

# esmuc

**Treball Fi de grau**

*De Sabine a Schroeder*

*Emulació d'entorns acústics amb reverberacions algorísmiques*

Estudiant: Jana Blanco i Camps

Especialitat/

Àmbit/Modalitat: Sonologia

Director/a: Josep Maria Comajoncoses Nebot

Curs: 2021-2022

Vistiplau  
del director/a  
del Treball





*Vull agrair al Josep Maria Comajoncoses per guiar-me durant tot el treball i sempre transmetre la seva icònica emoció, il·lusió, passió i dedicació. Agrair també a la meva família i amics per fer-me costat sempre i especialment al Miquel per aguantar com ningú les meves crisis de desesperació.*

## EXTRACT

Dia rere dia els nostres ulls veuen diferents espais, objectes, persones... imatges, al cap i a la fi. Al llarg de la història els humans hem tingut la necessitat de reproduir aquestes imatges, com per exemple pintant, tant de forma realista com de forma abstracte. Doncs el mateix podríem dir de la reverberació, dins la producció musical s'utilitzen reverberacions de forma re-creacionista i realista, com podria ser la gravació en un espai real o l'ús d'una reverberació de convolució; o bé creativament i de forma més abstracte com podria ser el Guernica de Picasso. I per aquesta última només podem utilitzar la reverberació artificial.

Aquest treball, doncs, intentarà, mitjançant una reverberació artificial de collita pròpia programada en Faust, acostar-se a reverberacions d'espais reals mesurades de diferents tipus i avaluar-les i comparar-les amb paràmetres objectius, com la pintura figurativa. El principal problema serà aconseguir apropar-se a aquestes reverberacions a partir de síntesis i el següent problema la tria i l'anàlisi d'aquests paràmetres objectius.

Per tal d'arribar a aquest objectiu el treball farà un recorregut històric de la relació entre la música i la reverberació, les primeres reverberacions artificials i els diferents tipus, tant analògiques com digitals i un repàs del procés de mesura i anàlisi de les reverberacions de referència i el procés de creació, parametrització i anàlisi de les reverberacions artificials a mesurar.

## EXTRACTO

Día tras día nuestros ojos ven diferentes espacios, objetos, personas... imágenes, al fin y al cabo. A lo largo de la historia los humanos hemos tenido la necesidad de reproducir estas imágenes, como por ejemplo pintando, tanto de forma realista como de forma abstracta. Pues lo mismo podríamos decir de la reverberación, en la producción musical se utilizan reverberaciones de forma recreacionista y realista, como podría ser la grabación en un espacio real o el uso de la convolución; o bien creativamente y de forma más abstracta como podría ser el Guernica de Picasso. Y por esta última sólo podemos utilizar la reverberación artificial.

Este trabajo, pues, intentará, mediante una reverberación artificial de cosecha propia programada en Faust, acercarse a reverberaciones de espacios reales medidas de

diferentes tipos y evaluarlas y compararlas con parámetros objetivos, como una pintura figurativa.

El principal problema será conseguir acercarse a estas reverberaciones a partir de síntesis y el siguiente problema la elección y el análisis de estos parámetros objetivos.

Con el fin de llegar a este objetivo el trabajo hará un recorrido histórico de la relación entre la música y la reverberación, las primeras reverberaciones artificiales y los diferentes tipos, tanto analógicas como digitales y un repaso del proceso de medición y análisis de las reverberaciones de referencia y el proceso de creación, parametrización y análisis de las reverberaciones artificiales a medir.

## ABSTRACT

Day after day our eyes see different spaces, objects, people... images after all. Throughout history humans have had the need to reproduce these images, such as painting, both realistically and abstractly. Well, the same can be said of reverberation, in music production reverberations are used in a recreational and realistic way, such as recording in a real space or using a convolution reverberation; or creatively and more abstractly as Picasso's Guernica might be. And for the latter we can only use artificial reverberation.

This work will try to approach the reverberations of measured real spaces of different types with an artificial reverberation programmed with Faust, and evaluate and compare them with objective parameters, like a figurative painting.

In first, the biggest problem will be getting closer to these reverberations with synthesis, and the next problem is the choice and analysis of these objective parameters.

In order to reach this goal, the work will make a historical tour of the relationship between music and reverberation, the first artificial reverberations and the different types, both analog and digital, and a review of the process of measuring and analyzing the reference reverberations and the process of creation, parameterization and analysis of the artificial reverberations to be measured.

