad de la palabra, ya que es percibida como una repetición del sonido directo (suceso discreto). En tal caso, dicha reflexión se denomina eco (Figura 1.13). El retardo de 50 ms equivale a una diferencia de caminos entre el sonido directo y la reflexión de, aproximadamente, 17 m.



**Figura 1.13.** Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada.

**Fuente:** tomado de (Carrión Isbert, 1998).

Si el sonido reflejado alcanza al oyente 50 ms después de la llegada del sonido directo, el oído lo percibirá como un eco (Martínez Parra, 2010).

Cuando una reflexión importante llega con un nivel de retardo superior al admisible, se perciben dos sonidos el directo y el reflejado por separado. Si se recibe una onda sonora directa y una reflejada con un intervalo mayor a  $1/20$  de segundo, se produce eco. Los ecos pueden producirse por paredes alejadas o techos altos (Cremaschi & Saenz, 2016).

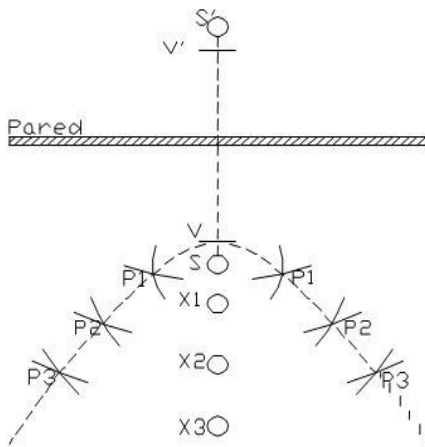
Según Cortés Polanco (2010) el eco consiste en una reflexión que queda retrasada excesivamente después de la onda directa (sobre  $1/10$  segundo), con una intensidad suficiente para que pueda percibirse por el oído.

Para Igua Porras (2005) un eco es la repetición de un sonido original suficientemente alto para ser escuchado claramente por encima de la reverberación y el ruido de fondo. Para la palabra hablada, los ecos pueden ser percibidos cuando los intervalos de tiempo entre el sonido directo y reflejado son mayores de 60 ms.

De acuerdo con Alarcon Aguirre Valdivia (2002) un método práctico para delimitar una zona de eco, es el trazado de una hipérbola, la que resulta al unir una serie de puntos encontrados, en un trazo continuo. Utilizar la hipérbola como lugar geométrico que delimita una zona de eco, se debe, a que la diferencia de distancia de los puntos que la forman, a dos puntos fijos llamados focos, es siempre constante. Esta diferencia deberá ser 17 ó 34m según sea el caso.

### 1.3.3.1. Trazado de la hipérbola

En primer lugar, se ubican los vértices  $V$  y  $V'$ , los que se obtienen al tomar a partir de la pared superior e inferiormente, la distancia de  $17/2$  ó  $34/2$ , según sea el caso. Luego, exterior al segmento  $SS'$ , se toma un punto cualquiera  $X_1$  y con radio  $X_1V'$  y centro en  $S'$ , se traza un arco. A continuación, con radio  $X_1V$  y centro en  $S$  se traza un nuevo arco que corte al anterior. De este modo, se habrá encontrado el primer punto  $P_1$  perteneciente a la hipérbola. Al repetir lo anterior con otro punto  $X_2$ , se hallará el punto  $P_2$  y así, en forma sucesiva (Figura 1.14). Si la reflexión proviene de dos o más planos, se deben trazar hipérbolas límites correspondientes a cada superficie, donde la zona de eco queda delimitada por la superposición de ellas (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).



**Figura 1.14.** Hipérbola que determina una la zona de eco al utilizar la acústica grafica. **Fuente:** tomado de (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).

#### 1.4. Conchas Acústicas como método de control acústico

Existe una gran variedad de conceptos para definir a las conchas acústicas, en el cuadro 1.2 se hace referencia a un conjunto de definiciones abordadas por diferentes autores.

**Cuadro 1.2.** Definiciones de concha acústica dadas por diferentes autores.

|                           |  |
|---------------------------|--|
| (Reyes Cordero, 2012)     | Una concha acústica es una cámara de conciertos desmontable que sirve para albergar representaciones sinfónicas y que se instala en la caja escénica. El conjunto de la concha está formado por paredes laterales, pared de fondo y techo realizados en material reflector acústico, y que se dispone alrededor de la orquesta. Estos elementos deben de ser oblicuos entre sí, en ángulos cuidadosamente definidos, de modo que garantice los niveles de reflexión y reverberación adecuados, y al mismo tiempo, genera un sonido más limpio y compacto hacia el público y los músicos. |
| (Redonda Fernández, 2013) | Se llama concha acústica a una cámara desmontable que sirve para albergar representaciones sinfónicas y que se instala en el escenario. Está formada por paredes laterales, pared de fondo y techo. Es recomendable que las paredes laterales tengan forma de abanico de manera que la pared posterior sea significativamente más estrecha que la abertura. De la misma forma, el techo también será inclinado.  |
| (Bolaños, 2016)           | Una concha acústica es un elemento arquitectónico utilizado para reflejar el sonido generado en su interior hacia la zona de audiencia, generalmente presenta una forma cóncava en forma de concha que permite focalizar la energía acústica y reforzar naturalmente el sonido emitido por un orador, cantante o músico ubicado en el escenario, lo cual permite que este sea escuchado a grandes distancias sin necesidad de refuerzo electroacústico.  |



|                 |   |
|-----------------|---|
| (Plus, 2017)    | Una concha acústica es una cámara de conciertos desmontable que sirve para albergar representaciones sinfónicas y que se instala en la caja escénica. El conjunto de la concha está formado por paredes laterales, pared de fondo y techo realizados en material reflector acústico, y que se dispone alrededor de la orquesta. Estos elementos deben ser oblicuos entre sí, en ángulos cuidadosamente definidos, de modo que garantice los niveles de reflexión y reverberación adecuados, y al mismo tiempo, genera un sonido más limpio y compacto hacia el público y los músicos.   |
| (CEC, 2017)     | Para mejorar la audición de la palabra y de la música, actualmente se construyen reflectores elípticos cuya forma recuerda a la de algunas conchas de moluscos abiertas. El fondo del altavoz se encuentra situado en el foco de un elipsoide de revolución hueco y cuya superficie está perfectamente pulida. Una de las propiedades de la elipse es que, si se trazan sendas rectas hacia los focos de la misma desde cualquier punto perteneciente a la cónica, esas rectas forman ángulos iguales con la normal a la elipse. En consecuencia, todo rayo sonoro que incide sobre la elipse, se refleja pasa por el segundo foco. |
| (Pereira, 2018) | Las conchas acústicas se pueden concebir como un resultado geométrico el cual sigue un radio proyectado en tres dimensiones desde un punto de la audiencia, como un cono que esta acostado de lado. En el diseño de las conchas acústicas, cada estructura debe considerarse caso por caso, debido a las variaciones espaciales del entorno en el que se podrían usar.  |

**Fuente:** elaboración propia.

En resumen una concha acústica es un elemento arquitectónico utilizado para reflejar el sonido generado en su interior hacia la zona de audiencia, presenta generalmente una forma cóncava en forma de concha que permite focalizar la energía acústica lo que provoca que se refuerce naturalmente el nivel de presión sonora emitido por un orador, cantante o músico ubicado en el escenario, ya sea al aire libre o en un local cerrado; también puede ser una cámara desmontable que sirve para albergar representaciones sinfónicas y está formada por paredes laterales, pared de fondo y techo realizados en material reflector acústico, y que se dispone alrededor de la orquesta. Además, podrían seguir una geometría de plegado, o crearse a partir de geométricas en forma de silla de montar o cresta que están en general formadas por una base semicircular y aberturas parabólicas. Estos elementos deben de ser oblicuos entre sí, en ángulos cuidadosamente definidos, de modo que garantice los niveles de reflexión y reverberación adecuados; en su diseño cada estructura debe considerarse caso por caso, debido a las variaciones espaciales del entorno en el que se podrían usar.

### **Conclusiones parciales**

- Se determino que los principales parámetros que caracterizan el sonido son la longitud de onda, la velocidad, la frecuencia, la intensidad y la potencia.
- Las ondas sonoras al encontrar un obstáculo producen diversos fenómenos: reflexión, refracción y difracción.
- La acústica gráfica es un instrumento eficaz para detectar y valorar problemas derivados de la distribución sonora en el interior de un local.
- De un análisis realizado de 6 definiciones dadas por 6 autores con respecto a las conchas acústicas se determinó que son elementos arquitectónicos para mejorar la acústica de los locales.

## **Capítulo II. Materiales y métodos para la construcción de conchas acústicas al aire libre.**

### **Caso de estudio para la investigación**

En este capítulo se exponen algunas consideraciones para el diseño de una concha acústica en un recinto al aire libre, así como los métodos de diseño que se analizaron para su construcción. Se profundiza en el “Método de Lyon” que es el método que se seleccionó para construir la concha, se realiza una descripción del caso de estudio seleccionado y se diseñan pruebas experimentales para valorar la efectividad de la concha acústica construida.

#### **2.1. Consideraciones para el diseño de una concha acústica en un recinto al aire libre**

La selección del sitio para un teatro al aire libre puede ser basada en modelos topográficos, meteorológicos y propiedades acústicas en todos los lugares disponibles. Un lugar con el menor ruido posible es ideal para las consideraciones acústicas de la selección del sitio. Con el fin de seleccionar el lugar adecuado el promedio del nivel de ruido no debe exceder 40 dB, la desviación estándar debe ser pequeña, y el sitio debe estar libre de ruidos grades ocasionales. Si estos disturbios ocasionales tienen niveles de sonido tan altos como 60 dB, como frecuentemente son, y si estos ocurren 2 o tres veces por hora, el sitio es indeseable. Un lugar en el que no se escucha el ruido del tráfico, de los aviones o de un tren, es un sitio deseable (Reyes Cordero, 2012).

En cuanto al diseño del escenario, se deben cumplir ciertas características que se detallan a continuación:

- Cuando se quieran evitar superficies curvas, lo óptimo, es disponer de paredes laterales en forma divergentes (La adición de estas paredes, producirán un mayor refuerzo y harán que la concha ubicada en el escenario sea más directiva) (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).
- Si la altura promedio sobrepasa los 9m, la profundidad deberá ser menor a ésta (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).
- Las dimensiones van en directa relación al sector de la audiencia que se quiere cubrir, sin exceder ciertos límites. No es conveniente que el escenario sea ni muy ancho ni muy profundo, ya que, un ancho excesivo producirá retardos de sonidos en los oyentes situados en los dos extremos laterales del recinto, y si es muy profundo, los posibles instrumentos que están al fondo del escenario llegarán al auditor retrasado con respecto a los sonidos emitidos al frente del escenario. Se recomienda que cualquier sector no sobrepase un ancho y profundidad de 18 y 12m respectivamente (Sommerhoff Hyde, 1987).

- La abertura de las paredes, deberán ser de tal manera que la audiencia quede dentro de un ángulo no superior a  $140^{\circ}$ , debido, a la direccionalidad que presentan la mayoría de los instrumentos y también, por un efecto de una buena visión del público hacia el escenario (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).
- El suelo del escenario deberá estar elevado, depende de la altura a la que se encuentra la primera fila de auditores. La pendiente de las gradas, será tan elevada de acuerdo a las condiciones que se presenten, se tiene en cuenta que un aumento en la pendiente, implica un aumento en la altura de la concha acústica (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).
- La distribución del sonido debida a una fuente en el escenario puede calcularse en forma aproximada para la zona de asientos, por el método de imágenes (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).
- Las superficies interiores de una concha acústica al aire libre para que funcione como tal, deberán estar revestidas con materiales muy reflectantes y de alta densidad superficial, como puede ser hormigón, ladrillo revestido con yeso, terciado marino, etc. Si se usan paneles, la densidad y el espesor deben ser elevados, se recomienda una densidad superficial como mínimo de  $20\text{Kg/m}^2$ , ya que permiten evitar la absorción diafragmática a bajas frecuencias, característica del uso de paneles excesivamente ligeros que se comportan como resonadores de membrana (Carrión Isbert, 1998).

### **2.1.1. Disposición del plano de audición**

El sonido directo que llega a cada espectador no debe ser obstruido por los espectadores que se encuentran delante de él. Se consigue con un adecuado diseño que permita una buena visibilidad del escenario. Se considera que los ojos se sitúan, como promedio, 10 cm por debajo de la parte más elevada de la cabeza, de tal forma que la inclinación del suelo deberá permitir el paso de la visual por encima de la cabeza del espectador situado en la fila anterior. En cuanto a la pendiente del anfiteatro se solía situar en torno a los  $30^{\circ}$  como valor máximo, aunque por razones de accesibilidad y seguridad, este valor varía según la legislación de cada país (Redonda Fernández, 2013).

La diferencia de altura entre dos filas consecutivas, en relación a una fuente sonora, debe ser al menos de 0.12m ó 0.08m si las filas están desplazada una con respecto a la otra en medio asiento (Sommerhoff Hyde, 1987).

Por razones de confort, en la mayoría de salas construidas desde 1980 la relación entre la superficie ocupada por el público y el número de asientos es de aproximadamente 0,5, es decir, 0,5 m<sup>2</sup> por asiento (Redonda Fernández, 2013).

Se considera una inclinación de las gradas de 8° como valor mínimo, donde todos los oyentes estarán bien situados con respecto al flujo de energía sonora procedente del escenario, de esta manera, se solucionará el problema de la incidencia rasante del sonido, conocido como seat deep (Atenuación que se produce cuando el sonido se propaga por encima de un área altamente absorbente ocupadas por sillas (con o sin público), donde el ángulo de incidencia es pequeño) (Alarcon Aguirre Valdivia, 2002).

