

OBJECTIUS

El propòsit d'aquest Treball Final de Grau és plasmar certs coneixements, tant teòrics com pràctics, adquirits durant l'etapa estudiantil en el grau d'Enginyeria en Sistemes Audiovisuals. Donat que el marc en el qual s'emmarca aquest treball és l'estudi acústic d'un recinte tancat, es requereix d'una preparació prèvia per a comprendre els conceptes teòrics i procediments que s'utilitzen i com s'empren, mostrant dues aplicacions reals.

La primera aplicació que es proposa en aquest projecte consisteix en estudiar el comportament acústic d'un Home Studio on la seva principal activitat és la mescla de música, i per tant, s'analitza el seu comportament segons el seu cas d'ús. L'objectiu fonamental d'aquest estudi és valorar objectivament el comportament acústic de la sala en vers a la reproducció de música.

El segon cas pràctic que es realitza es basa en l'estudi de les condicions acústiques d'un recinte destinat a la comunicació educativa, el Central Hall de la Universitat de York. En aquest cas, l'objectiu principal és avaluar l'acústica de la sala per a determinar si aquest és adequat per a la transmissió nítida i clara de la paraula.

Per assolir aquests dos objectius i dur a terme una valoració de l'acústica se'n deriva un de nou que consisteix en la implementació del mètode de mesura amb llenguatge de Python, a partir del qual s'obtenen unes mesures de qualitat acústica.

Per últim i no per això menys important, no s'ha d'oblidar l'objectiu de satisfacció personal de realitzar un projecte d'aquestes característiques en un àmbit que suposa un gran interès per a mi.

INTRODUCCIÓ

Quan una font sonora emet un so, el receptor pot rebre el so directe que viatja en línia recta, o el so indirecte provinent de les interaccions produïdes per l'ambient que envolta aquesta font sonora. Normalment, es percep el so de les dues maneres, tant el so directe de la font sonora com les reflexions. Aquestes interaccions que es produeixen en la propagació del so venen determinades per diversos fenòmens físics.

La reflexió és un fenomen físic que fa referència al canvi de la direcció de propagació de l'ona quan aquesta entra en contacte amb una superfície de separació llisa entre dos medis, tornant al medi del qual prové. Quan una ona sonora interactua amb una superfície plana, l'ona sonora es reflectada degut a que la superfície és suficientment gran en comparació a la longitud d'ona. Com el rang audible és ampli, és lògic pensar que el fenomen de la reflexió no actua de la mateixa manera en baixes que en altes freqüències. Les longituds d'ones a baixes freqüències són molt grans i són capaces d'envoltar els objectes, en canvi, les longituds d'ones d'altres freqüències no envolten els objectes i produeixen ombres acústiques a la part posterior i rebots a la part frontal.

La refracció consisteix en un canvi de direcció en la propagació de l'ona sonora quan aquesta passa d'un medi a un altre i només es produeix quan l'ona sonora incideix de manera obliqua sobre la superfície que separa els dos medis. La refracció es deu a què al canviar de medi, la velocitat de propagació de l'ona sonora canvia. Ara bé, aquest fenomen pot produir-se dins d'un mateix medi quan les característiques dins d'aquest no son homogènees.

La difracció descriu tant un canvi de direcció en la propagació de l'ona sonora com una dispersió del so quan es troba amb un obstacle que no li és transparent per a la longitud d'ona. Com en la reflexió, les freqüències baixes tenen una major capacitat per envoltar l'obstacle que no pas freqüències altes,

degut al tamany de les seves longitud d'ones. Per tant, la quantitat de difracció es directament proporcional a la longitud d'ona.

Quan una ona de pressió sonora interactua amb una superfície, part de l'energia del so es reflexa cap a l'interior de la sala i una altra incideix en la superfície. Aquesta energia incident o bé es refractada i transmesa, o bé es absorbida pel material. Es defineix l'absorció com un fenomen físic que consisteix en la transformació de l'energia sonora en altres formes d'energia, generalment calorífica. Per tant, aquesta és un tipus de pèrdua que experimenta el so en la seva transmissió.

La difusió és l'efecte de disseminar l'energia acústica que incideix sobre una superfície en l'espai i en el temps [18]. Aquest fenomen es produeix quan l'ona sonora interactua amb una superfície que presenta alguna mena de rugositat, produint-se així una ona reflexada en totes les direccions. La difusió sonora contribueix a la creació d'un so envoltant i, per tant, incrementa la sensació d'espacialitat de la sala, degut a que la dispersió d'energia arriba a l'oient des de totes les direccions. Quan el so directe emès per una font sonora interactua amb les reflexions especulars es produeixen una sèrie d'interferències,

Quan dues o varies ones sonores es propaguen en un mateix espai o medi ocasionen una interacció entre elles. Quan aquestes ones viatgen en un medi lineal, homogeni i isòtrop, és a dir, les seves propietats no depenen de la direcció, s'aplica el principi de superposició d'ones. El principi de superposició d'ones enuncia que quan dues o més ones del mateix tipus es propaguen i incideixen en un mateix punt de l'espai, l'amplitud resultant en aquest punt és igual al vector suma de les amplituds de cada ona individual. Si dues ones de la mateixa freqüència interactuen i estan en fase, aleshores l'amplitud resultant és la suma de les amplituds individuals, obtenint així una ona resultant de major amplitud que les inicials, el que es coneix com a interferència constructiva. Per altra banda si es troben dues ones amb la mateixa freqüència però amb una diferència de fase de π , aleshores l'amplitud de l'ona resultant és igual a la diferència entre les amplituds individuals, obtenint així una ona resultant de menor amplitud que les inicials, denominant-se interferència destructiva.

CAMP LLIURE VS CAMP REVERBERANT

Sota unes certes condicions es poden experimentar idees recreant els extrems on no hi hagi presència de reflexions i només es propaga el so directe, el qual rep el nom de camp lliure, i per altra banda un camp acústic que només té present el so reflectit i no s'observa el so directe, denominat camp reverberant.

El camp lliure es defineix com una situació acústica on tot el so que rep un oient és a través del so directe de la font sonora sense cap influència de les reflexions. Aquesta situació es dona a la natura en espais a l'aire lliure suficientment elevats que eviten l'efecte de les reflexions del terra. També, es pot crear un espai artificial utilitzant material absorbent en les parets, sostre i sòl, el qual es coneix com una cambra anecoica. En diversos camps de la mesura acústica aquesta situació és molt usada degut a que els resultats només són influenciats pel so de la font sonora emissora, i no per les reflexions de la sala que poden provocar distorsions en les mesures.