# SUMARI

INTRODUCCIÓ.....	1
<b>1 L'ESPAI I LA MÚSICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2 LA REVERBERACIÓ.....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Reverberació des d'un punt tècnic.....</i>	5
2.2 <i>Reverberació artificial.....</i>	9
2.2.1 Analògica.....	9
2.2.1.1 Cambres d'eco .....	9
2.2.1.2 Reverberació de plaques.....	10
2.2.1.3 Reverberació de molles.....	10
2.2.2 Digital .....	11
2.2.2.1 Reverberacions Algorísmiques.....	11
2.2.2.1.1 Acústiques .....	13
2.2.2.1.2 Mecàniques.....	13
2.2.2.1.3 Antinaturals .....	13
2.2.2.1.4 Manfred Schroeder .....	17
2.2.2.1.5 FDN (Feedback Delay Network) .....	19
2.2.2.2 Reverberacions de Convolució.....	21
2.2.2.3 Reverberacions de Modelat Físic.....	22
<b>3 EMULACIÓ D'ENTORNS ACÚSTICS AMB UNA REVERBERACIÓ ALGORÍSMICA.....</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Explicació i procediment .....</i>	23
3.2 <i>Procediment de mesura de les reverberacions reals.....</i>	24
3.3 <i>Caracterització de les reverberacions .....</i>	25
3.4 <i>Implementació de la reverberació algorísmica .....</i>	26
3.4.1 Reflexions primeres (A) .....	28
3.4.2 Difusió (B) .....	29
3.4.3 FDN (C) .....	29
3.5 <i>Parametrització.....</i>	32
3.5.1 Temps de reverberació.....	33
3.5.2 Temps de decaïment de les primeres reflexions .....	33
3.5.3 Claredat per la música .....	34
3.5.4 Temps central.....	35
3.5.5 Brillantor i <i>Bass Ratio</i> .....	36

3.5.6	Densitat d'ecos: creixement i temps de transició entre primeres reflexions i tardanes.....	36
3.5.7	Densitat modal.....	38
3.6	<i>Implementació de la reverberació parametritzada</i> .....	40
3.7	<i>Anàlisi comparativa entre les reverberacions reals i la seva parametrització algorísmica</i> .....	41
3.7.1	Mostra de referència.....	41
3.7.1.1	Anàlisi de les respostes impulsional mesurades .....	42
1.	Passadís de casa.....	42
2.	Sala de cor ESMUC.....	43
3.	Cabina d'estudi ESMUC .....	43
3.7.1.2	Anàlisi de les respostes impulsional sintetitzades .....	44
1.	Passadís de casa artificial.....	44
2.	Sala de cor ESMUC artificial .....	44
3.	Cabina d'estudi ESMUC artificial .....	44
3.7.1.3	Passadís de casa .....	45
3.7.1.4	Sala de Cor .....	46
3.7.1.5	Cabina d'estudi.....	46
3.8	<i>Resultats</i> .....	47
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>ANNEXOS</b> .....	<b>53</b>
6.1	<i>Annex A</i> .....	53
6.1.1.1	Codi de la reverberació sense parametritzar .....	53
6.2	<i>Annex B</i> .....	57
6.2.1.1	Codi de la reverberació parametritzada .....	57
6.3	<i>Annex C</i> .....	60
6.3.1.1	Taula de resultats de l'anàlisi de la reverberació real i artificial del passadís .....	60
6.3.1.2	Taula de resultats de l'anàlisi de les reverberacions reals i artificials de la sala de cor	61
6.3.1.3	Taula de resultats de l'anàlisi de les reverberacions reals i artificials de la cabina	62
	petita	

# INTRODUCCIÓ

La reverberació és un fenomen habitual a la nostra vida, el percebem a qualsevol espai que residim o visitem, i no és tan sols rellevant per escoltar correctament la música sinó que ens transmet informació vital del lloc on ens trobem, de les distàncies entre els objectes i éssers que ens envolten. És un fenomen molt tractat en termes acústics, a l'hora de veure la comoditat dels usuaris en aquell recinte segons la utilitat que aquest tingui, i això ens porta directament a la importància de la reverberació en la música. Aquesta importància té un doble camí, per una part la vessant més física, quines característiques de la reverberació haurien de tenir les sales de concerts, els auditoris o fins i tot les sales d'enregistrament. I per l'altra banda la reverberació artificial com a efecte utilitzat per processar so, on també es tenen en compte quines característiques té aquesta reverberació però amb un altre enfocament i altres formes de descriure-la.