El piso sobre el que se ubican las butacas debe presentar una pendiente apropiada debido a que el sonido es más fácilmente absorbido por la audiencia cuando se propaga de manera rasante, como regla general, y por cuestiones de seguridad, la pendiente a lo largo de los pasillos no debería ser mayor al 12%, y se incrementa hasta un máximo de 35%, en el área de audiencia (Estellés Díaz, 2009).

Si las gradas forman arcos de circunferencias, el centro de curvatura deberá caer fuera del escenario, a fin de evitar convergencia de los sonidos provenientes de ellas. También, se sugiere una inclinación de los respaldos y de la parte inferior de los asientos de las gradas en unos 10° aproximadamente (Recuero López, 1993).

No existe una única solución arquitectónica que garantice una calidad acústica óptima, pese a que las más famosas salas de concierto son de planta rectangular, existen otras formas que proporcionan un resultado similar desde el punto de vista acústico. Independientemente de la forma de la sala, la solución adoptada debe garantizar la existencia de primeras reflexiones en todos sus puntos con el fin de aumentar la claridad musical, la sonoridad y la sensación de intimidad acústica (Redonda Fernández, 2013).

Según Sandoval Delgado (2004) estas son algunas de las consideraciones generales para el diseño de Auditorios.

- Longitud de las filas de 16-25m
- Salidas de 1.00 m de ancho por 150 personas.
- Visibilidad sin girar la cabeza igual a 30° al girar los ojos levemente de 60°, máximo ángulo psicológico 110°
- Proporción de sala de espectadores

Última fila hasta la boca del escenario=24 m.

En teatros máxima distancia a la que se reconoce una persona= 32 m.

- Sobre elevación del ojo del espectador = 12 cm.
- Tamaño de asiento de 0.51 m. Y para rematar las filas se pueden pedir asientos de mayor tamaño.
- Filas con máximo 22 asientos
- Anchura mínima de pasillos debe ser de 1.07 m.
- Altura del nivel de piso al ojo del espectador debe ser de 1.12 m.

## **2.2. Métodos de diseño**

De la consulta de la literatura se detectaron tres métodos de amplio uso para realizar el diseño de la concha acústica; el primero es un método experimental y consiste en realizar diferentes pruebas para conocer las dimensiones óptimas de la concha; el segundo se basa en la utilización de softwares de diseño acústico interactivo, como por ejemplo RABIT2D, que es esencialmente gráfico, y el tercero, llamado Método de Lyon, que es un método gráfico basado en la construcción de rayos sonoros para obtener la equipotencialidad sonora en el plano de la audiencia.

Los softwares de diseño acústico interactivo son desarrollados por compañías privadas y por lo tanto constituyen software prepago, lo cual dificulta su obtención. Por otra parte, los resultados que se obtienen con el método experimental son poco exactos. Por último el Método de Lyon que se describe en el siguiente acápite, es un método muy utilizado, estudios como los de Luis Reyes and Guido Solís (2012), Alarcon Aguirre Valdivia (2002) y Daumal i Domenech (1994) demuestran la factibilidad de su empleo en el diseño de una concha acústica.

### **2.2.1. El Método de Lyon**

La deducción y aplicación del Método de Lyon, además de las leyes ópticas de la reflexión, se fundamenta en que la cantidad de sonido reflejado es proporcional a la superficie de reflexión, y en el decrecimiento de la intensidad sonora según el cuadrado de la distancia (Daumal i Domenech, 1994).

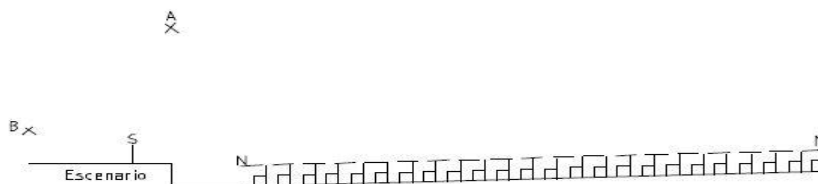
De acuerdo con varios autores como Luis Reyes and Guido Solís (2012), Daumal i Domenech (1994) y Alarcon Aguirre Valdivia (2002) este es un método gráfico que:

- Permite disponer las superficies reflectantes para conseguir un nivel sonoro equipotencial a lo largo de un recinto.
- Consiste, en determinar la forma del techo del escenario, de tal forma, que produzca una reflexión dirigida e intensificada en forma creciente, a medida que aumenta la distancia entre la fuente y el receptor. El incremento de nivel sonoro conseguido por las superficies reflectantes, equivaldrá a la pérdida sufrida por la distancia.
- La forma del techo del escenario que se obtendrá, se conseguirá tras una serie de aproximaciones gráficas, hasta llegar a formar una concha acústica que cubra de reflexiones a un sector propuesto de audiencia.

Según Alarcon Aguirre Valdivia (2002) estos son los pasos que hay que seguir para aplicar el método.

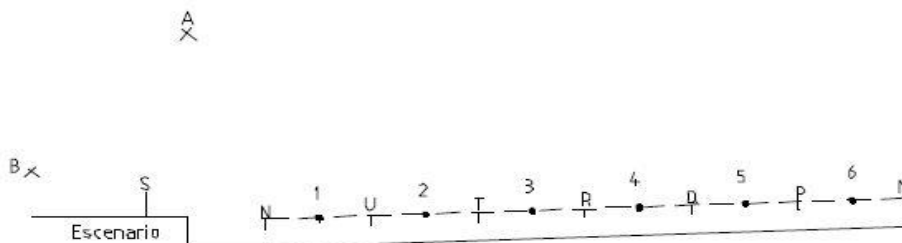
En forma aproximada se ubican, el foco sonoro S, y los puntos que delimitan la altura y la profundidad del escenario, A y B respectivamente.

1. Se divide el plano de audición en un número par de sectores. Se supondrá que la intensidad en cada sector, será igual a la que existe en sus puntos medios. En la práctica, cada sector es de 4 a 5 metros o de alrededor de 5 filas de asientos.



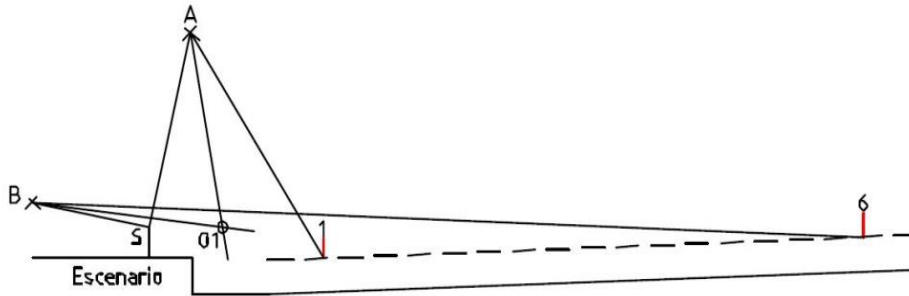
**Figura 2.1.** Corte transversal de un recinto. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

2. Encontrar los puntos medios de cada sector.



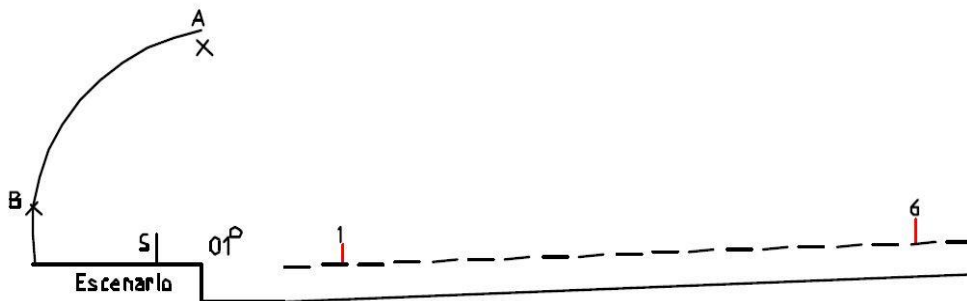
**Figura 2.2.** Ubicación de los puntos medios de cada sector. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

3. Trazar las dos bisectrices que se obtienen del ángulo formado por SA1 y SB6, cuya intersección determina el punto O1.



**Figura 2.3.** Trazado del par de bisectrices que forman los ángulos SA1 y SB6. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

4. Dibujar con centro en O1 y radio O1B el arco AB, donde queda establecida una nueva altura.



**Figura 2.4.** Envolvente que determina en primera aproximación la curvatura de la Concha Acústica. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

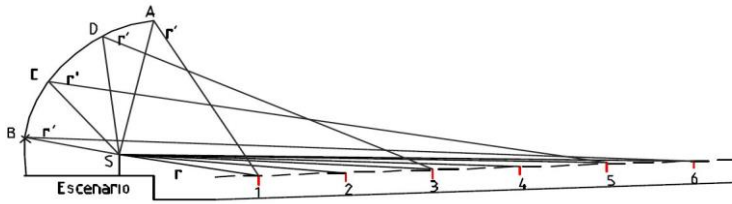
5. Comprobar, que, para cada punto medio del plano de audición, la diferencia entre el camino directo y camino el reflejado, queden dentro del límite tolerable de 17 metros, y computar la relación de intensidades respecto al sonido que llega por reflexión a esos sectores.

Para lo anterior se deben cumplir dos condiciones:

- El coeficiente de reflexión debe ser prácticamente igual a 1.



- Las superficies de reflexión que dirigen el sonido a cada uno de los sectores, han de ser equivalentes en tamaño.



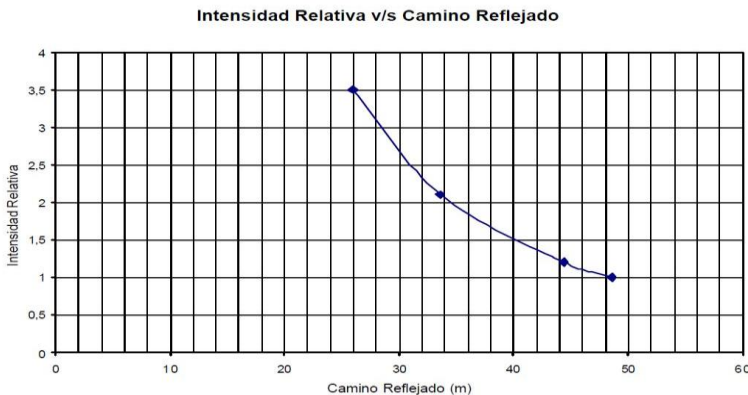
**Figura 2.5.** División de la envolvente en superficies equivalentes para tabular los datos que se encuentran en la tabla 2.1. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

A modo de ejemplo, se dan algunas medidas, para la comprensión del método.

**Tabla 2.1.** Primera Aproximación del Método.

| Puntos | Camino del sonido  |  | Diferencia (m) | Inverso del cuadrado del camino reflejado $1/r'^2$ | Intensidades relativas $(1/r'^2)/(1/r'^2)_{\min}$ |
|--------|--------------------|--|----------------|--|---|
|        | Reflejado $r'$ (m) | Directo $r$ (m)  |                |  |   |
| 1      | SA1=26             | S1=9   | 17             | 0.00147  | 3.5   |
| 3      | SD3=33.6           | S3=18.5  | 15.1           | 0.00088  | 2.1   |
| 5      | SC5=44.4           | S5=28.5  | 15.9           | 0.0005   | 1.2   |
| 6      | SB6=48.6           | S6=33.6  | 15             | 0.00042  | 1   |
| 2      | 29                 | Datos obtenidos por interpolación en el gráfico de Intensidad Relativa versus $r'$ |                |  | 2.8   |
| 4      | 38                 |  |                |  | 1.6   |

**Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).



**Figura 2.6.** Gráfico de intensidad relativa en primera aproximación del método. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

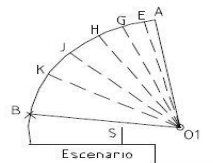
6. Si se varían las superficies de reflexión (condición del quinto paso), de forma que se incremente su tamaño para las reflexiones más lejanas, se conseguirá una intensidad de recepción igual en todos los sectores. Para lograr esto, se divide el arco obtenido AB, en partes proporcionales a las intensidades relativas, de menor a mayor y se empieza por A, de forma que el área destinada a intensificar al sector más próximo al escenario sea proporcional a la intensidad relativa dada por el último punto medio, es decir, igual a 1, y la que ha de reflejar al sector más alejado, sea proporcional a la intensidad relativa dada por el primer punto medio del plano de audición, es decir igual a 3.5.

La proporcionalidad estará dada por:

$$\alpha = \frac{\angle AO_1B}{\sum I_{Relativas}}$$

Donde  $\alpha$  = Angulo del arco de una unidad de superficie reflectora.

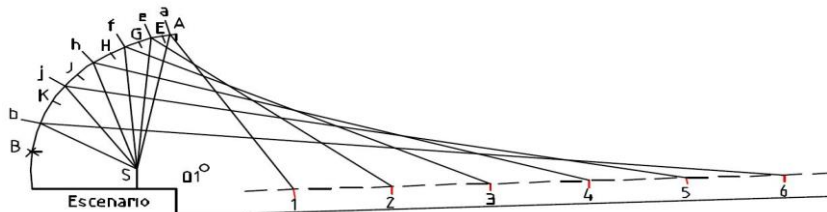
- $\angle AO_1E = 1 \cdot \alpha$
- $\angle EO_1G = 1.2 \cdot \alpha$
- $\angle GO_1H = 1.6 \cdot \alpha$
- $\angle HO_1J = 2.6 \cdot \alpha$
- $\angle JO_1K = 2.8 \cdot \alpha$
- $\angle KO_1B = 3.5 \cdot \alpha$



**Figura 2.7.** División del arco en partes proporcionales a las intensidades relativas encontradas.

**Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

7. Encontrar los puntos medios de cada subdivisión, para luego unirlos con los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6 de los sectores a los que tienen que dirigir la reflexión. Los puntos medios de cada subdivisión son: a, e, f, h, j, b.