En canvi, el camp reverberant o camp difús es considera un camp acústic on l'energia acústica és uniforme en l'espai, és a dir, el camp sonor es considera homogeni. En qualsevol punt d'aquest espai es percep el so provinent de totes les direccions amb la mateixa magnitud i probabilitat. Aquesta situació es pot aproximar amb una cambra de reverberació que consisteix en un espai tancat dissenyat amb parets obliqües reflectants. Aquesta obliqüitat provoca que les ones sonores es reflecteixin el màxim nombre de vegades i d'aquesta manera es crea el camp difús. El camp

reverberant és un concepte molt útil que permet fer simplificacions en certes mesures acústiques i fer prediccions en l'aïllament de sales.

Aquests dos camps acústics introdueixen el concepte de distància crítica que mesura la distància de la font sonora on l'energia del camp lliure i el camp reverberant són iguals. Com més reverberant sigui el recinte o sala, més propera és la distància crítica de la font emissora. Anàlogament, com més absorbent sigui la sala, la distància crítica s'allunya de la font sonora. Aquesta distància depèn tant de la geometria com l'absorció de la sala on es propaga l'ona sonora, així com de la dimensió i la forma de la font sonora emissora.

ACÚSTICA ARQUITECTÒNICA

El camp relacionat amb l'acústica és un terreny força ampli que inclou varies àrees. En el nostre cas, l'acústica arquitectònica és l'àmbit que ens interessa ja que l'acústica arquitectònica estudia els fenòmens relacionats amb una propagació adequada i adient segons la funció del recinte o sala.

Aquest camp tracta dos temes diferents que es corresponen amb l'aïllament acústic i l'acondicionament acústic. Cal diferenciar aquests dos, essent l'objectiu del primer l'eliminació o atenuació tant de sons indesejables produïts dins del recinte com la intrusió de sorolls aliens al local. En canvi, l'acondicionament acústic consisteix en distribuir el so de tal manera que es garanteix la qualitat i la intel·ligibilitat de la paraula evitant problemes acústics, àmbit en el qual es centra aquest treball. Existeixen tres teories diferents que ens permeten estudiar l'acústica arquitectònica, que són la teoria estadística, la teoria geomètrica i la teoria ondulatòria.

La teoria geomètrica es basa en la hipòtesi que si les dimensions del recinte o sala són molt grans en comparació amb la longitud d'ona de l'ona sonora, aleshores es pot tractar la qüestió d'igual manera amb què s'analitza la llum, és a dir, mitjançant raigs. El fet d'assumir la propagació de l'ona com a un raig sonor, considera que les reflexions que aquests tenen sobre les diverses superfícies són especulars, i per tant, verifiquen la llei de reflexió explicada anteriorment. Per la pròpia definició, la teoria geomètrica es pot utilitzar per a estudiar i analitzar acústicament recintes a freqüències on la longitud d'ona és petita en comparació a les dimensions del local, mentre que per a longitud d'ones d'una magnitud semblant a les dimensions del local s'ha d'utilitzar el concepte de mode de ressonància, el qual ens porta a la definició de la següent teoria de l'acústica arquitectònica, que és la teoria ondulatòria.

La teoria ondulatòria es basa en una sèrie de mètodes que permeten estudiar la naturalesa ondulatòria del so a partir de la resolució numèrica de l'equació d'ona general. Quan una font emissora emet una ona sonora dins un recinte tancat, si la distància entre dos superfícies paral·leles és igual a la longitud d'ona d'una determinada freqüència es crea una ona estacionària. Es defineix el concepte d'ona estacionària com una ona formada pel fenomen d'interferència de dues ones amb la mateixa amplitud i longitud d'ona o freqüència que es propaguen en oposadament a través d'un medi. Aquesta ona, també coneguda com a mode propi, roman estacionària reflexant-se entre les dos superfícies paral·leles, disminuint lentament la seva energia acústica a cada interacció amb la superfície.

La última teoria de l'acústica arquitectònica es correspon amb la teoria estadística. Aquesta teoria estudia el comportament de l'energia acústica en un recinte o sala, proporcionant mesures qualitatives per a detectar problemes acústics que aquesta ocasioni. La teoria estadística fa ús de models matemàtics que plantegen l'extinció del so en un recinte des d'un punt de vista estadístic, els quals per a que aquests tinguin validesa han de garantir uns determinats criteris i assumpcions. El primer criteri que requereix la teoria estadística és disposar d'un camp acústic uniforme en la sala.

D'aquesta manera l'arribada de les ones sonores a cada punt és equiprobable, i per tant, es pot assumir un camp difús sonor com s'ha explicat en apartats anteriors. L'assumpció d'un camp sonor difús converteix aquesta teoria com una aproximació, ja que aquesta situació es dona en poques ocasions. També enuncia que les dimensions de la sala han de ser superiors a la longitud d'ona, fent-la una teoria adient per a freqüències mitjanes i altes. Una altra premisa és el fet que els coeficients d'absorció de les superfícies i objectes que conformen el recinte han de tenir valors semblants. Per últim, es destaca que els resultats obtinguts han de ser considerats una aproximació de valors promig, i no instantànis, del comportament acústic de la sala en punts situats suficientment allunyats de les parets que delimiten l'espai. Aquesta proporciona la predicció de certs paràmetres acústics amb els quals s'obté una simulació acústica de l'espai.

MÈTODE DE MESURA

Un cop vistos els conceptes principals que intervenen en la propagació del so podem explicar quin ha estat el mètode de mesura que s'ha utilitzat per estudiar acústicament les sales. El mètode compte de quatre elements importants que són el senyal d'excitació, el filtre invers, la deconvolució i els paràmetres acústics, els quals s'explicaquen a continuació.

DECONVOLUCIÓ

Assumint la immobilitat de l'emissor i el receptor, el recinte acústic o sala en el qual estan immersos es pot considerar com un sistema lineal i invariant en el temps caracteritzat per la seva resposta a l'impuls $h(t)$. Com el seu propi nom indica es defineix la resposta a l'impuls com el senyal de sortida d'un sistema quan s'ha excitat amb un senyal d'entrada corresponent a un impuls. El fet d'utilitzar com a senyal d'entrada un impuls fa que totes les propietats d'un sistema LTI estiguin presents en la seva resposta i es pot emprar per a descriure el sistema LTI i predir la sortida per a qualsevol senyal d'entrada.