Aquest fet és, justament, la motivació principal d'aquest treball, buscar una de les maneres d'acostar aquests dos camins tan separats que estudien el mateix fenomen i que a mi particularment m'interessen els dos àmbits on es troben independentment. Així doncs l'objectiu principal d'aquest treball és aproximar la reverberació artificial, concretament algorísmica, a les mesures i descriptors acústics de la reverberació amb l'objectiu d'aprofundir més en el procés de mesura acústica, la importància de la reverberació a com percebem el so i l'espai, la metodologia d'anàlisi de reverberació mitjançant respostes impulsional, el procés de programació d'un processador de so amb un llenguatge nou i desconegut, aprofundir també, en les diferents tipologies d'algorismes de reverberació algorísmica

És per tot això que un treball com aquest és rellevant no només en l'àmbit de l'acústica sinó també pels enginyers de postproducció i els dissenyadors de processadors de so digitals.

El llibre "Physical Audio Signal Processing" (Smith, 2010) és la principal referència per dur a terme aquest treball ja que presenta una explicació detallada de tots els processos, algorismes i altres dades molt rellevants a l'hora de dissenyar qualsevol efecte de processament de so. L'apartat de reverberació és de gran interès per aquest treball, on s'expliquen amb tot detall totes les tipologies d'algorismes utilitzades per a la



reverberació al llarg de la història, s'explica detalladament cada un dels elements d'aquests algorismes i com actuen segons la seva posició o funcionalitat. Un altre llibre que ens aporta informació rellevant d'aquest tipus, és el llibre "Designing Audio Effect Plug-ins in C++ with digital audio signal processing theory" (Pirkle, 2013), el qual mostra també diferents tipologies d'algorismes, estratègies, valors de referència, fórmules per adaptar certes dades i exemples de cada un dels processos que explica. Per altre banda, el blog de Valhalla DSP (Costello) també ha estat de gran utilitat per la seva naturalesa informal i les explicacions més generalitzades i aptes per tot el públic, que permeten una suau inserció i introducció en el gran i desconcertant món del disseny de reverberacions, però també amb molta informació rellevant i molt interessant de diferents àmbits, com la filosofia, la història, la biologia, entre d'altres, relacionada amb la reverberació. El manual de REW<sup>1</sup> també és una gran font d'informació a l'hora d'entendre els diferents descriptors utilitzats en les anàlisis acústiques i a com mesurar-los i interpretar-los.

I per últim la reverberació implementada i dissenyada per Geraint Luff descrita al seu article "Let's Write a Reverb"(Luff, s.d.), utilitzada com a model i principal guia per a la implementació de la reverberació algorísmica d'aquest treball.

Com a resultat el treball està dividit en quatre capítols. El primer capítol pretén transmetre una visió històrica, un context i una filosofia entorn de l'espai i la música, que ens servirà com a punt de partida per endinsar-nos a la reverberació. El següent capítol, així doncs, s'endinsarà en la reverberació; què és, quins són els principals descriptors i característiques que la descriuen i finalment quins tipus de reverberacions artificials existeixen, tant "analògics" com digitals. El tercer capítol presenta ja el gruix del treball, on s'explica el procés d'anàlisi de les mesures reals, la implementació de la reverberació algorísmica, la parametrització d'aquesta i finalment els resultats finals del treball. El treball acaba amb les conclusions finals, extretes dels resultats i el procés seguit, aportant una reflexió final de la feina feta, el que s'ha après i algunes idees de possibles utilitats i camins per on seguir investigant.

---

<sup>1</sup> Room Equalizer Wizard: <https://www.roomeqwizard.com/>

# 1 L'ESPAI I LA MÚSICA

Marshall McLuhan, important filòsof canadenc va ser el primer en mencionar el terme *espai acústic* en el seu llibre pòstum. Per a ell, a diferència de l'espai visual - lineal, quantitatiu i geomètric-, l'espai acústic és holístic, qualitatiu i es pot descriure com una esfera, el centre o focus de la qual està a tot arreu alhora i el seu marge no es troba enlloc. (McLuhan & Powers, 1989)

Tot i que McLuhan, tracta l'espai acústic des de la perspectiva de la comunicació, l'espai acústic és un paràmetre més de la música que s'ha de tenir en compte, igual que la melodia, l'harmonia, el ritme o la dinàmica, ja que d'ell en depenen certes pràctiques interpretatives com el tempo, l'estil d'una peça o fins i tot la capacitat d'immersió de l'oient en l'obra. Tot i que recentment amb la invenció dels sistemes estèreo, o la nova producció musical es tingui molt més en compte, des dels inicis la música ha anat acompanyada del seu espai, des de la prehistòria amb les primeres flautes i instruments de percussió a dins de coves, passant pels cants gregorians a les esglésies, fins al barroc amb Mozart tocant a la gran sala del palau de Versalles i en diferents cultures acompanyant rituals com seria el cas de la construcció Chavín de Huántar a Perú. Un exemple clar i canònic d'aquesta importància de l'espai en la música el podem trobar al teatre Festspielhaus de Bayreuth, construït sota la direcció del mateix Wagner per aconseguir l'acústica que s'adaptés de forma òptima a les seves obres. (Beranek, 1996) També en moltes peces del segle XX que basaven les seves músiques en imatges visuals i espais sonors, amb el capdavanter Iannis Xenakis.