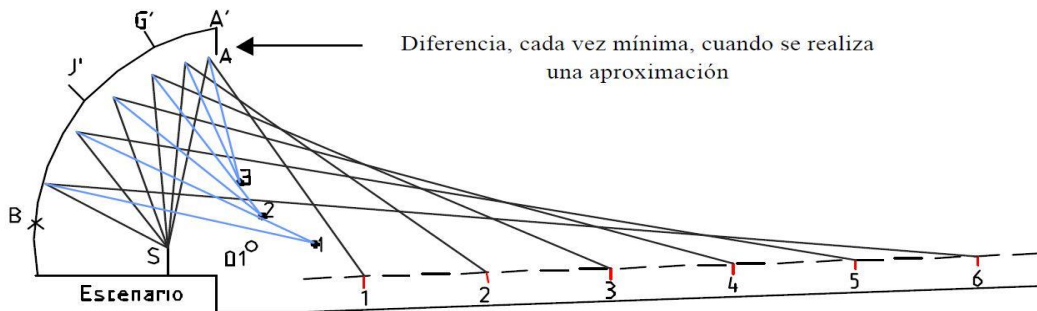


**Figura 2.8.** Puntos medios de cada subdivisión de la curva. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

8. Como último paso, se trazan las bisectrices de los ángulos formados. Estas bisectrices permitirán trazar una nueva envolvente del arco AB y será la curva que en segunda aproximación se acercará al perfil buscado.

Para el trazado de esta envolvente, se hallan las intersecciones de cada pareja consecutiva de bisectrices: La primera y la segunda se corta en 1, la tercera y la cuarta en 2 la quinta y la sexta en 3.

Con centro en 1, se traza el arco  $BJ'$  con radio  $1B$ , con centro en 2 el arco  $J'G'$  con radio  $2J'$ , y con centro en 3 el arco  $G'A'$  con radio  $3G'$ . Esta nueva curva  $A'B$  alterará ligeramente los caminos iniciales recorridos por el sonido, debido a que la altura habrá variado, por lo que de nuevo se aplicará el anterior procedimiento para el oportuno ajuste. Por lo tanto, la nueva envolvente así encontrada diferirá de  $A'B$  menos que ésta de  $AB$ , entonces como máximo será necesario repetir una vez más la operación.



**Figura 2.9.** Trazado de una nueva envolvente que se acerca al perfil buscado. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

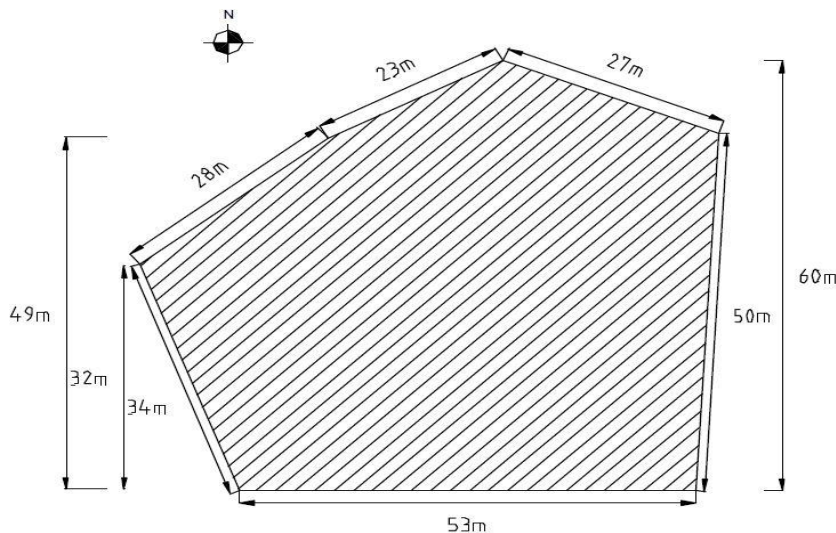
La cantidad de superficies reflectora que tenga la concha, será siempre la mitad de los sectores propuestos en el plano de audición. Como en este ejemplo se tienen 6 sectores, la cantidad de superficie que dirigirán el sonido a las gradas serán 3:  $BJ'$   $J'G'$   $G'A'$ .

### 2.3. Descripción del caso de estudio seleccionado

De la búsqueda bibliográfica se detectaron investigaciones como las de Luis Reyes and Guido Solís (2012) y Alarcon Aguirre Valdivia (2002) en las cuales se emplea el Método de Lyon para el diseño de conchas acústicas en escenarios al aire libre. Para esta investigación se seleccionó el estudio de Alarcon Aguirre Valdivia (2002), los resultados de esta investigación serán tomados como referencia para la construcción de dos conchas a diferentes escalas que

permitan estudiar el comportamiento de las ondas sonoras y la efectividad de este método de control acústico. A continuación, se ofrecen los principales datos y resultados de dicho estudio.

Aquí se muestra en la siguiente figura las dimensiones del área del terreno que fueron seleccionadas.



**Figura 2.10.** Dimensiones del terreno **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

El área: 3093 m<sup>2</sup>

Perímetro: 214 m.

La capacidad aproximada con que cuenta el recinto, es de 2000 personas, las cuales están distribuidas en 36 filas de asientos, cuya separación entre filas y filas será de 1m.

El plano de audición tiene forma de abanico, dividido por un pasillo de seguridad de 2m de ancho, que separa la parte inferior y superior de las gradas en dos inclinaciones, 8° y 10° respectivamente. La última fila, está a 6m sobre el nivel del suelo. Estas inclinaciones, permiten tener una diferencia de altura entre un espectador y otro, respecto a una fuente sonora ubicada en el escenario, mayor al mínimo recomendado de 0.08m (si se considera que las filas están desviadas en medio asiento), lo que permite una visión hacia el escenario y una percepción auditiva del sonido proveniente de él.

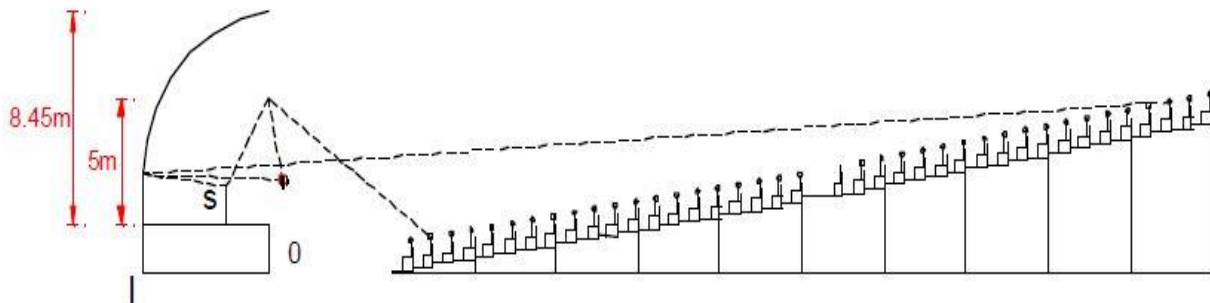
La audiencia se encuentra dentro de un ángulo de 117° con vértice en la fuente. Para permitir un fácil y cómodo acceso a los asientos, se ubicaron 3 escalas en la parte inferior y 4 en la parte superior, con un ancho de 2m cada una de ellas. El comienzo de las gradas, está ubicado

a una distancia de 5 m del escenario en su parte central. En los anexos se muestran los planos y la distribución de los espacios de las gradas. (Anexo 1)

Para comenzar a aplicar el Método de Lyon se fijó una altura de 5m sobre el piso del escenario, una profundidad de 6m y una fuente con una altura de 1.5m. El escenario, estará a 2m sobre el suelo.

El plano de audición, se dividió en 10 sectores, de 4m de longitud cada uno. Al aplicar los pasos del método, se obtuvo en una primera aproximación, la curva con una nueva altura de 8.45m.

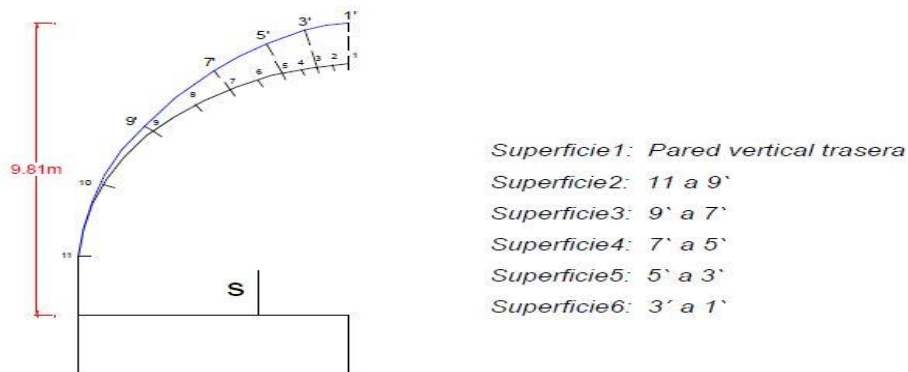
La superficie que limita la profundidad del escenario, corresponde a una superficie vertical de 2m de altura, a partir de la cual, comenzará la curvatura de la concha acústica.



**Figura 2.11.** Corte transversal del recinto en su primera aproximación. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

En la segunda aproximación se obtuvo una nueva envolvente con una altura de 9,81m.

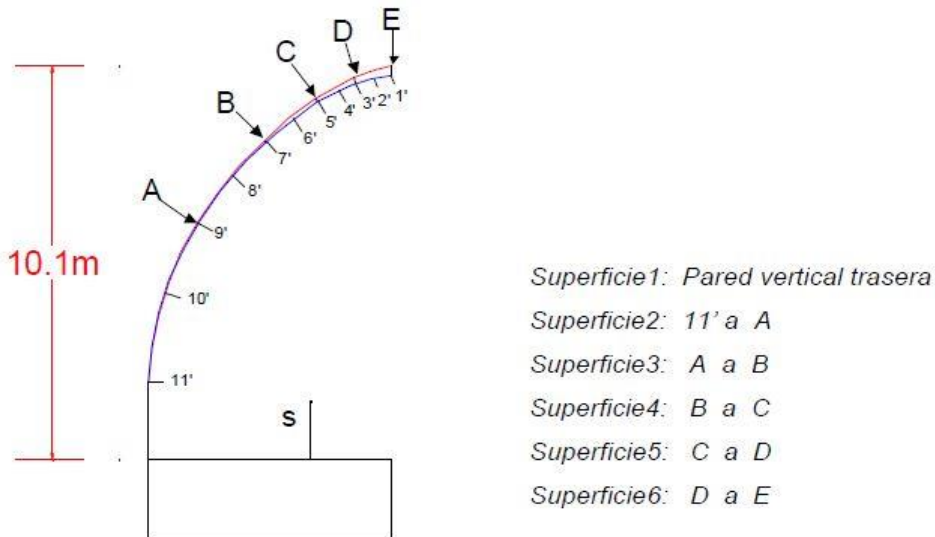
La nueva envolvente encontrada, está compuesta por 5 superficies curvas, más la superficie vertical trasera.



**Figura 2.12.** Nueva envolvente, en segunda aproximación. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

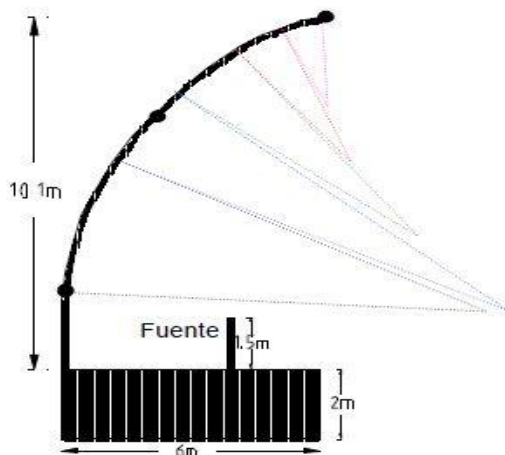
Entre la primera y segunda aproximación del método, la altura de la curva, varió en 1.36m, por lo que fue necesario repetir el Método de Lyon desde el quinto paso, para el oportuno ajuste.

En una tercera aproximación se obtuvo una envolvente (línea roja continua), cuya altura es de 10.1m.



**Figura 2.13.** Envolvente final que se obtiene en tercera aproximación. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

La altura de esta nueva envolvente, varió muy poco en relación a la altura de la anterior aproximación (29cm), por lo tanto, fue la forma definitiva de la curva de la concha acústica.

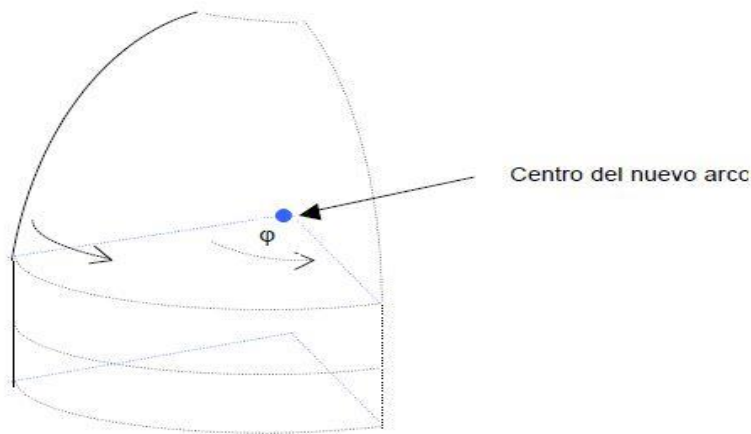


**Figura 2.14.** Forma final de la Concha Acústica al utilizar el método de Lyon. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

Si se observa la figura 2.14, la curva final de la concha acústica, está compuesta por 5 arcos con distintos centros de curvatura. Por lo tanto, para facilitar su construcción, se buscó un solo arco, con un solo centro.