En l'àmbit de l'acústica, la mesura de la resposta a l'impuls és un afer important ja que a partir d'aquesta es poden descriure paràmetres acústics que són de gran rellevància. Un mètode habitual per a mesurar-la consisteix en aplicar un senyal d'excitació conegut a l'entrada del sistema reproduint-lo a través d'un sistema acústic $h(t)$, que es correspon amb el recinte acústic, i capturant-lo obtenim el senyal mesurat $y(t)$. Per obtenir la resposta impulsional del sistema acústic $h(t)$ s'ha d'aplicar una tècnica de deconvolució entre senyal mesurat i el senyal d'excitació. Aquesta operació de deconvolució consisteix en aplicar una convolució lineal del senyal de sortida $y(t)$ amb el filtre invers $f(t)$ pre-processat del senyal d'excitació.

ESCOMBRAT FREQUÈNCIAL

El fet de determinar el senyal d'excitació facilita el càlcul de la resposta impulsional. En aquest treball s'ha utilitzat l'escombrat freqüencial ja que més efectiu i eficient per al càlcul de respostes a l'impuls. Per a fer l'escombrat s'utilitza una funció sinusoidal o to pur que incrementa la seva freqüència amb el temps, anant aquesta de freqüències baixes a altes. Aquest escombrat es pot fer de manera lineal o logarítmica, tot i que la més utilitzada és la logarítmica perquè fa possible proporcionar més energia a la zona crítica, és a dir, a baixes freqüències i anar més ràpid a alta freqüència.

Un dels avantatges que ens proporciona aquest senyal d'excitació és que el seu senyal invers es correspon amb el propi senyal d'excitació però invertit sobre l'eix temporal. Un altre punt a favor és el fet que aquest senyal permet excitar només una freqüència alhora, a diferència d'altres senyals d'excitació com el soroll o l'impuls on totes les freqüències són excitades simultàniament i l'energia es distribueix uniformement en tot l'ample de banda. El fet d'excitar només una freqüència permet

concentrar tota l'energia del senyal en un ample de banda estret, i tanmateix aconseguir una millor relació senyal soroll millor amb la mateixa quantitat d'energia a canvi d'un alt cost computacional. L'eficiència computacional d'aquesta tècnica és inferior en vers a les tècniques descrites anteriorment. D'altra banda, amb aquest senyal d'excitació existeix la possibilitat d'analitzar una única finestra temporal i ignorar els efectes de les reflexions i modes normals analitzant només el so directe com si fós una sala anecoica.

EL FILTRE INVERS

Com hem vist, la deconvolució de la resposta d'impuls requereix la creació d'un filtre invers $f(t)$. El filtre invers $f(t)$ es genera tenint en compte quin és el senyal d'excitació. En el nostre cas utilitzem el sweep logarítmic el qual és un senyal estable i causal, és a dir, depèn només dels valors presents i passats de l'entrada, no de futurs valors. Aquest filtre es dissenya mitjançant un sweep logarítmic invertit temporalment, retardat per obtenir un senyal causal i amb una modulació de l'amplitud per compensar la caiguda espectral de 6dB/oct del senyal d'excitació. Aquesta correcció d'amplitud es pot obtenir matemàticament a partir de la fórmula del sweep logarítmic arribant a aquesta expressió.

TEMPS DE REVERBERACIÓ

L'obtenció de la resposta impulsional permet calcular unes certes mesures objectives mitjançant uns paràmetres acústics.

En un recinte acústic tancat aquest so emès interactua repetidament amb les superfícies reflectants del recinte causant nombroses reflexions que decauen la seva energia a mesura que el so és absorbit per la superfície dels objectes de l'espai, obtenint així una ona resultant amb menys energia. Quan aquestes reflexions es barregen entre elles es produeix el fenomen de la reverberació, que es defineix com un efecte acústic que consisteix en la persistència del so després que aquest sigui produït. El paràmetre del temps de reverberació és una mesura del temps que es requereix per un so reflectit a decaure una determinada quantitat d'energia sonora respecte un nivell inicial en un recinte després que la font emissora del so el deixa d'emetre. El temps de reverberació depèn tant de la freqüència, on acostuma a tenir un valor major a freqüències baixes, com de la posició en la qual es pren la mesura en el recinte. Per això, comunament s'expressa com un sol valor.

El físic americà Wallace Clement Sabine va desenvolupar una equació per a calcular el temps de reverberació d'una sala que afirma l'existència d'una relació entre la qualitat de l'acústica, les dimensions de la sala i la quantitat de superfície absorbent present.

Anys després el físic acústic mexicà Carl Ferdinand Eyring afina l'equació proposada per Sabine per a casos on el valor del coeficient d'absorció és major a 0.2.

En el cas del RT60, com hem dit anteriorment, el temps es correspon amb què tarda el senyal en disminuir 60dB per sota el senyal original. Generalment és difícil generar un so suficient a la sala per a mesurar una caiguda de 60dB, especialment a baixes freqüències. Aleshores, si es té en compte l'assumpció que enuncia que el decaïment es produeix de manera exponencial, és a dir, que el nivell del so disminueix regularment amb un ratio de tants dB per segon, és suficient amb mesurar una caiguda de decibels menor i factoritzar per obtenir la caiguda corresponent a 60dB.

RT60 A PARTIR DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL

El paràmetre acústic del temps de reverberació RT60 es pot obtenir mitjançant les fórmules plantejades anteriorment. Ara bé, en aquest projecte s'obté el valor d'aquest indicador a través de la resposta impulsional $h(t)$.

Per a extreure el paràmetre acústic del temps de reverberació el primer que cal fer és filtrar la resposta a l'impuls $h(t)$ en bandes de freqüència. Això es degut a que el temps de reverberació varia en funció de la freqüència a la qual es mesura i la posició en què es pren dins la sala. Tot i que s'assumeix el fet que el camp sonor és difús i que el decaïment del so és el mateix en cada posició de la sala, s'ha de considerar la dependència respecte les bandes freqüencials. L'espectre audible d'àudio en éssers humans va desde 20Hz a 20kHz, per tant, si fem ús de filtres d'octava el podem dividir en 11 bandes d'octaves, o bé en 31 bandes si utilitzem filtres d'un terç d'octava. En quant al tipus de filtre el més utilitzat és el filtre de Butterworth de tercer ordre, el qual otorga una resposta en freqüència plana i una caiguda de 18dB per octava.