Hi ha molts elements que defineixen com sona i com percebem la sonoritat d'una sala o un recinte: ecos o retards, ressonàncies, atenuacions per distàncies, modes o la resposta freqüencial, en són uns quants exemples. Tots ells venen determinats per dos fenòmens físics, la reflexió i la difracció. La reflexió es produeix quan una ona canvia de medi, una part d'aquesta s'absorbeix o continua pel següent medi, però una altra retorna altra cop a la font però amb una direcció diferent.

Per altra banda la difracció es produeix quan l'ona troba un obstacle o una obertura, i aquests esdevenen una font sonora secundària de l'ona que s'està propagant.

Aquests dos fenòmens físics són els responsables de que puguem localitzar sons dins d'un espai, siguem conscients de la dimensió de l'espai i on estem nosaltres dins d'aquest fins i tot sense tenir una referència visual, que no puguem entendre una persona parlant a una certa distància de nosaltres, malgrat que ja som capaços de descodificar aquesta informació de la falta d'intel·ligibilitat que ens aporta la reverberació, i de que puguem gaudir d'un concert de música clàssica al Palau de la Música amb la sensació de grandiositat que aquest ens transmet.

En aquest treball ens centrarem en aquesta sonoritat dels espais acústics, que anomenarem reverberació.

## 2 LA REVERBERACIÓ

La reverberació és un efecte natural de l'espai que sempre acompanya el so que es genera dins d'aquest. Podem trobar reverberacions més llargues, més curtes, més metàl·liques o més velades, més suaus o més estridents, més molestes o més còmodes, que ajudin a entendre la parla o que desenfocin totalment el so original, més sorolloses o més discretes, més brillants o més fosques, més íntimes o més distants i fins i tot més realistes o del tot impossibles.

Observant la història de la música podem veure que sempre hi ha hagut un tipus d'espai, i per tant un tipus de reverberació, que l'acompanya. En això es centren disciplines com l'arqueo-acústica, amb l'ajuda de l'auralització, que demostren que antigues construccions -com el Chavín de Huántar- augmentaven els efectes de la música espiritual, o fins i tot que les localitzacions on es troben pintures rupestres tenen una reverberació especial. Però també ho podem observar per nosaltres mateixos, com els cants gregorians -amb notes llargues- s'interpretaven en esglésies i catedrals amb una gran reverberació, per tal de transmetre el poder de Déu. O més tard les òperes i les representacions teatrals realitzades en teatres amb una reverberació prou apagada perquè es pogués entendre la parla. O bé grans sales de palaus amb suficient reverberació per amenitzar el so del clavicèmbal. Fins arribar a les actuals sales de concerts amb una reverberació curta per poder percebre els elements rítmics i més ràpids que la caracteritzen, entre molts d'altres exemples.

Amb tota aquesta història darrere, actualment tenim espais que adequen la seva reverberació al tipus d'activitat o al tipus de música que s'hi realitzarà: grans auditoris per música clàssica, sales de ball i sales de concerts amb una reverberació més seca per música moderna, sales de jazz - molts cops antigues caves, cellers o espais petits soterrats com el Jamboree- o bé grans poliesportius que no tenen la seva reverberació adequada per cap tipus d'activitat que s'hi fa.

### 2.1 Reverberació des d'un punt tècnic

La reverberació és, en termes generals, la persistència del so després que la font sonora hagi deixat d'emetre. Aquest fenomen és degut a les reflexions provocades pel so en

rebotar a les parets o objectes i la difusió d'aquestes en l'espai. Aquestes reflexions arriben a les orelles dels oients amb un retard i una atenuació respecte el so directe durant un cert temps fins que s'extingeixen a causa de la capacitat d'absorció dels diferents elements a la sala.