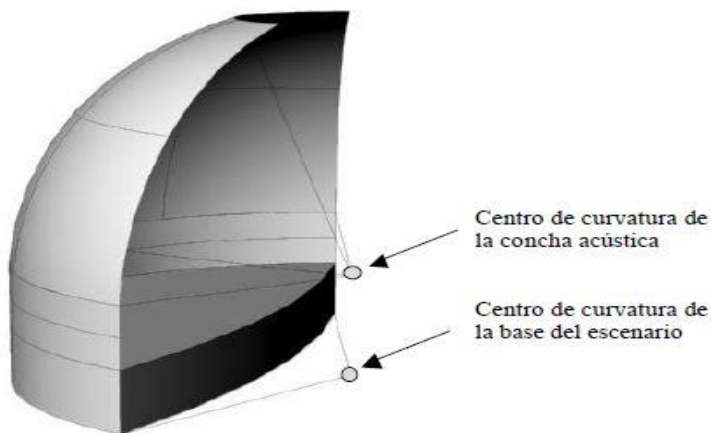
Se tomaron 3 puntos de la curva (círculos negros de la figura 2.14) y con la ayuda del software de diseño gráfico, Rhinoceros, se trazó la nueva envolvente.

Para dar un aspecto y forma tridimensional a la concha acústica, se hizo girar la envolvente encontrada, (como un sólido de revolución) sobre la planta del escenario, y con centro en el arco obtenido.



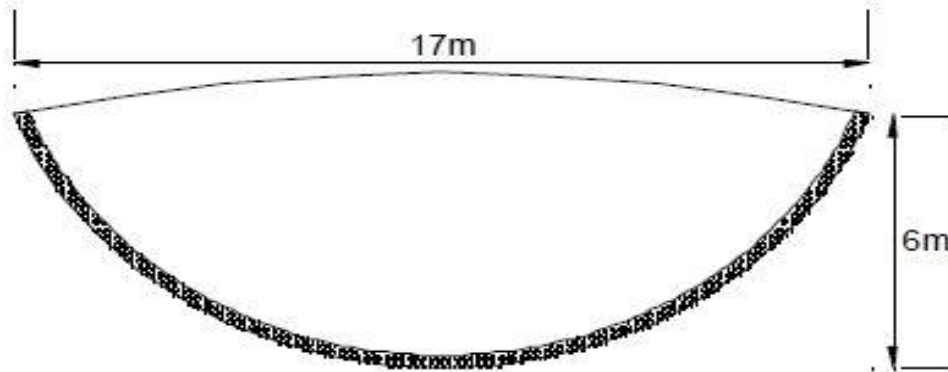
**Figura 2.15.** Obtención tridimensional de la concha acústica al hacer girar la envolvente como un sólido de revolución. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

El resultado final de la concha acústica, se muestra en la figura 2.16.



**Figura 2.16.** Dibujo a escala en tres dimensiones de la concha acústica. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

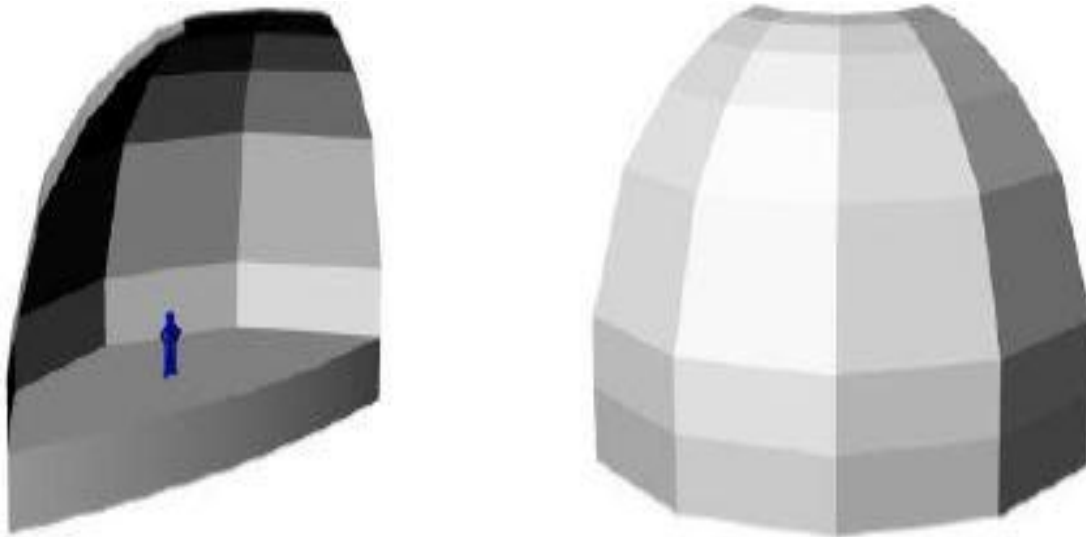
La geometría del escenario, quedó establecida por el área que ocupa la base de la concha, con una profundidad central de 6m (medida dada al emplear el método) y un ancho máximo de 17m.



**Figura 2.17.** Planta del escenario y sus dimensiones. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

Con el fin de evitar superficies curvas, y abaratar costos en la construcción, se realizó una discretización de la de la superficie en una partición de 4 lados (figura 2.18).

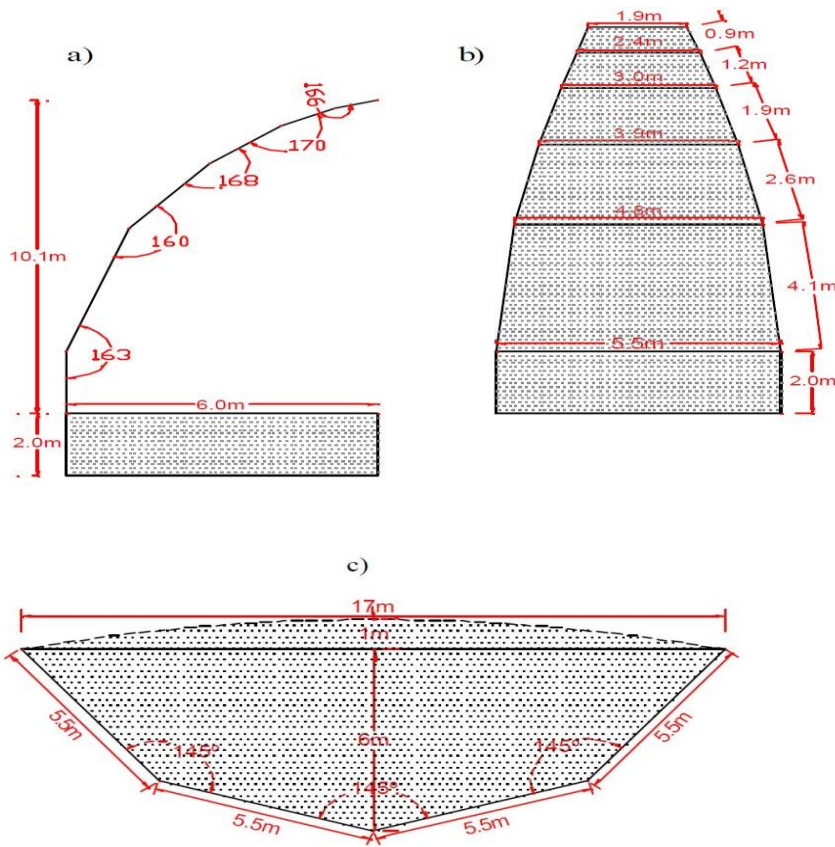
Partición de 4 lados: discretización del arco de la planta, en 4 rectas, y el arco del eje vertical en, 5 rectas. Compuesta por 24 superficies.



**Figura 2.18.** Dibujo a escala en 3 dimensiones de la aproximación propuesta. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).



Esta aproximación está compuesta por 4 franjas de iguales dimensiones (figura 2.19b), las que dan un total de 20 superficies inclinadas y 4 superficies dispuesta en forma vertical.



**Figura 2.19.** Dimensiones de la concha acústica a construir. a) Corte transversal discretizado; b) una franja de la partición; c) forma del escenario. **Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).

El diseño de la concha acústica no contempla paredes paralelas, por lo que se descarta así, el eco que se pudiera generar al interior del escenario, ya que, todas ellas están dispuestas en forma divergente. Desde el punto de vista de las gradas, no hay sector que esté limitado por la hipérbola. Por lo tanto, no habrá zonas de ecos, que pudieran producir las superficies de la concha acústica en dichos lugares.

#### 2.4. Pruebas experimentales diseñadas para valorar la efectividad de las conchas acústicas construidas

Se proponen varios experimentos para validar la efectividad de las conchas acústicas que serán construidas. Para realizar las mediciones se cuenta con un sonómetro promediador integrador

vinculado al software Smaart 7, lo cual permite obtener el análisis por bandas de octava con los niveles de precisión que garantiza el micrófono de alta calidad del sonómetro.

Con el uso de 2 fuentes sonoras, se determinará el comportamiento de las ondas acústicas generadas en diversos puntos del escenario. Para ello las variables que se modifican y se deben considerar como base para los posteriores análisis serán:

- **Sonido generado:** Se valora la posible influencia de las frecuencias generadas en el comportamiento de las ondas sonoras.

En primer lugar, se cuenta con un software que genera tonos puros en determinadas frecuencias. Se realiza la evaluación para cada una de esas frecuencias (250 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 16000 Hz.) al tener en cuenta que la concha construida puede provocar efectos diferentes en el comportamiento de las ondas sonoras para determinadas frecuencias.

Por otra parte como el principal objetivo del diseño de estas conchas acústicas es para escenarios al aire libre y se pretende que sean diseñadas en el contexto cubano, estos escenarios al aire libre se utilizan en la mayoría de las ocasiones como plazas para desarrollar actividades culturales y recreativas de la población donde se reproducen diferentes estilos musicales, por tal motivo se propone aplicar diferentes estilos musicales que son afines con valores de frecuencia elevados, bajos y medios dígame por ejemplo violín para elevadas frecuencias, percusión para bajas frecuencias y las músicas que más se emplean como música popular bailable y reggaetón y así poder ver el comportamiento que siguen las ondas sonoras que se generan.

- **Direccionalidad del sonido:** Se analiza la influencia de la colocación de las fuentes sonoras. Los puntos hacia los cuales se dirigen y los ángulos de inclinación deben incidir directamente en la propagación de las ondas sonoras.

Las fuentes sonoras se pueden colocar en diversas direcciones de forma de que se analice la influencia de esta variable en el nivel de presión sonora que se registra en cada uno de los puntos de medición. En este caso se pueden colocar las fuentes:

- a) Dirigidas directamente hacia la concha de forma tal de que el componente de la reflexión del sonido sea el que más influya en la propagación del mismo.
- b) Dirigidas directamente hacia la zona de la audiencia.
- c) Con variaciones tanto en el plano horizontal como en el plano vertical de la direccionalidad del sonido.

En el plano horizontal se pueden hacer variaciones de la direccionalidad al dirigir las fuentes directamente hacia la concha con direcciones de ángulos que varíen hacia los diferentes puntos del escenario con determinados grados de inclinación.

En el plano vertical pueden hacer variaciones de la direccionalidad al dirigir las fuentes directamente hacia la concha y variarlas con ángulos hacia arriba de forma tal de que las ondas sonoras se reflejen en el techo de la concha en determinados puntos específicos y se logre evaluar si concentran las ondas sonoras en determinados puntos del escenario.

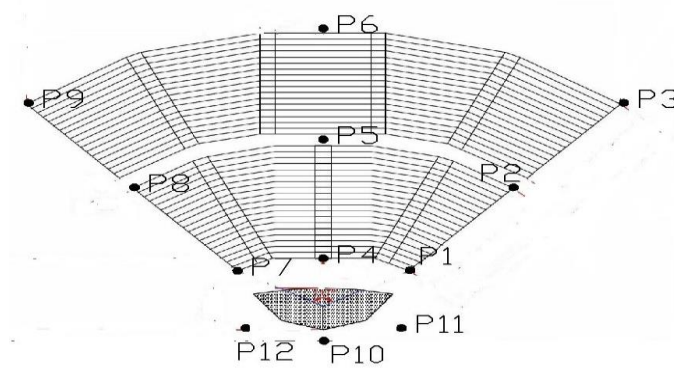
- Presencia-ausencia de la concha: Se determina, para iguales condiciones de generación, los niveles de presión sonora en un punto con la concha emplazada y sin la presencia de ella.

Este análisis permite determinar el efecto que provoca la concha sobre la propagación del sonido para las variables diseñadas con anterioridad.

- Puntos de medición: Se valora la influencia del sonido en la ubicación de los puntos de medición.

Estos puntos de medición se colocan a distancias variables de la concha y en la parte frontal y trasera de la misma. Ellos representan el alcance e influencia del sonido sobre personas, actividades o viviendas que pueden existir en las coordenadas determinadas.

Para el caso en el que se generen tonos puros en determinadas frecuencias se deciden colocar 12 puntos de la medición, 9 delante de la concha y 3 detrás de esta. En la figura 2.20 se puede observar la distribución de estos puntos.



**Figura 2.20.** Puntos de medición para el caso en el que se generen tonos puros en determinadas frecuencias. **Fuente:** elaboración propia.

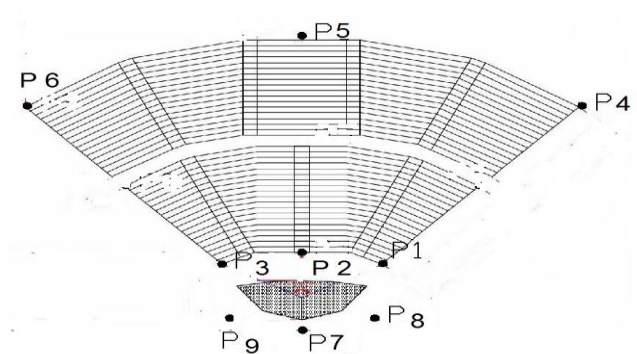
En este caso se toma como variable independiente presencia-ausencia de la concha y se analizan las variaciones en el comportamiento de las ondas sonoras en los diferentes puntos medidos para los casos que se muestran en el modelo siguiente:

| Frecuencia: _____   | P 1 | P 2 | P 3 | P 4 | P 5 | P 6 | P 7 | P 8 | P 9 | P 10 | P 11 | P 12 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en presencia de la concha. |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha.                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

**Figura 2.21.** Modelo propuesto para analizar los resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en determinadas frecuencias. **Fuente:** elaboración propia.