Obtinguda la resposta impulsional filtrada $h_f(t)$ el següent pas és suavitzar aquest senyal el màxim possible abans de convertir-lo a l'escala logarítmica. Per a fer això s'utilitza la Transformada de Hilbert H , la qual és una eina matemàtica per descriure l'envolvent complexa d'un senyal modulat per una portadora real. L'objectiu d'aplicar aquesta transformada és crear un senyal analític complex. En el nostre cas només estem interessats en l'envolvent del senyal, que es correspon amb la magnitud del senyal analític.

Tot i haver suavitzat la resposta impulsional cal una darrera suavització del senyal. En aquest cas es fa ús dels filtres de mitjana mòbil o moving average filters en anglès. Aquests són un filtre passa baix de resposta impulsional finita que agafen L mostres del senyal d'entrada, calculen la mitjana d'aquestes L mostres i produeixen una única mostra de sortida. Es defineix l'equació discreta d'un filtre de mitjana mòbil de L mostres amb un vector d'entrada x i el vector de sortida y com. Anàlogament la resposta en freqüència d'un filtre de mitjana mòbil s'expressa de la següent manera.

Un cop hem filtrat el senyal $h_f(t)$ amb el filtre de mitjana mòbil amb una finestra de L samples, es procedeix a passar a escala logarítmica el senyal $A(t)$ convertint-lo així en una corba d'energia $E(t)$. El següent pas consisteix en aplicar el mètode d'Integració de Schroeder a l'envolvent per a suavitzar i fer més senzills els càlculs. Aquest mètode proporciona una corba que s'obté mitjançant la integració endarrere del quadrat de la resposta impulsional. D'aquesta manera ens proporciona una corba de decaïment plana. Aleshores, per a fer el càlcul del paràmetre acústic del temps de reverberació es necessari realitzar una interpolació lineal entre la corba de decaïment obtinguda amb l'integració de Schroeder i la funció lineal $L = A \cdot t + B$ en el rang que es vulgui calcular segons el paràmetre. Com s'ha explicat en apartats anteriors no és possible tenir un rang dinàmic de 60dB, per tant, el rang en què es fa la interpolació és limitat i s'extrapola el resultat. Un cop feta aquesta regressió lineal, es pot calcular el temps de reverberació fent ús del gradient d'aquesta línia i utilitzant la següent expressió matemàtica.

PARÀMETRES ACÚSTICS

Existeixen dos paràmetres acústics que es poden definir a partir del temps de reverberació que es corresponen amb la calidesa acústica i la brillantor.

La calidesa acústica (BR) representa tant la riquesa a freqüències baixes com la sensació subjectiva de calidesa i suavitat del so d'una sala. Aquesta s'expressa com **la relació entre els temps de reverberació a baixes freqüències (125-250Hz) i els temps de reverberació a freqüències**

mitjanes (500-1000Hz). Un valor adequat de calidesa acústica per a sales on la principal activitat és la parla oscila entre 0,9 i 1, i per a sales musicals entre 1 i 1,3

El paràmetre de la brillantor (Br) fa referència al comportament de les freqüències agudes d'una sala. Aquest serveix com un indicatiu en base a que el so dins la sala és clar i ric amb harmònics. La brillantor (Br) d'una sala es defineix com la **relació entre la suma dels temps de reverberació corresponents a freqüències altes (2kHz-4kHz) i el temps de reverberació a freqüències mitjanes (500Hz-1kHz)**. Existeixen diverses opinions sobre els valors òptims de la brillantor (Br). L.L. Beranek considera una sala amb valor de brillantor adequat si aquest és superior a 0,88. En canvi, H.Arau menciona que un valor considera un valor correcte si aquest és major a 0,80.

L'índex de claredat (C50) és un paràmetre acústic relacionat amb la claredat de la intel·ligibilitat de la paraula. Un dels marcs en què s'ubica aquest treball és l'estudi d'un recinte destinat a l'educació, i per tant, és imprescindible la comprensió correcta dels missatges orals i d'aquí la importància d'aquest indicador. El principi en el que es basa l'índex de claredat C50 és el fet que a partir d'un cert límit de temps les reflexions contribueixen negativament a la comprensió de la paraula. Això es degut a que causen una interacció amb la paraula fent que aquesta no sigui clara per al receptor. Malgrat això, si les reflexions no excedeixen aquest límit, aquestes produeixen una contribució positiva a la intel·ligibilitat. Aquest límit de temps que separa les reflexions que contribueixen de manera positiva de les negatives és aproximadament 50ms. El C50 es calcula per bandes de freqüències, generalment entre 125Hz i 4kHz, i s'expressa en dB. Es considera que un valor adequat per a garantir una bona intel·ligibilitat de la paraula ha de ser major a 2dB. **L'índex de claredat es mesura la relació de l'energia del so que arriba abans del límit de temps i l'energia del so que arriba posterior a aquest.**

La definició de la veu (D50) és una mesura semblant a l'índex de claredat C50 que indica la intel·ligibilitat i la sonoritat de la paraula. Aquesta s'expressa amb % i es mesura per cada banda de freqüències entre 125Hz i 4kHz. Es defineix la definició de la veu D50 com **la relació entre l'energia dels primers 50ms i el total d'energia de la resposta a l'impuls**. Un valor que es considera adequat per a la definició de la veu D50 en una sala, la qual la seva principal activitat és la comunicació oral, ha de ser superior a 0.5. Ara bé, H. Arau per a una sala de concerts proposa un valor de 0,65. A més, existeix una relació entre el paràmetre acústic de l'índex de claredat C50 i la definició de la veu D50 que facilita el càlcul d'un dels paràmetres si es coneix la informació de l'altre.