L'absorció és un fenomen comú en tot moviment ondulatori -so, llum...-, que es produeix quan aquest es propaga i col·lisiona amb un obstacle. En el cas del so té una relació amb la propagació d'aquest, és el procés pel qual una superfície pren energia sonora de l'ona que hi ha inserit i aquesta es transforma en calor, molts cops considerada energia perduda . Aquest fenomen el podem descriure quantitativament a partir de dos paràmetres: el coeficient d'absorció, la capacitat d'una superfície en absorbir energia envers la que reflecteix, i la freqüència crítica, la freqüència a partir de la qual una superfície rígida comença a absorbir energia. A tot element hi podem assignar un coeficient d'absorció, més baix o més alt (sempre entre 0 i 1); les persones, l'aire, els mobles, els elements decoratius i fins i tot les parets, sostre i terra.

Tenint en compte aquest fenomen de l'absorció l'estat d'ocupació de l'espai o el recinte passa ser un paràmetre molt important de la reverberació, ja que aquest pot aportar més o menys absorció dependent de la quantitat de persones que s'hi troben dins. Així doncs és habitual descriure l'ocupació en tres estats:

1. Sense ocupació: amb tot el material però sense cap persona.
2. Tipus estudi: sense públic, només comptant els que formen la font sonora, músics, tècnics i material d'aquests.
3. Ocupació: correspondria entre el 80 i el 100% dels seients o aforament ocupat

Per altra banda, tot i que la reverberació és formada per reflexions aquesta es diferencia de l'eco i això és degut al nostre llindar de percepció de dos sons iguals separats temporalment. Si la distància és menor als 30 o 50ms es percep com a reverberació - molts ecos fusionats- mentre que si superen aquesta distància es perceben com a ecos discrets del so original.(From Springs, Plates & Buckets To Physical Modelling, s.d.; «Reverberation», 2022)

Habitualment convenim en dividir la reverberació en tres fases temporals: les reflexions primeres (*early reflections*), el període de transició i les reflexions tardanes (*late*

*reflections*). Les reflexions primeres són aquelles que arriben primer a les orelles de l'oient, ja que prenen el camí més ràpid, reflectint-se només un parell de cops a la superfície. Per altra banda les reflexions tardanes són les que prenen camins més complexos i reflecteixen més cops a les diferents superfícies, per tant arriben més tard a les orelles de l'oient. Aquests conceptes es tractaran al llarg d'aquest treball ja que en són el nucli.

Una altre element important de la reverberació és la seva dependència freqüencial, tal com he descrit a l'inici d'aquest apartat les reverberacions poden ser més fosques, més brillants o més càlides, és a dir, poden tenir diferents timbres i això ve donat per la resposta freqüencial que pugui tenir cada una de les reverberacions de cada un dels espais. Aquesta resposta freqüencial es pot veure afectada per la posició on et trobis, per la posició de la font, per la temperatura, per la humitat, per la distància entre l'oient i la font, o fins i tot pel tipus de decoració i elements que contingui l'espai ja que aquests aportaran un coeficient d'absorció o un altra a diferents bandes freqüencials.

Una mesura perceptiva particularment rellevant, relacionada amb la relació entre la senyal directe i les seves reflexions, és la distància crítica, aquesta correspon a la distància en el qual el nivell de pressió del so reverberant coincideix amb el nivell de pressió del so directe. Aquesta distància crítica depèn de la directivitat de la font, del temps de reverberació de la sala, les mides de la sala i de la quantitat d'absorció de la sala. En una sala més reverberant aquesta distància crítica serà curta, mentre que en una sala molt seca o anecoica serà molt llarga.

Per descriure la reverberació s'utilitzen multitud de paràmetres quantitatius, alguns són diferents maneres de descriure una mateixa cosa, altres es focalitzen en una part de la reverberació i altres en com ens sentim dins d'aquell espai amb aquella certa reverberació. Aquests paràmetres es poden classificar en perceptiva i físics.

Per començar, els físics són tots aquells que podem extreure a partir de la reverberació en ella mateixa, com el temps de caiguda de les reflexions primeres (EDT), el soroll de fons màxim acceptable a les diferents bandes freqüencials o també anomenat criteri de soroll (NC; *noise criteria*), l'índex de la transmissió de la parla (STI), la pèrdua de la intel·ligibilitat (%ALcons) i el més rellevant de tots, i el més utilitzat, el temps de reverberació (RT).