En cada uno de los recuadros se colocará el valor del Nivel de Presión Sonora (NPS) en dB que se obtiene de la frecuencia que se genere.

Para el caso en el que se generen diferentes estilos musicales se deciden colocar 9 puntos de medición, 6 delante de la concha y 3 detrás de esta. En la figura 2.22 se puede observar la distribución de estos puntos.



**Figura 2.22.** Puntos de medición para el caso en el que se generen diferentes estilos musicales. **Fuente:** elaboración propia.

En este caso se toma como variable independiente presencia-ausencia de la concha y direccionalidad del sonido. Se analizan las variaciones en el comportamiento de las ondas

sonoras en los diferentes puntos medidos para todos los casos que se muestran en el modelo siguiente:

|  | P1 | P2 | P3 .....P9 |
|--|----|----|------------|
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en presencia de la concha.  |    |    |            |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.   |    |    |            |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el exterior en el eje horizontal en presencia de la concha. |    |    |            |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el interior en el eje horizontal en presencia de la concha. |    |    |            |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha.   |    |    |            |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  |    |    |            |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas hacia arriba en el eje vertical en presencia de la concha.  |    |    |            |

**Figura 2.23.** Modelo propuesto para analizar los resultados de los experimentos con la generación de diferentes estilos musicales. **Fuente:** elaboración propia.

Como se puede apreciar el modelo tiene un recuadro arriba donde se colocará el Nivel de Presión Sonora integrado en dB y otros recuadros abajo donde se colocarán el desglose por frecuencias (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz y 16000 Hz) representativas del comportamiento de las ondas sonoras en las bandas de octava.

### Conclusiones parciales

- Se determinaron un conjunto de consideraciones para el diseño de escenarios al aire libre.
- Se seleccionó el caso de estudio de Alarcon Aguirre Valdivia (2002) donde se aplica el Método de Lyon para la construcción de conchas acústicas al aire libre.
- Se diseñaron pruebas experimentales para validar la efectividad de las conchas acústicas construidas donde se modifican las variables: sonido generado, direccionalidad del sonido, presencia-ausencia de la concha y puntos de medición.

### Capítulo III. Construcción de conchas acústicas al aire libre. Desarrollo de pruebas experimentales

En este capítulo se realiza el diseño y construcción de conchas acústicas a diferentes escalados, a partir del caso de estudio seleccionado en el capítulo anterior. Además de ello se realiza la valoración económica y se aplican y analizan un conjunto de pruebas experimentales para valorar la efectividad de las conchas acústicas.

#### 3.1. Construcción de la maqueta. Concha acústica a escala 2:100

Para la construcción de la maqueta se empleó una escala de 2:100 donde 2 cm representan un metro. En la tabla 3.1 se muestran las dimensiones reales del caso de estudio y las dimensiones de la maqueta que se construyó.

**Tabla 3.1.** Determinación de las dimensiones de la maqueta a partir del escalado seleccionado.

|                                 | Dimensiones reales del caso de estudio. | Dimensiones de la maqueta que se construyó. |
|---------------------------------|---|---|
| Altura de la concha             | 10,1 m                                  | 20,2  |
| Profundidad de la concha        | 6 m                                     | 12 cm                                       |
| Ancho de la concha              | 17 m                                    | 34 cm                                       |
| Largo máximo de la maqueta      | 71,5 m                                  | 143 cm                                      |
| Ancho máximo de la maqueta      | 50 m                                    | 100 cm                                      |
| Ancho del pasillo de las gradas | 2 m                                     | 4 cm  |

**Fuente:** elaboración propia

Para comenzar la construcción de la maqueta se confeccionaron las 4 partes de la concha acústica en madera, las cuales cumplen los requisitos de dimensiones y ángulos correspondientes. El encofrado de la concha acústica se realizó con la utilización de estas 4 partes. En la figura 3.1 se muestra el encofrado de la concha.



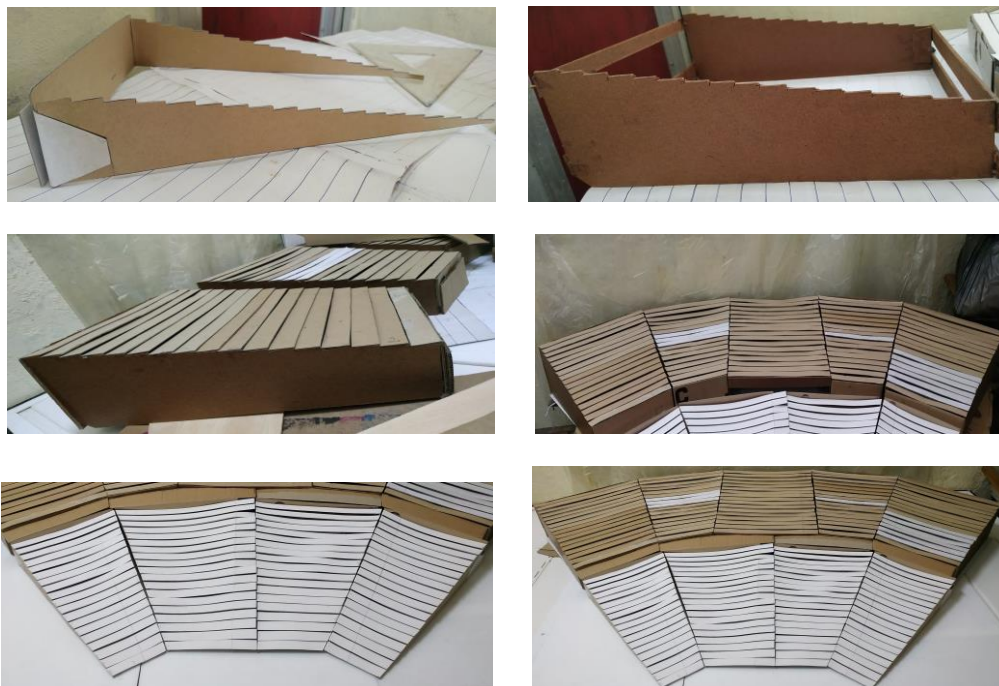
**Figura 3.1.** Encofrado de la concha acústica a escala 2:100. **Fuente:** elaboración propia.

Posteriormente se fundió la concha con la utilización de una mezcla de cemento y arena, se colocó una maya interior para reforzarla, se dejó reposar por 7 días y se procedió a desencofrar y resano. La concha se colocó encima de una base de madera. En la figura 3.2 se muestra el proceso de fundición, resano y la colocación en la base de madera de la concha acústica.



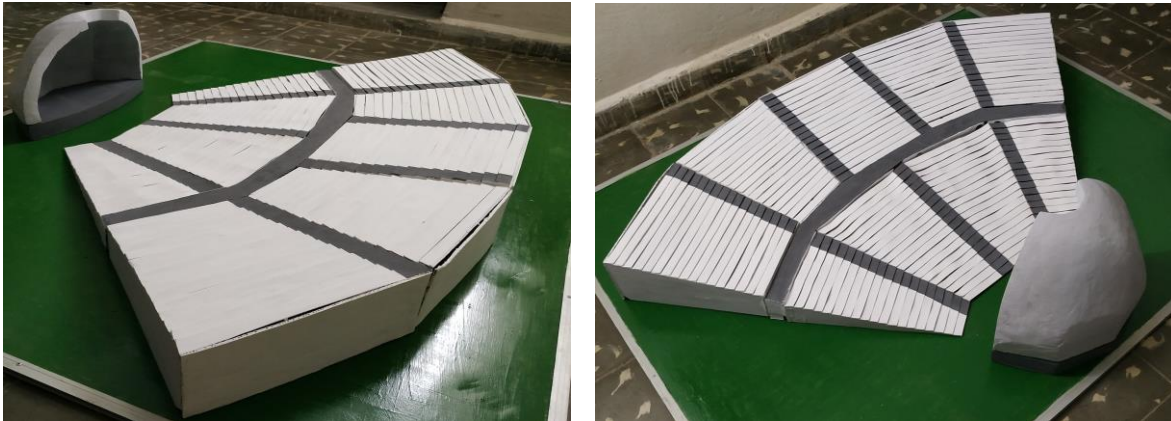
**Figura 3.2.** Fundición, resano y colocación en la base de madera de la concha acústica. **Fuente:** elaboración propia.

Toda la grada del anfiteatro fue realizada con diversas piezas de cartón unidas con pegamento. Debido al tamaño del mismo y en aras de que fuera más fácil su diseño y transportación se dividió en 6 partes, la primera parte la conforman toda la parte inferior de las gradas que incluyen el pasillo y al unir las otras 5 partes estas forman toda la sección superior de las gradas. En la figura 3.3 se muestra el proceso de confección de las gradas del anfiteatro.



**Figura 3.3.** Proceso de confección de las gradas del anfiteatro. **Fuente:** elaboración propia.

Al finalizar se procedió a darle el acabado a la concha con elementos como el acople de las diferentes partes, la pintura y pulir algunos detalles. En la figura 3.4 se muestra la disposición final de la maqueta.



**Figura 3.4.** Disposición final de la maqueta. **Fuente:** elaboración propia.

### 3.2. Construcción de la concha acústica a escala 8:100

Por otra parte, se decide construir una concha acústica con un escalado superior (8:100) que permita una concha de dimensiones superiores y de mayores facilidades a la hora de realizar determinados experimentos para validar su funcionamiento. En la tabla 3.2 se muestran las dimensiones reales del caso de estudio y las dimensiones de esta concha acústica.

**Tabla 3.2.** Determinación de las dimensiones de la concha acústica a escala 8:100.

|                          | <b>Dimensiones reales del caso de estudio.</b> | <b>Dimensiones de la concha acústica a escala 8:100.</b> |
|--------------------------|--|--|
| Altura de la concha      | 10,1 m   | 80,8 cm  |
| Profundidad de la concha | 6 m  | 48 cm  |
| Ancho de la concha       | 17 m   | 136 cm   |

**Fuente:** elaboración propia

A partir de cálculos matemáticos se pudo determinar que el peso de la concha acústica es de aproximadamente 150 kg. Para su construcción se siguieron los mismos pasos que en caso anterior donde únicamente se cambió que para el encofrado además de madera se utilizó pladur, a la mezcla además del cemento y la arena se le agregó piedra y después de fundida se



dejó reposar por 14 días. En la figura 3.5 se muestran las vistas del proceso de construcción de esta concha acústica en sus diferentes etapas.



**Figura 3.5.** Proceso de construcción de la concha acústica a escala 8:100. **Fuente:** elaboración propia.

### 3.3. Costos asociados

Se determinaron los costos asociados a la construcción de las conchas acústicas. Es válido aclarar que la obtención de sus componentes se realizó por esfuerzos propios del investigador. A continuación, se reflejan los costos unitarios de los materiales, así como su costo total.

**Tabla 3.3.** Determinación de los costos de las conchas acústicas construidas.

| Materiales         | Concha acústica a escala 2:100 |                | Concha acústica escala 8:100 |                | Costo total      |
|--------------------|--------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------|
|                    | Cantidad/unidad                | Costo unitario | Cantidad/unidad              | Costo unitario |                  |
| Cemento            | 1/6 saco                       | 6,60 CUC       | 5/6 saco                     | 6,60 CUC       | 6,60 CUC         |
| Arena              | 1/144 m <sup>3</sup>           | 18,00 CUC      | 9/144 m <sup>3</sup>         | 18,00 CUC      | 1,25 CUC         |
| Piedra             | -                              | 18,00 CUC      | 6/72 m <sup>3</sup>          | 18,00 CUC      | 1,50 CUC         |
| Madera             | 1/500 m <sup>3</sup>           | 190,00 CUC     | 9/500 m <sup>3</sup>         | 190,00 CUC     | 3,80 CUC         |
| Pladur             | -                              | 15,00 CUC      | 1/4 plancha (1,20x1,60m)     | 15,00 CUC      | 3,75 CUC         |
| Cartón prensado    | 1/8 plancha (1,40x1,80m)       | 7,00 CUC       | -                            | 7,00 CUC       | 0,88 CUC         |
| Cartón de caja     | 3 m <sup>2</sup>               | -              | -                            | -              | -                |
| Pegamento          | 1/4 litro                      | 4,00 CUC       | -                            | 4,00 CUC       | 1,00 CUC         |
| Maya               | 1/8 m <sup>2</sup>             | 4,00 CUC       | 15/8 m <sup>2</sup>          | 4,00 CUC       | 8,00 CUC         |
| Pintura de vinil   | 1,2 litros                     | 5,00 CUC       | 0,8 litros                   | 5,00 CUC       | 10,00 CUC        |
| <b>Costo total</b> |                                |                |                              |                | <b>36,78 CUC</b> |

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede apreciar el costo total de construcción de las conchas acústicas para el desarrollo de la investigación fue de aproximadamente 36,78 CUC.

### 3.4. Resultados de las pruebas experimentales propuestas

A continuación, se ofrecen los resultados de las pruebas experimentales propuestas, donde se tomaron los diseños realizados en el epígrafe 2.4 del capítulo anterior.

### 3.4.1. Análisis de los resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en determinadas frecuencias

Se realizó el montaje experimental para el análisis de la variable presencia-ausencia de la concha con la generación de tonos puros en determinadas frecuencias, estos experimentos se realizan con la concha acústica a escala 2:100, tal y como se muestra en las siguientes imágenes.



**Figura 3.6.** Montaje experimental para el análisis de la variable presencia-ausencia de la concha con la generación de tonos puros en determinadas frecuencias.

En este caso se realiza una comparación de los niveles de presión sonora registrados en todos los puntos.