La claredat musical (C80) és un paràmetre rellevant per a mantenir una certa intel·ligibilitat de la música, especialment quan aquesta mostra passatges musicals ràpids. Un dels objectius d'aquest treball consisteix en l'estudi d'un recinte on la principal activitat és la mescla musical, per tant, és essencial la comprensió correcta dels diversos sons que componen la peça musical. Aquest paràmetre de la claredat musical C80 s'utilitza per a valorar el grau de separació entre els sons individuals que integren una composició musical. Es calcula per bandes de freqüències, generalment entre 125Hz i 4kHz, i s'expressa en dB. L'índex de claredat musical C80 **es defineix com 10 vegades el logaritme del quocient entre l'energia sonora que rep l'oient dins la sala durant els primers 80ms des de l'arribada del so directe i l'energia que arriba posteriorment**. Existeixen diversos valors recomanats per a aquest paràmetre a partir dels quals es considera un bon indicador de l'acústica musical d'una sala, L. Gerald Marshall, en funció del tipus de música, recomana diferents valors en l'índex de claredat musical, essent d'un valor de -8 a -2 per a música amb òrgans, de -2 a 2 per a música simfònica, de 2 a 6 en quant a opera, i major a 6 per a instruments electrònics, la qual es correspon amb l'activitat majoritària que es desenvolupa en el nostre cas.

Un dels factors més importants per a la intel·ligibilitat de la paraula és l'energia acústica que rep el receptor. Generalment, les consonants tenen menor energia que les vocals, fent que les consonants exerceixin un paper més important en la intel·ligibilitat d'un missatge que no pas els símbols vocal. Existeix un paràmetre acústic que mesura el percentatge de consonants que no són enteses pels oients d'una sala anomenat Pèrdua de l'Articulació de les Consonants (%ALCons). La Pèrdua de l'Articulació de les Consonants %ALCons està directament relacionat amb el temps de reverberació RT i de la diferència entre els nivells de pressió sonora del camp directe i del camp reverberant. Aquest paràmetre s'expressa en % i, normalment, es calcula a la banda dels 2kHz al ser la més important per a la intel·ligibilitat. Aquest paràmetre al ser indicatiu de pèrdua, a major valor pitjor serà la intel·ligibilitat, i viceversa.

En la teoria ondulatoria hem vist el mode propi, que roman estacionari reflexant-se entre les dos superfícies paral·leles, disminuint lentament la seva energia acústica a cada interacció amb la superfície. El nombre de modes propis és il·limitat i per a cada un d'aquest s'associa una determinada freqüència pròpia que es caracteritza per un nivell de pressió sonora. Aquestes freqüències pròpies associades als modes propis depenen de la geometria i de les dimensions del recinte, i generalment, el seu càlcul resulta complex. Ara bé, quan es tracta de sales o recintes paral·lelepípedes es poden calcular amb la fórmula següent. Aquests modes propis es diferencien en tres tipus, que es corresponen amb els modes axials, tangencials i oblics. Els modes axials són aquells que provenen de la interacció entre dues superfícies, els tangencials els que interactuen amb quatre superfícies i els oblics amb les sis superfícies de la sala. Es consideren significatius aquells modes propis per a freqüències inferiors a 300 cicles per segons, és a dir, freqüències inferiors a 300Hz. Principalment, els modes axials són els importants per a l'estudi ja que aquest són els que proporcionen més energia acústica, seguits dels modes tangencials que ocasionen -3dB d'energia sonora respecte els axials, i per últim, els oblics aporten -6dB d'energia acústica, essent els menys significatius.

El físic americà Richard H. Bolt va establir un criteri per a predir la distribució òptima dels modes propis en funció de les dimensions d'un recinte rectangular. Bolt va fonamentar un àmbit de proporcions recomanables per a sales rectangulars amb un volum petit o mitjà, on les relacions de les dimensions situades a l'interior de l'àrea proposada proporcionen una bona distribució nodal.

DIMENSIONS DE LA SALA

Abans de realitzar les mesures dels diversos paràmetres acústics del recinte o sala, normalment, es dur a terme una simulació teòrica de l'espai per a predir quin serà el comportament d'aquesta en vers a la propagació del so. Mitjançant aquesta simulació s'obté una primera impressió de quina serà l'actuació acústica de la sala i d'aquesta manera es poden prendre mesures a priori. Per a fer la simulació teòrica s'ha de tenir en compte com és l'espai que es vol estudiar perquè aquest condiciona principalment l'acústica del recinte. La sala en què es centra aquest estudi està formada per quatre parets de guix que conformen una habitació amb unes dimensions de 2.32m d'alçada, 2.63m de llarg i 2.28m d'ample. La paret trasera conté una porta de fusta de 2.10m d'alçada i 88.5cm d'ample. Una de les parets laterals inclou tant una finestra de dimensions 1.53m d'alçada i 1.31m d'amplada com un radiador de 47.7cm d'ample, 56.6cm d'alçada i 9.5cm de grossor ubicat sota la finestra. Per últim, hi ha quinze panells absorbents d'escuma acústica envoltats per quatre llistons de fusta situats en la paret frontal. Cada un d'aquests panells absorbents té unes dimensions de 30 cm d'amplada i alçada i 5 cm de profunditat. Els llistons tenen una alçada de 4.3cm i 5.4cm de grossor, mentre que hi ha dues llargades diferents, essent la primera de 89.5cm i l'altre de 159cm. Un cop conegut l'espai a analitzar, cal conèixer els coeficients d'absorció de cada un dels materials que conformen el mobiliari de l'habitació. Tenint en compte la superfície formada per a cada un d'aquests materials en la sala i els seus corresponents coeficients, es pot realitzar una simulació tant del paràmetre del temps de

reverberació com el coeficient d'absorció mig. Per al càlcul del temps de reverberació s'ha utilitzat la fórmula de Sabine degut a què, generalment, els coeficients d'absorció són inferiors a 0.2. A més, s'ha estimat una velocitat del so a una temperatura de 20°C fent-lo el més aproximat a les condicions atmosfèriques en què es duen a terme les gravacions. En la descripció del temps de reverberació es fa referència a expressar-lo com a un únic valor que prové del promig dels obtinguts, essent aquest 0,84s. L'activitat principal de la sala és la mescla i producció de música electrònica. Es considera un valor òptim del temps de reverberació oscil·la entre 0.2s i 0.5s en funció del tipus de música que es mescla.

PROCEDIMENT

La metodologia que s'ha utilitzat per a l'anàlisi de l'acústica de la sala es basa en la captació de la resposta impulsional i, a partir d'aquesta, determinar els paràmetres acústics explicats anteriorment. Per a dur a terme les mesures s'ha requerit d'un equipament tècnic compost per un PC, una targeta de so Focusrite 2i4, uns altaveu Adam F5 amb una directivitat cardioide ja que és l'habitual sistema en la sala, i un micròfon Rode NT1A de patró polar cardioide.