Aquest temps de reverberació, ja esmentat anteriorment, és el temps que tarda en decaure el so mantingut després que la font sonora s'hagi aturat i té múltiples representacions: el RT20 ens indica el temps que ha tardat en decaure 20dB - després dels primers 5dB, que corresponen a la meitat de la decaiguda de l'EDT (-10dB) -, el RT30 el temps en decaure 30dB i el RT60, el més comú, el temps en decaure 60dB. Molts cops també es separa per bandes freqüencials obtenint així l' $RT_{low}$ , l' $RT_{mid}$  i l' $RT_{high}$  que corresponen a bandes de 150 a 500Hz, de 500 a 1000Hz i de 1000Hz a 4000Hz, respectivament.

Wallace Clement Sabine va desenvolupar, experimentalment, una expressió que relacionava aquest paràmetre, RT60, amb el volum de la sala i el coeficient d'absorció mig d'aquesta:

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 * c * S * \alpha}$$

on V correspon al volum de la sala (en m<sup>3</sup>), c la velocitat de propagació del so en l'aire (en m/s), S la suma de superfícies de tota la sala (en m<sup>2</sup>) i  $\alpha$  el coeficient d'absorció mig.

Uns quants anys més tard, a la dècada del 1930s, Carl Ferdinand Eyring va afinar l'equació de Sabine tenint en compte casos on el coeficient d'absorció era superior a 0.2;

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 * c * S * (-\ln(1 - \alpha))}$$

Per altra banda, els paràmetres perceptius són tots aquells que no són mesurables directament, sinó que s'obté una aproximació a través de diferents paràmetres i càlculs objectius i experimentació, i cerquen descriure característiques de la reverberació més properes a la percepció humana, tenint en compte aspectes perceptius i psicoacústics. Aquests són la sonoritat (G), que correspon a la diferència entre el nivell de la font al recinte i la mateixa font mesurada a 10m en camp lliure; la claredat (C), la relació entre l'energia que li arriba al oient durant els primers segons del so directe i l'energia que li arriba posteriorment - aquesta pot ser C50 (primers 50ms) per la veu o C80 per la música -; la definició (D50), la relació entre l'energia que arriba durant els primers 50ms i l'energia total, les mesures d'energia lateral, tant primera ( $J_{LF}$ , 80ms) com tardana ( $L_J$ ), que avaluen l'amplada de la font sonora percebuda i l'especialitat o sensació de so envoltant respectivament; la intimitat (ITDG), que correspon a l'espai entre el so directe

i les primeres reflexions, i la calidesa (BR) i la brillantor (Br), que corresponen a la riquesa de greus i d'harmònics, respectivament.

Tots aquests paràmetres intenten descriure un espai existent, i tot i que ens ajuden a avaluar reverberacions d'espais reals també ens poden servir per dissenyar reverberacions artificials, tant si volem que s'aproximin a un espai real com si volem crear un espai impossible de reproduir a la vida real. Esdevenint, així, un element clau pels enregistraments i les produccions de música actuals -i no tant actuals-.

Des que es va començar a enregistrar so, i especialment música, a mitjans del s.XIX, es buscava enregistrar els músics en espais amb la reverberació adequada o desitjada, tal com si fos un concert però no va ser fins un segle després que es va desenvolupar la reverberació artificial ja que aquesta permetia més control als enginyers de so sobre la sala virtual on estaven col·locant els instruments de la seva mescla. (Musicpublished, 2014)

## 2.2 Reverberació artificial

La reverberació artificial és aquella reverberació obtinguda a partir d'espais i mitjans controlats i manipulats de forma que simulin una reverberació d'un espai real.

Aquesta la podem dividir en dos grans grups segons els medis amb què es produeixen, per una part la reverberació artificial analògica, la primera en desenvolupar-se, i per l'altra la reverberació artificial digital, que engloba el conjunt de tècniques emprades amb anterioritat a les tecnologies digitals.

### 2.2.1 Analògica

#### 2.2.1.1 Cambres d'eco

La primera de totes les reverberacions artificials van ser les cambres d'eco que consistien bàsicament en col·locar uns altaveus que feien sonar la gravació en una sala reverberant, capturar el so des de l'altra punta de la sala i tornar-ho a enviar amb el so original. El primer enginyer de so en utilitzar-les va ser Bill Putnam per l'enregistrament de *Peg O' My Heart* de *The Harmonicats* al 1947. («The History of EMT and Plate Reverb», 2019)



Les cambres d'eco podien ser de molts tipus, sales més petites, més grans, més o menys reverberants... i per tant cada una d'elles sona diferent, tot i que buscaven utilitzar goma-laca per les superfícies i unes parets no paral·leles.

Actualment encara s'utilitzen a molts grans estudis de gravació.