- **Frecuencia de 250 Hz**

Con la generación de esta frecuencia se obtienen los valores que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.4.** Resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en la frecuencia de 250 Hz.

| <b>Frecuencia: 250 Hz</b>   | P 1 | P 2 | P 3 | P 4 | P 5 | P 6 | P 7 | P 8 | P 9 | P 10 | P 11 | P 12 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 91  | 88  | 82  | 93  | 89  | 82  | 92  | 81  | 80  | 88   | 85   | 86   |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en presencia de la concha. | 95  | 91  | 89  | 95  | 94  | 90  | 95  | 86  | 85  | 86   | 81   | 85   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.                 | 81  | 75  | 65  | 88  | 83  | 79  | 85  | 81  | 70  | 79   | 76   | 80   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha                 | 88  | 77  | 71  | 95  | 90  | 86  | 91  | 87  | 79  | 71   | 70   | 79   |

**Fuente:** elaboración propia

La presencia de la concha en las dos situaciones provoca una variación en los niveles de presión sonora, esta variación se calcula de manera porcentual y los resultados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.5.** Porcentaje de variación de los niveles de presión sonora con la generación de la frecuencia de 250 Hz.

|   | P 1  | P 2  | P 3  | P 4  | P 5  | P 6  | P 7  | P 8  | P 9   | P 10   | P 11  | P 12  |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|-------|-------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia. | 4,40 | 3,41 | 8,54 | 2,15 | 5,62 | 9,76 | 3,26 | 6,17 | 6,25  | -2,27  | -4,71 | -1,16 |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia.                | 8,64 | 2,67 | 9,23 | 7,95 | 8,43 | 8,86 | 7,06 | 7,41 | 12,86 | -10,13 | -7,89 | -1,25 |

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede apreciar en presencia de la concha en las dos situaciones se obtuvo un incremento en el nivel de presión sonora en todos los puntos ubicados en la zona de la audiencia y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 2,15 % en el punto 4 hasta un

12,86 % en el punto 9 y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 1,16 % en el punto 12 hasta un 10,13 % en el punto 10.

- **Frecuencia 1000 Hz**

Los resultados obtenidos con la generación de esta frecuencia se muestran en el anexo 2.

Como se puede apreciar con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia se obtiene un incremento en el nivel de presión sonora para la mayoría de los puntos ubicados en esta zona y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario, solamente en los puntos 4 y 6 no existió ningún tipo de variación. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 1,1 % en el punto 5 hasta un 22,97 % en el punto 2 y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 2,41 % en el punto 12 hasta un 23,91 % en el punto 10.

En este caso con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia se obtiene un incremento del nivel de presión sonora solamente en dos de los puntos ubicados en esta zona (punto 3 y punto 5) y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario. En los puntos 3 y 5 se obtuvo un incremento de 3,85 % y 1,06 % respectivamente, y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 1,23 % en el punto 12 hasta un 6,52 % en el punto 10.

- **Frecuencia 2000 Hz**

Los resultados obtenidos con la generación de esta frecuencia se muestran en el anexo 3.

Con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia se obtiene un incremento en el nivel de presión sonora para la mayoría de los puntos ubicados en esta zona y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario, solamente en los puntos 3, 4 y 5 no existió ningún tipo de variación. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 1,43 % en el punto 8 hasta un 14,75 % en el punto 9 y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 12,82 % en el punto 10 hasta un 28,40 % en el punto 11.

Para este caso con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia se obtiene un incremento del nivel de presión sonora en casi todos los puntos ubicados en esta zona y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario, únicamente en los puntos 3, 5 y 7 no existió ningún tipo de variación. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 1,41 % en el punto 1 hasta un 5,33 % en el

punto 4 y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 2,86 % en el punto 12 hasta un 12,50 % en el punto 10.

- **Frecuencia 4000 Hz**

Los resultados obtenidos con la generación de esta frecuencia se muestran en el anexo 4.

Con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia se obtiene un incremento en el nivel de presión sonora en todos los puntos ubicados en esta zona y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 1,33 % en el punto 2 hasta un 25,76 % en el punto 1 y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 22,22 % en el punto 11 hasta un 23,46 % en los puntos 10 y 12.

En este caso con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia se obtiene un incremento del nivel de presión sonora en la mayoría de los puntos ubicados en esta zona y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario, solamente en los puntos 4, 5 y 6 no existió ningún tipo de variación. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 1,25 % en el punto 8 hasta un 9,86 % en el punto 1 y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 2,78 % en el punto 12 hasta un 12,82 % en el punto 11.

- **Frecuencia 16000 Hz**

Los resultados obtenidos con la generación de esta frecuencia se muestran en el anexo 5.

Como se puede apreciar con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia se obtiene un incremento en el nivel de presión sonora en todos los puntos ubicados en esta zona y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 15 % en el punto 2 hasta un 51,52 % en el punto 8 y en los puntos ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 25,49 % en el punto 12 hasta un 54,90 % en el punto 11.

Con la presencia de la concha y las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia se obtiene un incremento del nivel de presión sonora en casi todos los puntos ubicados en esta zona y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario, en los puntos 2 y 6 no existió ningún tipo de variación. En los puntos ubicados en la zona de la audiencia el incremento varía desde 1,79 % en el punto 5 hasta un 13,73 % en el punto 7 y en los puntos

ubicados detrás del escenario la disminución varía desde 4,76 % en el punto 12 hasta un 6,98 % en el punto 10.

- **Valoraciones generales del comportamiento de las ondas sonoras ante la generación de tonos puros**

De los análisis individuales realizados para las diferentes frecuencias se detectaron los elementos comunes que describen el comportamiento general de las ondas sonoras para este experimento tal y como se describe a continuación:

1. En concordancia con los planteamientos de Bolaños (2016) en todos los casos se logra un incremento de los niveles de presión sonora en la mayoría de los puntos ubicados en la zona de la audiencia.
2. Como se puede apreciar, salvo la frecuencia de 250 Hz donde con la presencia de la concha se logra un incremento en todos los puntos ubicados en la zona de la audiencia, en las restantes frecuencias hay comportamientos en determinados puntos donde no se producen variaciones.
3. En todos los casos siempre en los puntos ubicados detrás de la concha se obtiene una disminución del nivel de presión sonora, esta disminución varía desde 1,16% hasta 54,90%.
4. En los casos en que las dos fuentes están dirigidas hacia la zona de la audiencia se obtienen incrementos en los valores de presión sonora en una menor cantidad de puntos que cuando las dos fuentes están dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia. Este comportamiento está acorde con lo que plantean Sendra Salas (1992), Pérez Miñana (1969) y Alarcon Aguirre Valdivia (2002) sobre la reflexión del sonido.
5. En los casos en que las dos fuentes están dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia, en la frecuencia de 16000 Hz es en la que se obtiene un mayor incremento en los niveles de presión sonora en los puntos ubicados en la zona de la audiencia y una mayor disminución en los puntos ubicados detrás del escenario.
6. A excepción de la frecuencia de 4000 Hz, en todas las frecuencias para los casos en que las dos fuentes están dirigidas hacia la zona de la audiencia se aprecia una mayor disminución del nivel de presión sonora en el punto 10.

### 3.4.2. Resultados experimentales para la generación de estilos musicales

En este caso se realiza una comparación de los niveles de presión sonora registrados en todos los puntos, en algunas situaciones se tiene en cuenta la variable presencia-ausencia de la concha y en otras se tiene en cuenta la variable direccionalidad del sonido. Para la realización de estos experimentos se utiliza la concha acústica a escala 8:100 y se colocan las dos fuentes sonoras a 30 cm de los bordes de la concha. En las siguientes imágenes se muestra el montaje experimental.



**Figura 3.7** Montaje experimental con la generación de diferentes estilos musicales.



- **Percusión**

Con la generación de este estilo musical se obtienen los valores que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.14.** Resultados de los experimentos con la generación de estilos musicales, específicamente sonido de percusión.

| Percusión  | P1                      | P2                      | P3                      | P4                      | P5                      | P6                      | P7                      | P8                      | P9                      |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en presencia de la concha.  | 73,7                    | 75,7                    | 75,1                    | 72,2                    | 74,1                    | 72,8                    | 67,2                    | 67,9                    | 68                      |
|  | 50 57 73 65 66 60 37 37 | 49 60 77 70 66 59 35 34 | 46 56 74 70 69 62 37 34 | 47 57 73 66 66 61 38 37 | 47 58 73 70 68 62 38 36 | 43 55 73 65 66 61 38 35 | 41 52 66 64 61 57 36 37 | 41 50 69 63 55 35 34    | 39 50 68 61 60 54 35 34 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.   | 71,6                    | 70,4                    | 71,8                    | 70,4                    | 71,9                    | 69,4                    | 73,7                    | 71,8                    | 74                      |
|  | 49 57 72 68 67 61 37 35 | 47 59 75 66 62 59 35 36 | 49 56 72 65 64 60 37 34 | 44 46 61 57 56 49 34 35 | 48 52 65 60 60 51 38 37 | 48 58 67 63 63 59 38 37 | 46 58 73 66 62 60 36 34 | 48 58 73 68 69 64 38 36 | 49 57 71 66 65 61 38 37 |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el exterior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 74                      | 73,5                    | 72,4                    | 72,3                    | 73,8                    | 73,5                    | 68,9                    | 69,4                    | 68,9                    |
|  | 47 58 74 68 65 61 38 35 | 49 61 78 70 67 62 37 32 | 46 58 75 70 69 61 37 35 | 45 54 70 67 64 60 37 37 | 46 58 73 68 65 61 38 33 | 54 56 73 69 67 61 38 35 | 43 56 70 63 62 56 37 38 | 40 51 69 64 63 58 37 35 | 41 49 67 60 61 59 46 37 |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el interior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 72,8                    | 73,7                    | 76,2                    | 73,4                    | 73,8                    | 73,1                    | 70                      | 70,1                    | 70,2                    |
|  | 48 61 73 69 70 61 38 32 | 45 58 73 71 66 58 39 35 | 45 58 74 71 69 61 38 35 | 44 58 73 68 68 61 37 34 | 47 58 72 71 67 62 37 33 | 50 57 73 70 68 61 38 34 | 50 57 70 65 65 59 37 35 | 44 50 69 65 61 57 38 37 | 47 50 71 63 62 57 37 38 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha.   | 74                      | 76,9                    | 75,4                    | 72,8                    | 75,6                    | 73,8                    | 69,8                    | 68,5                    | 70,3                    |
|  | 46 59 73 67 67 59 38 37 | 42 59 74 70 64 58 35 33 | 46 61 73 70 67 60 38 40 | 44 57 71 68 68 60 37 35 | 40 56 74 70 67 59 37 34 | 47 60 74 70 69 62 38 35 | 44 57 70 62 62 57 36 35 | 47 51 70 61 61 56 37 36 | 43 51 70 61 61 56 37 38 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 68,4                    | 67,5                    | 68,6                    | 62,8                    | 68,2                    | 66,6                    | 70                      | 70,5                    | 71,2                    |
|  | 50 57 66 61 59 52 35 34 | 47 55 70 66 59 56 39 37 | 48 52 69 65 61 56 37 36 | 47 50 64 59 59 53 38 37 | 45 53 67 62 61 56 36 37 | 48 70 64 65 61 60 45 37 | 58 66 70 66 66 59 50 45 | 51 52 71 63 62 57 36 35 | 52 54 72 67 65 59 37 35 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas hacia arriba en el eje vertical en presencia de la concha.  | 73,2                    | 74,8                    | 72,3                    | 70,1                    | 71,6                    | 70                      | 64,6                    | 66,8                    | 65,2                    |
|  | 49 58 73 67 66 60 38 36 | 46 58 73 68 64 58 37 34 | 48 58 73 64 65 59 37 34 | 47 54 70 64 61 58 37 35 | 48 52 69 66 61 57 36 37 | 49 49 70 62 61 57 39 39 | 51 50 63 60 60 53 34 34 | 52 56 67 61 63 55 39 35 | 45 47 63 58 57 53 34 34 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos con la generación de los estilos musicales violín, reggaetón y música popular cubana se muestran en los anexos 6, 7 y 8 respectivamente.

En este caso el análisis se realiza de forma diferente al caso anterior, debido a que son muchos experimentos se ofrece solamente una valoración general del comportamiento de las ondas sonoras donde se consideran los comportamientos individuales analizados en la tabla 3.14 y en los anexos 6,7 y 8.

- **Valoraciones generales del comportamiento de las ondas sonoras ante la generación de diferentes estilos musicales**

1. En los casos en que se analizó presencia-ausencia de la concha se pudo comprobar que la presencia de la concha provocó un aumento de los niveles de presión sonora en todos los puntos ubicados en la zona de la audiencia y una disminución en todos los puntos ubicados detrás del escenario. Con esto se cumple con los patrones de funcionamiento de las conchas acústicas planteados por Bolaños (2016).
2. En los casos en que se varía la direccionalidad del sonido tanto en el plano horizontal como el vertical se aprecian comportamientos similares en los niveles de presión sonora, lo cual demuestra que cuando las dos fuentes están dirigidas hacia la concha, aunque existan variaciones de la direccionalidad del sonido en ambos ejes, las superficies reflectantes de la concha garantizan que se cubran de reflexiones las zonas donde se encuentra la audiencia. Esto está acorde con lo que plantean Luis Reyes and Guido Solís (2012), Daumal i Domenech (1994) y Alarcon Aguirre Valdivia (2002) sobre los resultados que garantiza la aplicación del Método de Lyon.
3. Se puede apreciar que en todas las situaciones los puntos que se encuentran ubicados detrás de la concha sufren una disminución de los niveles de presión sonora al compararlos con los tres puntos más cercanos a la concha ubicados en la zona de la audiencia.
4. Los resultados obtenidos no permiten inferir un patrón de comportamiento determinado en las distintas frecuencias para los estilos musicales que se emitieron.
5. De los estilos musicales que se emitieron se apreció que en el reggaetón se registraron niveles de presión sonora superiores, esto está dado por las características de este estilo musical.