El circuit del senyal d'aquesta cadena s'inicia des del programa Audacity, a través del qual es genera un senyal d'excitació. Degut a les característiques i simplificacions que el senyal escombrat logarítmic aporta, explicades anteriorment en l'apartat teòric, s'ha utilitzat un sweep logarítmic de 7s de duració per excitar un temps adient cada una de les freqüències d'entre 10Hz i 22kHz. Les freqüències inicial i final són superiors a les percebudes per l'espectre humà per evitar les no-linealitats del sistema de reproducció.

Un cop generat el senyal d'excitació s'envia a la sortida de la interfície d'àudio per a ser reproduïda per dos autoamplificats. La situació del parell d'altaveus és l'estàndard proposat per la reproducció estèreo. En aquesta, l'oient experimenta la millor imatge estèreo si la distància entre els altaveus és la mateixa que la distància entre l'oient i cada un dels altaveus, formant un triangle equilàter entre els altaveus i el receptor amb angles de 60°. En aquest estudi els altaveus han estat situats a l'alçada habitual en què es troben sobre la taula, que es correspon amb 0,73m i separats una distància d'1m.

En quan el senyal d'excitació es reproduït pels dos altaveus, el micròfon capta el so i l'envia per un dels canals d'entrada de la interfície d'àudio, que s'enregistrarà al software Audacity. Per a aquest estudi només s'ha tingut en compte una posició d'emissió provinent de dues fonts sonores i un punt de recepció. Aquest es troba a una alçada de 1,20m que es correspon amb l'alçada mitjana d'una persona asseguda.

Un cop realitzades les diverses gravacions, tant amb tot el mobiliari de l'habitació com amb el mínim possible, aquestes es troben enregistrades a l'Audacity. Cal obtenir el filtre invers per a convolucionar-lo amb les gravacions i obtenir així la resposta a l'impuls, i poder estudiar els paràmetres acústics. Anteriorment s'ha explicat la simplicitat d'aquest filtre invers quan el senyal d'excitació és un escombrat logarítmic, essent aquest un sweep logarítmic invertit que es crea amb el propi software de l'Audacity.

Per últim, cal exportar tant el filtre invers com les gravacions captades pel micròfon com arxius d'àudio independents, amb format WAV, per a poder fer el càlcul dels paràmetres mitjançant el codi de Python implementat. La finalitat del codi de Python és fer el càlcul dels paràmetres acústics a partir de la resposta impulsional de la sala. Aquesta resposta impulsional s'obté aplicant el procés de deconvolució explicat en l'apartat teòric del treball. Aleshores, mitjançant la resposta impulsional s'aplica el còmput de cada un dels paràmetres especificats anteriorment per a valorar objectivament l'acústica del recinte.

RESULTATS

Per a analitzar cada un dels paràmetres per separat, les dades obtingudes han estat recollides en un full de càlcul Excel. Els valors obtinguts es diferencien segons si aquests s'han obtingut amb el mínim mobiliari possible o amb la sala amoblada. Per a fer aquesta diferenciació notable els gràfics mostren els resultats de les dades obtingudes amb el mínim mobiliari amb color blau, mentre que les dades amb el mobiliari habitual estan representades amb el color vermell. Cada un dels paràmetres acústics a valorar es presenten en bandes d'octava de 125Hz a 4kHz, expressant-los així de la manera habitual en estudis acústics.

RT60

- el més comú i representatiu
- La sala sense mobiliari és superior a l'obtingut amb el mobiliari habitual.
- RT a baixes freqüències, 125Hz i 250Hz, és major que a freqüències mitjanes i altes
- sala sense mobiliari, diferència baixes i altes freqüències és més notable, sent el doble
- sala moblada, resposta plana i major a freqüències baixes
- simulació, baixes similar a sala moblada i altes superiors a no mobiliari
- disparitat no mobiliari perquè no té en compte teoria ondulatoria
- òptim 0,2-0,5
- sala no mobiliari, cap dins el rang
- moblada, mitjà i altes dins rang, baixes fora

BR i Br

La sala sense mobiliari proporciona una major calidesa que la sala amoblada, però, en canvi, una menor brillantor. Tot i aquesta superioritat envers a la calidesa acústica, el resultat obtingut per a la sala buida es situa lleugerament per sobre del rang òptim proposat en l'apartat teòric, que és d'entre 1 i 1.3, mentre que la sala amoblada es situa dins el rang. En quant a la brillantor, tots dos valors obtinguts en les diferents situacions de la sala es situen correctament per sobre del valor adequat proposat per H.Arau, el qual enuncia que ha de ser superior a 0.80.

C50

- Indicador de la intel·ligibilitat de la paraula.
- Tot i no ser la parla la principal activitat de la sala aquest és un altre indicador per analitzar l'acústica de la sala.
- Gran diferència de resultats entre ambdues situacions. La sala amoblada presenta un índex de claredat superior en gairebé tot el rang freqüencial estudiat.
- valor òptim superior a 2dB
- la sala amb el mobiliari habitual proporciona una bona intel·ligibilitat de la paraula, sala sense el mobiliari indica una petita dificultat en la claredat de la comprensió del missatge

D50

- paràmetre relacionat amb l'índex de claredat de la veu, similitud observant la tendència
- sense mobiliari són menors que els assolits amb la sala amoblada.
- valor òptim superior a 0.5.

C80

- Gran diferència entre la sala amb i sense mobiliari, tendència d'obtenir un valor menor a les bandes freqüencials extremes.
- música electrònica, superior a 6.
- sense mobles proporciona uns valors entorn al valor proposat, essent lleugerament inferior.
- mobiliari resultats òptims per a la intel·ligibilitat musical, fent possible la diferenciació entre els sons individuals que componen la peça musical.

ALCONS

- mobiliari redueix el seu valor, proporcionant una millor intel·ligibilitat del missatge oral.
- sense mobiliari tendència a disminuir el seu valor a mesura que la freqüència augmenta
- mobiliari valor petit a baixes i estabilitza a 4%
- sense mobiliari mediocre a les bandes d'octava de 125Hz i 500Hz i bona a les bandes d'octava restants.
- mobiliari habitual excel·lents baixes i bona a freqüències mitjanes i altes

BOLT

Observant els resultats obtinguts podem observar com hi ha 12 modes axials, 29 tangencials i 21 oblics. Donat que la presència de modes propis és inevitable, l'objectiu per a preservar una bona intel·ligibilitat tant musical com oral és distribuir-los uniformement de manera que no ocasionin una deficiència en l'escolta.