### 2.2.1.2 Reverberació de plaques

Degut, en part, al cost de les cambres d'eco van sorgir les reverberacions de plaques, que a més eren molt més versàtils i permetien canviar el temps de reverberació. Aquestes funcionen transmeten la senyal d'àudio a través d'un transductor electromecànic a una làmina de metall molt fina, aquesta vibra i aquestes vibracions s'enregistren a través d'unes pastilles properes, semblants a les d'una guitarra. La primera reverberació de placa que es va fabricar va ser la EMT 140 de l'empresa Elektro-Mess-Technik.

Actualment s'utilitza molt la sonoritat de la reverberació de plaques, tot i que la majoria de vegades amb *plugins* que la simulen, ja que té un so molt característic, natural, suau, dens i brillant. («The History of EMT and Plate Reverb», 2019)

### 2.2.1.3 Reverberació de molles

Quasi simultàniament amb les reverberacions de plaques van sorgir les de molles, que ocupaven molt menys espai i tenien un so semblant a aquestes, tot i que més estrident. La reverberació de molles consisteix en una molla amb un transductor en una punta i un captador a l'altra i segueixen el mateix funcionament que les reverberacions de plaques: capten la vibració a través de la molla. El primer en utilitzar-la van ser les orgues Hammond, des del 1960 i més tard Accusonics va presentar una unitat física anomenada *Accusonics Type 4 Spring Reverb*. (Mcallister, 2021) És una sonoritat de reverberació molt utilitzada per guitarristes i molts amplificadors de guitarra la porten incorporada, també per caixes i especialment utilitzada en estils com el reggae o el dub. (*A History of Reverb in Music Production*, s.d.; «Uso de la Reverberación», 2018)

## 2.2.2 Digital

Gràcies a les innovacions tecnològiques de la segona meitat del segle XX en endavant, la tecnologia musical també va avançar i molts dels efectes típics analògics -com els delays, filtres, entre molts d'altres- van ser adaptats al medi digital.

Així doncs actualment ens trobem amb tres estratègies per aconseguir reverberacions artificials digitals, les reverberacions algorísmiques, les de convolució i el modelatge físic.

### 2.2.2.1 Reverberacions Algorísmiques

Per aconseguir una reverberació algorísmica s'utilitzen elements de DSP com línies de retard, bucles, moduladors i filtres, principalment, que permeten reproduir les característiques dels espais reals i les reflexions d'aquests quan s'hi presenta una font sonora. (*Getting Started With Reverb Design, Part 1: Dev Environments* - Valhalla DSP, s.d.; LiquidSonics, 2019)

EMT va introduir al mercat el primer -altre cop- sistema de reverberació digital al 1976, la EMT 250, una versió algorísmica de l'EMT 140. (*A History of Reverb in Music Production*, s.d.; «The History of EMT and Plate Reverb», 2019)

Altres mòduls de reverberació, també algorísmics, que van sortir en aquell moment van ser la Lexicon 224, els de TC Electronics, Eventide, Yamaha, entre d'altres. (Musicpublished, 2014)

Actualment la majoria de reverberacions algorísmiques es troben a *plugins* com podrien ser els de Valhalla, Waves, Soundtoys, entre d'altres marques.

En aquestes reverberacions comercials molts cops apareixen els següents paràmetres:

- **Size:** les dimensions de la sala o espai que emula.
- **Temps:** com de llarga és la reverberació, paràmetre directe amb la TR.
- **Decay:** com de llarga és la cua de la reverberació, o les reflexions tardanes.
- **Difusió:** correspon al mateix efecte que fa la difusió a la reverberació d'un espai real. Amb més difusió es produeixen més reflexions i resulta en un so molt més dens i gruixut. I el cas contrari amb poca difusió.

- **Dry/Wet:** la relació entre senyal processada per la reverberació i senyal neta.
- **Pre-delay:** temps que tarda en començar la reverberació després que sentim la senyal d'entrada. Molts cops es relaciona amb la sensació de proximitat i llunyania en trobar-nos en un espai reverberant real, quan ens trobem a prop de la font percebem abans el so directe que no pas les reverberacions -un pre-delay més alt- mentre que quan ens trobem més lluny tot el contrari -un pre-delay més curt-.
- **Modulació:** afegeix més complexitat i moviment a la reverberació aplicant una modulació als valors de temps. Sona semblant a l'efecte de chorus.
- **Width:** amplada en la imatge estèreo de la reverberació. Quan menys amplada més mono és la sortida de la reverberació, i quan més amplada més estèreo.
- **Damping:** correspon a la quantitat d'absorció de l'espai, depenent de la freqüència, així doncs esdevé un controlador tímbric dinàmic segons el decaïment de la reverberació.
- **EQ:** et permet modificar el timbre de la reverberació amplificant-ne o atenuant-ne els diferents modes o bandes freqüencials.
- **Early-Late:** tal com s'ha comentat anteriorment, les *early* (o primeres reflexions) són les primeres reflexions que es perceben de la reverberació, mentre que les *late* són aquelles que venen més tard, molts cops formant el que se'n diu la cua de la reverberació. El control sobre aquesta paràmetre és el volum o presència d'aquestes reflexions, *earlys* i *lates*.
- **Mix o sortida:** et permet ajustar el volum total de la sortida de l'efecte, en aquest cas de la reverberació.