Finalmente es válido aclarar que el montaje experimental con una representación a escala de las conchas pudo tener alguna influencia en los valores que se obtuvieron. Existen varios

factores como el escalado, la calidad de las fuentes utilizadas, las variabilidades en los puntos de medición y otros, que pudo atentar contra la veracidad de estos resultados.

### **Conclusiones parciales**

- A partir del caso de estudio seleccionado se construyeron dos conchas acústicas de concreto con escalas de 2:100 y 8:100 respectivamente.
- Los costos asociados a la construcción de las conchas acústicas fueron de 36,78 CUC.
- Los resultados obtenidos en los experimentos demostraron que las conchas acústicas mejoran la acústica en los recintos al aire libre.

## Conclusiones

1. De la construcción del marco teórico referencial se determinó que las conchas acústicas son un método de control acústico muy utilizado en escenarios al aire libre que permiten focalizar la energía acústica y reforzar naturalmente el nivel de presión sonora emitido por un orador, cantante o músico ubicado en el escenario.
2. Se seleccionó el caso de estudio de Alarcon Aguirre Valdivia (2002) donde se emplea el Método de Lyon para la construcción de conchas acústicas al aire libre.
3. A partir del caso de estudio seleccionado se construyeron dos conchas acústicas de concreto con escalas de 2:100 y 8:100 respectivamente.
4. Los costos asociados a la construcción de las conchas acústicas fueron de 36,78 CUC.
5. Se diseñaron pruebas experimentales para validar la efectividad de las conchas acústicas construidas donde se modificaron las variables sonido generado, direccionalidad del sonido, presencia-ausencia de la concha y puntos de medición.
6. Los resultados de la aplicación de los experimentos evidencian que las conchas acústicas mejoran la acústica de los recintos al aire libre y reducen el ruido que llega a las personas y a las viviendas que se encuentren detrás de ella.

## **Recomendaciones**

1. Proponer el empleo de las conchas acústicas, en futuras investigaciones, donde se estudie la propagación del sonido en escenarios al aire libre, a partir de que se demostró la efectividad de las mismas como método de control acústico.
2. Emplear las conchas acústicas que se construyeron, como método de enseñanza para la formación de profesionales.

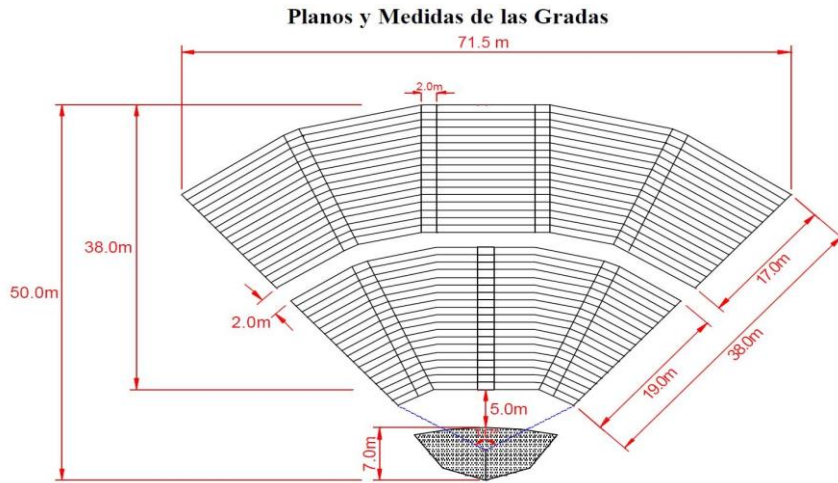
## Referencias bibliográficas

- Alarcon Aguirre Valdivia, J. A. (2002). *Diseño y Construcción de un escenario al aire libre mediante una Concha Acústica* (Tesis presentada para optar al grado de Licenciado en Acústica y al título profesional de Ingeriero Acústico), Universidad Austral de Chile.
- Alvarez Bayona, T. (2018). Aspectos Ergonómicos del ruido: evaluación.
- Ambrosio Sanz, A. (2018). *Metodología preliminar para el diseño de auditorios*.
- Bolaños, G. (2016). Analisis de la concha acustica Parque Samanes. *Arqustic*.
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.
- CC.CO, S. d. S. L. y. M. A. d. I. c. o. d. d. A. (2009). El Ruido del riesgo sonoro al daño silencioso. .
- CEC, R. (2017). Ondas sonoras. Todas las direcciones. *CEC*.
- Comisión Europea, U. (2009). Guía de buenas prácticas no vinculante para la aplicación de la Directiva 2003/10/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (ruido).
- Cortés Polanco, C. (2010). *Introducción al sonido y la acústica*.
- Cremaschi, & Saenz. (2016). *Procesos Constructivos*
- Crocker Malcolm, J. (1998). *Handbook of Acoustics*.
- Daumal i Domenech, F. (1994). La acústica de la sala de asambleas del Palacio de las Naciones de Ginebra, de Le Corbusier.
- Dominicana, S. d. E. d. M. A. y. R. N. d. I. R. (2003). Normas Ambientales para la protección contra ruidos.
- Estellés Díaz, R. (2007). *Acondicionamiento acústico-Temas teóricos*.
- Estellés Díaz, R. (2009). Guía para el diseño de Auditorios.
- Estellés Díaz, R. (2010). Acústica arquitectonica definiciones, formulas y tablas.
- García Dihigo, J. *Protección e higiene del trabajo*.
- García Dihigo, J. (2016). *RUIDO, VIBRACIONES Y PRESIONES ANORMALES*.
- Harris, C. (1998). *Manual de medidas acusticas y control de ruido*.
- Hernández Calleja, A. (1998). Confort Acústico: el ruido en oficinas.
- Igua Porras, Y. R. (2005). *Diseño de aislamiento y acondicionamiento acústico para los estudios de emisión y grabación de la nueva sede de la emisora Kennedy*. (tesis para optar por el título de Ingeniería de Sonidos), Universidad de Buenaventura, Colombia.
- Laviana Francisco, J. (2008). Ingeniería de Ondas - Acústica Arquitectónica.
- Luis Reyes, J., & Guido Solís, J. E. (2012). *Diseño de un teatro estilo griego para orquestas sinfónicas*. (Tesis para obtener el título de ingeniero en comunicaciones y electrónica.).
- Martínez, F. (2017). Evolución de la acústica arquitectónica. *ideatec*.
- Martínez Parra, R. (2010). Introducción a la Acústica de Salas. *Ingenieros Acústicos*.

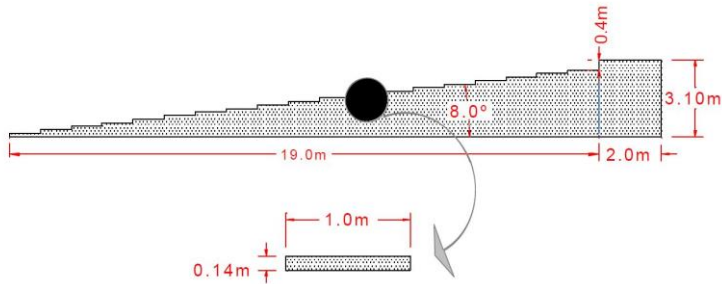
- Miyara, F. (1999a). *Acústica y Sistemas de Sonido*. Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.
- Miyara, F. (1999b). *Control de Ruido*.
- Parejo Gamboa, M. (2013). *DESARROLLO DE MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS A PARTIR DE RESIDUOS AGRÍCOLAS* (Tesis en opción al título de master en ingeniería ambiental ).
- Pereira, M. (2018). *¿Cómo funcionan y se diseñan las conchas acústicas? . Plataforma Arquitectura*.
- Pérez Miñana, J. (1969). *Compendio práctico de acústica aplicada*.
- Plus, R. d. M. (2017). *Diseño de la Concha Acústica. Monografías Plus*.
- Quintana Martínez, E. (1993). *Control de ruido en la Central Termoeléctrica Antonio Guiterras del municipio Matanzas*. (Trabajo de diploma), Universidad de Matanzas, Matanzas.
- Recuero López, M. (1993). *Acústica arquitectónica*.
- Redonda Fernández, M. (2013). *Acústica aplicada a la edificación*.
- Reyes Cordero, I. (2012). *Diseño arquitectónico de un teatro al aire libre*. (Tesis para obtener el título de Ingeriero en Comunicaciones y Electrónica ), Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica Mexico.
- Rodríguez González, I., Jáuregui, D., & Leyva Bruzón, L. (2007). *Seguridad y Salud en el trabajo*. La Habana: Editorial Félix Varela.
- Sánchez Delgado, C., Dujovne Guzman, L., & Poo Barrera, C. (2006). *Manual de Aplicación Reglamentación Acústica*
- Sandoval Delgado, M. (2004). *Diseño armónico de un teatro-auditorio*.
- Sendra Salas, J. J. (1992). *Acustica Gráfica: un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica. Revista de Edificación*.
- Sommerhoff Hyde, J. (1987). *Acústica de locales*.
- UGT-Madrid, S. d. S. L. (2012). *Cuadernillo Informativo de PRL: Ruido y Vibraciones*.

## Anexos

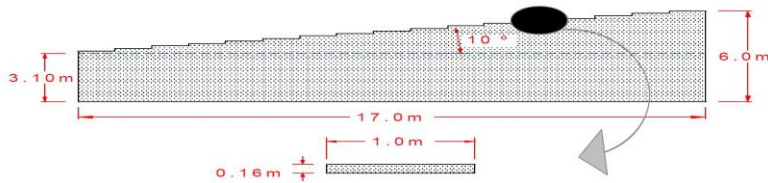
### Anexo 1. Planos y medidas de las gradas.



**Escala inferior**



**Escala superior**



**Fuente:** tomado de Alarcon Aguirre Valdivia (2002).



**Anexo 2.** Resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en la frecuencia de 1000 Hz.

| <b>Frecuencia: 1000 Hz</b>  | P 1 | P 2 | P 3 | P 4 | P 5 | P 6 | P 7 | P 8 | P 9 | P 10 | P 11 | P 12 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 87  | 74  | 81  | 93  | 91  | 80  | 84  | 74  | 73  | 92   | 83   | 83   |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en presencia de la concha. | 95  | 91  | 89  | 93  | 92  | 80  | 94  | 78  | 74  | 70   | 79   | 81   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.                 | 94  | 86  | 78  | 95  | 94  | 85  | 94  | 87  | 79  | 92   | 82   | 81   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha                 | 94  | 86  | 81  | 95  | 95  | 85  | 94  | 87  | 79  | 86   | 80   | 80   |

**Fuente:** elaboración propia.

|   | P 1  | P 2   | P 3  | P 4  | P 5  | P 6  | P 7   | P 8  | P 9  | P 10   | P 11  | P 12  |
|---|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|--------|-------|-------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia. | 9,20 | 22,97 | 9,88 | 0,00 | 1,10 | 0,00 | 11,90 | 5,41 | 1,37 | -23,91 | -4,82 | -2,41 |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia.                | 0,00 | 0,00  | 3,85 | 0,00 | 1,06 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | -6,52  | -2,44 | -1,23 |

**Fuente:** elaboración propia.

**Anexo 3.** Resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en la frecuencia de 2000 Hz.

| <b>Frecuencia: 2000 Hz</b>  | P 1 | P 2 | P 3 | P 4 | P 5 | P 6 | P 7 | P 8 | P 9 | P 10 | P 11 | P 12 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 79  | 69  | 70  | 79  | 71  | 67  | 76  | 70  | 61  | 78   | 81   | 77   |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en presencia de la concha. | 81  | 71  | 70  | 79  | 71  | 68  | 82  | 71  | 70  | 68   | 58   | 59   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.                 | 71  | 66  | 65  | 75  | 69  | 64  | 79  | 68  | 61  | 72   | 73   | 70   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha                 | 72  | 69  | 65  | 79  | 69  | 66  | 79  | 70  | 62  | 63   | 65   | 68   |

**Fuente:** elaboración propia.

|   | P 1  | P 2  | P 3  | P 4  | P 5  | P 6  | P 7  | P 8  | P 9   | P 10   | P 11   | P 12   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|--------|--------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia. | 2,53 | 2,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,49 | 7,89 | 1,43 | 14,75 | -12,82 | -28,40 | -23,38 |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia.                | 1,41 | 4,55 | 0,00 | 5,33 | 0,00 | 3,13 | 0,00 | 2,94 | 1,64  | -12,50 | -10,96 | -2,86  |

**Fuente:** elaboración propia.

**Anexo 4.** Resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en la frecuencia de 4000 Hz.

| <b>Frecuencia: 4000 Hz</b>  | P 1 | P 2 | P 3 | P 4 | P 5 | P 6 | P 7 | P 8 | P 9 | P 10 | P 11 | P 12 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 66  | 75  | 63  | 77  | 70  | 68  | 71  | 65  | 63  | 81   | 81   | 81   |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en presencia de la concha. | 83  | 76  | 68  | 88  | 77  | 72  | 83  | 72  | 68  | 62   | 63   | 62   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.                 | 71  | 71  | 70  | 83  | 81  | 81  | 75  | 80  | 75  | 76   | 78   | 72   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha                 | 78  | 73  | 73  | 83  | 81  | 81  | 77  | 81  | 78  | 70   | 68   | 70   |

**Fuente:** elaboración propia.

|   | P 1   | P 2  | P 3  | P 4   | P 5   | P 6  | P 7   | P 8   | P 9  | P 10   | P 11   | P 12   |
|---|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|--------|--------|--------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia. | 25,76 | 1,33 | 7,94 | 14,29 | 10,00 | 5,88 | 16,90 | 10,77 | 7,94 | -23,46 | -22,22 | -23,46 |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia.                | 9,86  | 2,82 | 4,29 | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 2,67  | 1,25  | 4,00 | -7,89  | -12,82 | -2,78  |