Tot i la impossibilitat per a redisenyar l'estructura de l'habitació, considerant les dimensions de la sala i, essent la seva forma geomètrica rectangular, s'ha considerat interessant calcular quines haurien de ser les dimensions òptimes tenint el compte el criteri de Bolt. Prenent com a relació de referència el promig proposat per Bolt en la gràfica 1.6 de 1 : 1, 5 : 2.

VALORACIÓ

Un cop hem analitzat els paràmetres acústics de la sala es pot fer una valoració de les condicions acústiques d'aquesta, referint-nos a aquesta quan la conforma tot el mobiliari habitual. L'avaluació de l'acústica de la sala és satisfactòria. A grosso modo tots els paràmetres estudiats proporcionen uns resultats dins dels rangs proposats.

Si bé es cert, a freqüències baixes és on trobem el principals problemes de la sala. Per a freqüències d'entre 125Hz i 250Hz el temps de reverberació és lleugerament superior al recomanat i, tant l'índex de claredat com la definició de la veu, mostren un dèficit en la banda freqüencial més baixa. El temps de reverberació es veu afectat principalment per les dimensions de la sala i les superfícies que la conformen. Per a reduir aquest paràmetre només a freqüències baixes cal reduir l'excés d'energia en aquest rang freqüencial. D'altra banda, per a incrementar els paràmetres referents a la veu, s'ha d'augmentar la quantitat d'energia sonora de les primeres reflexions en vers a les tardies.

PROPOSTES DE MILLORA

Tenint en compte aquestes observacions es proposen una sèrie de millores per a acabar d'ajustar aquests paràmetres acústics i obtenir un millorament acústic. L'objectiu de les propostes serà obtenir un punt d'escolta neutre per a mesclar amb la mínima coloració del so possible. Per a fer-ho, es divideix la sala en dos zones, la zona frontal i la zona posterior. La zona frontal, on estan situats els

altaveus i el punt d'escolta, seria la zona que concentraria més material absorbent, essent així una zona amb una alta absorció. La zona posterior seria la zona situada darrere el punt d'escolta i hauria de ser viva sense gaire tractament acústic.

La primera proposta de millora es centra en la distribució de la sala. Primerament caldria determinar quina serà la zona frontal i posterior. Donat que la zona posterior és preferiblement viva, s'hauria de situar la taula en la pared contrària a on està la finestra, quedant tant la finestra com la porta en la zona posterior de la sala. Aleshores, un cop determinada l'orientació de la paret frontal es colocaria la taula al centre d'aquesta paret, separant-la uns 20cm. El fet de situar la taula centrada a la mateixa distància entre les dues parets laterals fa que la imatge estèreo no es vegi alterada. La col·locació dels monitors i els punt d'escolta no variaria respecte a la distribució actual, formant aquesta un triangle equilàter entre ells. s'hauria de tractar la paret frontal afegint material absorbent darrere dels altaveus, i trampes de greus a les cantonades. D'aquesta manera les freqüències baixes veurien reduïda la seva energia a l'afegir material absorbent específic per a elles. Aleshores, la distribució proposada proporciona que ambdues parets laterals siguin simètriques en la zona frontal. En aquestes, seria necessari col·locar material absorbent a l'alçada de l'orella en aquells punts on estan presents les primeres reflexions de la sala.

Mitjançant aquest nou disseny només hem tingut en compte l'ajustament dels paràmetres acústics però, cal destacar que la presència de modes propis continuen essent existents. El fet que les parets siguin paral·leles provoquen la seva aparició, però la modificació de l'estructura no és factible. Per això, un mètode per a reduir l'afectació dels modes propis d'una sala és augmentar el factor d'amortiment mitjançant materials absorbents que siguin efectius a freqüències baixes. En les parets laterals, caldria desfasar el material absorbent fent que no quedi un davant de l'altre i, d'aquesta manera, s'evitaria la possible aparició d'ecos entre les parets laterals. En quant als modes propis originats entre el sòl de la sala i el sostre es podria afegir material absorbent al sostre, distribuint-lo com un tauler d'escacs, i al terra es colocaria una catifa sota el punt d'escolta. Per últim, els modes propis entre la paret frontal i la posterior ja es veurien tractats amb el material absorbent situat en la paret frontal, i només caldria afegir una cortina a la finestra per absorbir els modes.

PROCEDIMENT

A banda de l'estudi acústic del Home Studio s'ha considerat també realitzar l'estudi d'un recinte destinat a un altre àmbit diferent al musical. La llibreria Creative Commons d'Open Air [49] proporciona la resposta impulsional d'aquest espai i, per tant, possibilita focalitzar l'estudi del comportament acústic en aquest recinte. Com l'activitat principal que es dur a terme en aquesta sala és la realització de conferències i certes classes educatives, les mesures de les respostes impulsionalen proporcionades emulen aquest escenari. Les respostes impulsionalen proporcionades provenen d'unes determinades situacions en l'escenari, el qual situa una font sonora emissora al centre de l'escenari i sis posicions receptores distribuïdes per la zona d'audiència. Aquestes sis posicions divideixen l'espai en quatre àrees d'audiència: posició central plana del recinte, la grada central (3C, 3L), la grada lateral esquerra (1C, 1L) i a l'entrada del recinte (posició 2L). L'alçada de la font emissora està situada a 1.5m del terra de l'escenari, mentre que les posicions de mesura o recepció estan a una alçada de 1.2m simulant la audiència sentada.

En quant al material utilitzat, segons s'especifica, per a fer les mesures s'empra un altaveu Genelec i un micròfon Soundfield amb una orientació frontal al centre de la sala, essent aquesta ortogonal a la grada. Com a senyal d'excitació, de la mateixa manera que en l'estudi acústic del home studio, s'utilitza un escombrat logarítmic. Les característiques del senyal són diferents a les anteriors, tenint un rang freqüencial de 20Hz a 20kHz amb una durada de 15 segons. Aleshores, fent ús d'aquestes

respostes impulsional es poden calcular els paràmetres acústics, de la mateixa manera que el primer cas d'ús, i fer una valoració del comportament acústic del recinte.

RESULTATS

D'igual manera que el cas del Home Studio, les dades obtingudes s'han recollit en un full de càlcul Excel per a tenir una millor visió comparativa dels resultats. En aquest cas, els valors dels paràmetres acústics es diferencien segons si aquest són proposats per la pròpia llibreria Open AIR que subministra les respostes impulsional de la sala, si són els obtinguts mitjançant el mètode implementat en aquest treball, o bé, els calculats per la llibreria "python-acoustics" [50]. El fet d'afegir els resultats obtinguts mitjançant aquesta darrera llibreria és degut a la dissemblança inicial entre els resultats obtinguts amb el mètode d'aquest projecte i les proporcionades per la llibreria Open AIR. D'aquesta manera, una tercera opinió es proposada i analitzada en vers als resultats obtinguts.

RT

- mètode implementat vs Open AIR
- major a freqüències baixes es dona en ambdues mesures
- valor adequat no coneixem el volum del recinte
- 0,7-1,2s sembla força gran, favorables per a una transmissió clara i nítida

C50

- ja s'ha comptat amb els valors obtinguts mitjançant la llibreria "python-acoustics"
- a disparitat en quant als resultats proporcionats
- 125Hz i 250Hz els valors de les tres fonts segueixen el mateix patró
- mètode i Python tendència similar.
- valor superior a 2dB
- Open AIR dèficit de la intel·ligibilitat de la veu
- mètode i "python-acoustics" bon valor d'índex de claredat de la veu per a freqüències mitges i altes, i una falta de comprensió a baixes freqüències. Tot i així, la intel·ligibilitat de la paraula s'associa a freqüències d'entre 1kHz i 4kHz, la sala proporciona unes dades satisfactòries en aquestes bandes freqüencials, fent-la adequada al seu ús principal.

D50

- gran importància
- Open AIR menors situant-se totes les bandes freqüencials per sota del valor mínim de 0,5
- resultats superiors al valor mínim recomanat en totes les bandes freqüencials menys 125Hz

C80

- tendència similar C50
- Open AIR són inferiors
- el patró que segueixen els resultats obtinguts amb els mètodes restants són semblants
- tendència d'augmentar fins 1kHz, disminuir 2kHz i augmentar fins al seu valor màxim als 4kHz
- instrument musical simfònic -2 a 2
- Open AIR dins el rang

VALORACIÓ

l'anàlisi varia en funció de les dades obtingudes per cada un dels mètodes. Fent ús de les dades proporcionades per la llibreria Open AIR, el Central Hall de la Universitat de York mostra una certa deficiència de la sala en vers a la intel·ligibilitat de la paraula. Tant el paràmetre de l'índex de claredat com la definició de la veu es situen per sota del valor llindar idoni per a una bona transmissió comunicativa. Els resultats obtinguts amb el mètode implementat en aquest projecte o els calculats mitjançant la llibreria de "python-acoustics", el recinte del Central Hall de la Universitat de York té una bona resposta acústica en vers a la comunicació oral que es sol produir en aquest recinte.

CONCLUSIÓ

Recordem que el principal objectiu d'aquest treball és la revisió teòrica dels conceptes essencials per a realitzar un estudi acústic d'un recinte, així com visualitzar-ne una aplicació real. Per a validar aquesta teoria, s'ha realitzat un estudi de acústic en dos recintes amb diferents activitats principals, una destinada a l'àmbit musical i l'altre a la comunicació educativa. A partir de la implementació d'un mètode basat en la resposta impulsional s'han pogut obtenir els indicadors de qualitat acústica que determinen el comportament acústic d'un recinte.

Primerament, s'ha fet ús d'aquests conceptes per a estudiar acústicament un Home Studio on la seva principal activitat és la mescla de música electrònica. Vists els resultats obtinguts dels paràmetres acústics, els quals gairebé tots proporcionen un valor dins el rang recomanat, es pot determinar que l'acústica d'aquesta sala és adient per a la seva finalitat primordial.

Seguidament, per a l'estudi realitzat al Central Hall de la Universitat de York, la teoria emprada mostra una diversitat en els resultats en funció del mètode emprat. Tot i aquesta disparitat, la teoria proposada permet realitzar una valoració de l'acústica del recinte. Centrant-nos en els resultats obtinguts mitjançant el mètode implementat en aquest treball, el recinte del Central Hall proporciona un bon comportament acústic per a la transmissió comunicativa de la paraula.

Finalment, després d'haver realitzat els diversos estudis acústics, es pot afirmar que la teoria emprada en aquest treball, no només és vàlida sinó que també és aplicable per a sales amb activitats principals d'ús diferents.

FUTURES LÍNIES DE TREBALL

Un treball de final de grau d'aquestes dimensions contribueix tant a la coneixença de nous conceptes com a la resolució de dubtes sobre la temàtica tractada, però, de la mateixa manera genera nous dubtes o qüestions que originen noves línies de treball.

Com a un treball interessant a realitzar en un futur es planteja el fet d'estudiar alguns dels paràmetres acústics explicats en aquest treball que degut a la mancança de material no s'ha pogut realitzar el seu estudi. Destacar el fet d'estudiar els modes propis del Central Hall de la Universitat de York ja que no ha estat possible conèixer les dimensions del recinte. A més, es podria proporcionar un estudi més precís del comportament acústic d'ambdós recintes mitjançant l'anàlisi d'altres indicadors de qualitat acústica.

El desconeixement de com han estat calculats els valors proporcionats per la llibreria Open AIR ha dificultat la comprensió dels resultats. Per tant, una altra possible línia de treball futur és l'estudi de la diferència significativa entre els resultats proporcionats per la llibreria Open AIR i els obtinguts mitjançant el mètode implementat en aquest treball o els calculats per la llibreria "pythonacoustics".

En aquest treball es plantegen una sèrie de propostes de millora per a l'acondicionament acústic del Home Studio. Per a un futur projecte, seria interessant veure si aquestes propostes de millora són eficaces i ajuden a la propagació del so en aquest recinte.

En cas de voler aprofundir en l'estudi de l'acústica dels recintes, es pot fer ús de noves tècniques d'estudi, com per exemple utilitzar la teoria d'ambisonics. Aquesta permet determinar la localització de la font sonora emissora en un camp sonor. D'aquesta manera s'ubica la situació de les primeres reflexions sonores del recinte i es poden tractar com es degut.