**Fuente:** elaboración propia.

**Anexo 5.** Resultados de los experimentos con la generación de tonos puros en la frecuencia de 16000 Hz.

| <b>Frecuencia: <u>16000 Hz</u></b>  | P 1 | P 2 | P 3 | P 4 | P 5 | P 6 | P 7 | P 8 | P 9 | P 10 | P 11 | P 12 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 41  | 40  | 38  | 41  | 38  | 35  | 47  | 33  | 42  | 57   | 51   | 51   |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia en presencia de la concha. | 61  | 46  | 48  | 58  | 49  | 49  | 62  | 50  | 52  | 35   | 23   | 38   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.                 | 51  | 47  | 46  | 56  | 56  | 51  | 51  | 48  | 43  | 43   | 40   | 42   |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha                 | 52  | 47  | 49  | 58  | 57  | 51  | 58  | 50  | 48  | 40   | 38   | 40   |

**Fuente:** elaboración propia.

|   | P 1   | P 2   | P 3   | P 4   | P 5   | P 6   | P 7   | P 8   | P 9   | P 10   | P 11   | P 12   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Las dos fuentes dirigidas en sentido opuesto a la zona de la audiencia. | 48,78 | 15,00 | 26,32 | 41,46 | 28,95 | 40,00 | 31,91 | 51,52 | 23,81 | -38,60 | -54,90 | -25,49 |
| Las dos fuentes dirigidas hacia la zona de la audiencia.                | 1,96  | 0,00  | 6,52  | 3,57  | 1,79  | 0,00  | 13,73 | 4,17  | 11,63 | -6,98  | -5,00  | -4,76  |

**Fuente:** elaboración propia.

**Anexo 6.** Resultados de los experimentos con la generación de estilos musicales, específicamente sonido de violín.

| Violín   | P1  | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   | P9   |
|--|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en presencia de la concha.  | 71  | 72,8 | 74,6 | 70,3 | 72,7 | 72,1 | 65,1 | 62   | 66,6 |
|  | 46 53 70 60 62 49 35 37 49 61 72 68 63 57 34 34 44 53 75 63 69 58 37 35 47 58 70 62 64 55 39 34 49 58 72 65 65 58 37 37 44 51 73 62 68 57 35 37 49 52 62 56 59 49 33 34 46 45 62 59 59 45 35 37 38 52 66 54 58 45 33 33 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.   | 65,6  | 67,9 | 69,3 | 63,3 | 68,1 | 64,7 | 74,8 | 72   | 72,8 |
|  | 46 48 68 55 60 47 34 35 53 60 66 55 59 50 35 34 43 48 66 57 58 51 37 38 46 49 62 57 59 51 40 36 44 55 65 59 61 54 36 37 46 50 64 58 60 53 34 35 50 58 75 61 62 55 36 35 53 54 72 63 68 61 35 35 53 49 79 63 65 52 36 35 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el exterior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 71,8  | 72   | 73   | 69,7 | 72,3 | 70,1 | 62,2 | 64,7 | 66,2 |
|  | 51 55 74 61 68 58 33 34 46 60 72 65 68 57 40 35 46 58 72 66 65 58 35 34 48 56 69 61 63 56 35 34 45 54 70 64 63 54 34 34 40 57 69 63 64 56 36 37 47 57 61 59 58 51 36 37 45 47 64 57 59 48 33 34 50 54 66 58 59 48 34 34 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el interior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 72,3  | 73,2 | 73,9 | 69,3 | 70,1 | 70,8 | 67,2 | 66,2 | 66,7 |
|  | 44 59 71 65 66 58 36 37 43 62 72 68 66 57 41 38 41 57 72 68 68 58 37 37 41 51 70 59 64 56 33 34 41 52 69 64 63 57 34 34 44 53 70 61 67 57 34 34 44 49 68 59 64 54 33 34 38 51 65 59 61 52 36 37 44 51 67 59 63 54 34 34 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha.   | 71,6  | 75,1 | 72,5 | 70,2 | 71,1 | 70,1 | 67,6 | 67,5 | 66,9 |
|  | 50 61 72 66 67 58 36 34 47 63 75 66 66 60 34 34 48 55 73 64 68 58 37 35 42 55 70 61 63 56 35 37 47 55 72 61 66 58 34 34 42 52 70 59 66 59 34 35 44 52 70 56 62 52 42 37 44 55 68 57 63 54 36 37 52 53 67 57 61 54 35 34 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 61,7  | 65,1 | 63   | 61,5 | 63,2 | 61,9 | 70,8 | 71,7 | 70,1 |
|  | 44 49 61 52 58 45 35 35 48 55 64 58 58 47 37 36 43 47 63 57 57 45 38 35 47 48 61 50 57 44 36 37 49 50 63 52 58 45 36 36 46 51 60 54 58 44 36 37 45 55 73 62 63 53 35 34 47 55 71 59 60 51 34 35 48 51 71 62 63 56 36 36 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas hacia arriba en el eje vertical en presencia de la concha.  | 72,6  | 73,4 | 73,1 | 69,1 | 71   | 70,4 | 65,9 | 66,9 | 67,7 |
|  | 49 58 72 65 67 57 34 34 49 62 73 69 67 56 36 37 50 53 75 64 69 60 36 37 49 51 70 60 65 54 36 38 48 54 70 63 62 53 34 34 46 54 69 65 66 57 35 34 45 52 65 58 61 52 35 34 45 54 68 59 61 51 34 34 48 50 67 58 61 52 36 35 |      |      |      |      |      |      |      |      |

Fuente: elaboración propia.

**Anexo 7. Resultados de los experimentos con la generación de estilos musicales, específicamente música de reggaetón.**

| Reggaetón  | P1                      | P2                      | P3                      | P4                      | P5                      | P6                      | P7                      | P8                      | P9                      |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en presencia de la concha.  | 77,8                    | 77,9                    | 77,3                    | 77,8                    | 78,4                    | 78,5                    | 76,5                    | 76,7                    | 76,3                    |
|  | 38 61 76 67 73 62 38 33 | 45 55 74 70 64 60 37 31 | 42 55 75 64 69 60 36 34 | 46 58 75 65 69 59 36 33 | 42 58 79 64 71 59 36 32 | 43 55 77 62 69 58 34 32 | 42 63 76 69 72 64 39 36 | 42 58 74 71 67 40 34    | 38 58 74 70 74 64 39 35 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.   | 76,8                    | 77                      | 76,9                    | 76,5                    | 77,4                    | 77,5                    | 78,4                    | 77,8                    | 77,4                    |
|  | 50 60 77 67 70 62 38 34 | 36 62 74 68 73 61 38 33 | 38 58 74 71 76 63 38 34 | 34 58 71 68 72 63 38 34 | 37 60 74 65 71 61 36 32 | 46 60 77 65 69 55 35 34 | 51 60 76 66 72 60 38 35 | 40 56 74 71 71 69 41 36 | 41 57 79 66 69 57 34 33 |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el exterior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 77,1                    | 77,6                    | 77,8                    | 75,3                    | 76,4                    | 76,3                    | 75,3                    | 76,5                    | 74,6                    |
|  | 36 62 77 68 71 63 38 35 | 36 59 75 70 71 62 37 32 | 37 58 74 72 75 63 37 34 | 37 57 73 68 72 66 38 33 | 36 63 75 70 71 64 38 34 | 38 60 73 69 73 65 39 35 | 39 62 74 68 71 65 45 37 | 37 54 73 72 72 67 40 33 | 37 58 75 67 71 66 39 34 |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el interior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 77,8                    | 78                      | 78,1                    | 77,9                    | 76,2                    | 74,3                    | 76,7                    | 77,4                    | 77,8                    |
|  | 39 57 72 73 72 65 43 33 | 37 57 74 66 70 60 35 34 | 39 50 73 73 70 65 38 32 | 41 54 73 71 71 68 41 33 | 46 61 76 66 71 62 37 33 | 43 57 77 64 72 62 38 34 | 52 59 72 70 71 66 40 34 | 44 61 73 68 71 65 38 36 | 48 58 73 66 73 63 41 35 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha.   | 77,4                    | 76,9                    | 77,8                    | 78,2                    | 74,8                    | 77,3                    | 75,7                    | 75,1                    | 75,9                    |
|  | 38 60 75 68 71 61 36 32 | 39 63 75 69 70 61 35 30 | 37 60 74 68 71 64 38 32 | 43 61 73 67 72 63 40 35 | 48 62 76 71 71 68 39 35 | 46 59 76 63 72 65 39 35 | 38 59 74 65 71 61 37 33 | 37 59 75 66 72 65 38 33 | 38 57 74 69 71 68 41 36 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 76,6                    | 76                      | 77,5                    | 76,3                    | 74,2                    | 75,3                    | 76,2                    | 76,5                    | 76,9                    |
|  | 37 59 75 65 68 61 35 34 | 38 64 76 68 66 60 36 34 | 41 60 76 65 68 63 36 34 | 41 59 76 68 68 62 37 35 | 47 61 73 70 68 66 37 36 | 40 59 77 69 69 67 39 35 | 55 60 77 65 69 61 37 34 | 41 51 75 71 70 68 41 31 | 48 61 76 70 72 69 39 36 |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas hacia arriba en el eje vertical en presencia de la concha.  | 77,3                    | 77,3                    | 78,9                    | 76,6                    | 76,8                    | 77,6                    | 76,1                    | 75,5                    | 75,1                    |
|  | 46 58 74 71 73 68 44 35 | 41 54 71 73 69 64 45 35 | 39 57 74 70 73 68 44 38 | 41 57 71 70 71 68 42 35 | 42 52 74 74 72 67 39 30 | 38 56 73 73 70 68 41 33 | 39 50 74 70 71 68 40 33 | 40 57 74 70 72 68 43 36 | 37 56 75 71 70 63 37 28 |

**Fuente:** elaboración propia.

**Anexo 8.** Resultados de los experimentos con la generación de estilos musicales, específicamente música popular cubana.

| Popular cubana   | P1  | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   | P9   |
|--|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en presencia de la concha.  | 77  | 78,8 | 76,9 | 77,9 | 77,7 | 77,7 | 75,2 | 75,1 | 76   |
|  | 50 75 73 69 68 63 49 45 44 62 76 75 67 60 41 39 41 62 75 72 70 61 42 36 46 63 74 70 70 63 44 37 48 69 74 74 70 61 43 36 49 64 75 71 72 63 46 37 48 63 73 72 69 61 42 35 42 61 74 69 60 38 34 48 68 74 70 72 66 44 37    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia en ausencia de la concha.   | 76,5  | 76,5 | 76,6 | 77,4 | 77   | 76,5 | 78,5 | 77   | 77,4 |
|  | 49 60 75 68 69 60 43 37 46 58 75 74 64 56 43 34 48 65 75 75 69 60 43 35 49 62 79 72 65 60 41 34 50 62 76 71 66 58 39 33 48 63 74 76 66 62 48 39 44 60 77 73 66 61 47 39 54 67 74 74 65 59 40 33 49 62 77 71 71 64 47 38 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el exterior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 77,2  | 75,8 | 76,8 | 76,4 | 76,1 | 78,7 | 75,1 | 76,5 | 73,6 |
|  | 46 70 74 73 71 63 43 34 41 59 74 77 67 59 36 28 47 59 73 72 63 56 40 37 45 65 76 74 71 63 44 36 41 64 76 72 67 61 40 32 45 65 75 70 74 63 43 35 53 65 67 74 62 58 41 37 43 65 76 69 68 61 40 33 44 62 76 71 65 60 39 35 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas 30 grados hacia el interior en el eje horizontal en presencia de la concha. | 77,8  | 78,1 | 76,7 | 78,1 | 76,6 | 76,6 | 76,3 | 75,4 | 75,9 |
|  | 50 60 79 71 68 59 44 36 47 58 74 76 68 58 38 32 44 57 74 75 70 62 46 36 51 67 73 74 71 61 44 40 46 64 74 74 67 59 42 35 47 64 77 73 71 61 43 34 47 59 75 76 71 63 47 37 49 60 76 71 70 60 44 36 49 60 77 71 70 61 44 37 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en presencia de la concha.   | 77,3  | 77,4 | 77,6 | 77,9 | 77,2 | 78   | 75,4 | 75,7 | 74   |
|  | 50 72 77 70 71 65 45 36 47 69 77 73 69 62 42 35 51 69 77 72 71 65 44 37 50 64 76 70 70 65 45 37 42 60 76 76 70 61 39 33 49 68 73 77 70 63 47 37 43 61 75 73 69 59 41 33 43 66 78 68 70 63 40 32 46 64 74 65 70 63 42 35 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente hacia la zona de la audiencia en ausencia de la concha.  | 76,9  | 76,1 | 76,4 | 75,1 | 75,6 | 75,7 | 76,7 | 77   | 76,6 |
|  | 48 59 76 72 69 63 47 39 45 62 76 71 70 65 40 36 48 67 75 73 68 65 42 36 47 62 77 68 71 64 47 38 52 60 74 77 66 59 44 36 56 64 73 71 70 59 43 36 45 60 75 74 70 61 43 35 47 65 77 72 70 60 39 36 48 65 76 70 68 65 39 35 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Las dos fuentes dirigidas horizontalmente en sentido contrario a la zona de la audiencia, inclinadas hacia arriba en el eje vertical en presencia de la concha.  | 77,6  | 78,7 | 78,1 | 76,1 | 77,1 | 77,3 | 76,7 | 76   | 76,3 |
|  | 48 66 75 73 71 62 43 36 50 69 73 74 70 62 40 34 39 52 72 76 72 63 48 46 50 65 74 71 72 66 45 38 46 61 74 75 69 60 45 35 51 63 75 69 71 63 46 42 46 58 74 74 67 59 42 34 45 55 72 76 69 61 46 36 46 56 69 76 69 60 42 37 |      |      |      |      |      |      |      |      |

Fuente: elaboración propia