(9 Reverb Parameters Every Producer MUST KNOW | Waves, s.d.; Reverb: What Do All Those Knobs Do?, s.d.; JoeCrow, 2020)

Les reverberacions algorísmiques es poden dividir en 3 grans grups segons el tipus de reverberació a modelar, que molts cops és un paràmetre més d'aquesta, o a quin tipus de sistema es volen assemblar:

### 2.2.2.1.1 Acústiques

- **Ambiental (ambience):** Reverberacions amb moltes primeres reflexions i un temps de decaiguda curt.
- **Habitació (room):** Reverberacions amb moltes primeres reflexions i un temps de decaiguda curt però no tant com les ambientals i amb més coloració.
- **Cambra (chamber):** Semblants a les reverberacions dels estudis de gravació, com una room però menys colorada. Tenen un atac ràpid i força densitat d'ecos.
- **Sala (hall):** Més llarga i grossa que la room. S'aproximen a les sales de concert.
- **Catedral (cathedral):** Semblant a una reverberació de sala però amb temps d'atac i decaiguda molt més llargs. Té molta difusió i per tant quasi no sent primeres reflexions discretes.
- **Cova o estadi (cave, stadium):** És pràcticament una reverberació de catedral però molts cops amb el típic eco que prové de les parets frontals dels estadis.

### 2.2.2.1.2 Mecàniques

- **De molles:** Una reverberació curta, amb ressonàncies metàl·liques i força fosca.
- **De plaques:** Una reverberació que pot ser tan curta com molt llarga, amb un atac molt ràpid i brillant.

### 2.2.2.1.3 Antinatural

- **De plaques digital:** Intenten imitar les reverberacions de plaques però s'acaben diferenciant molt. Tenen un atac ràpid, un so molt brillant i ressonàncies metàl·liques gens disperses.
- **Brillant (shimmer):** Una reverberació que també inclou un canvi de nota, o una modulació (*pitch shifting*), normalment d'octava.

- **Florida (bloom):** Les característiques principals d'aquestes reverberacions són la lenta decaiguda i un temps de construcció encara més lent.
- **No lineal (nonlin):** Les reverberacions no lineals són aquelles que no segueixen el decaïment d'una reverberació real o natural, poden ser unes grans reverberacions amb molta cua que es tallen de cop -el que s'anomena molts cops **reverberació de porta** (*gated reverb*)-, o bé una reverberació invertida en el temps (*reverse reverb*), o qualsevol altra possibilitat que impliqui un decaïment no lineal i per tant irreal.

(«Reverb Types - Effect-O-Pedia | Valhalla Plugins», 2018; Savage, 2014)

Aquestes últimes reverberacions antinaturals tot i no pertànyer a l'objectiu d'estudi d'aquest treball si que tenen, i han tingut, una gran importància en el món de la creació musical i val la pena esmentar-les.

Tal com esmentava a l'inici d'aquest apartat, per aconseguir els diferents algorismes de reverberació s'utilitzen diferents elements de DSP, cada un amb la seva funció. Abans però de descriure aquests elements cal tenir en compte els següents conceptes que apareixen molt sovint en programar reverberacions algorísmiques:

- **Retroalimentació (feedback):** la retroalimentació apareix quan la sortida d'un sistema és connectada (o derivada) a l'entrada del mateix sistema. Això causa un bucle a la cadena de causa-efecte. («Feedback», 2022)
- **Alimentació anticipada (feedforward):** en electrònica o en el processament del so digital, una alimentació anticipada consisteix en mesclar el senyal net o directe amb la sortida del sistema. (*Feedforward Comb Filters | Physical Audio Signal Processing*, s.d.)
- **Nidificació (nesting):** consisteix en contenir un sistema dins d'un altra sistema, aquest pot ser un sistema com el que el conté o diferent. Molts cops són sistemes recursius. («Nesting (Computing)», 2021)

Podem ja exposar els elements constructius presents a la majoria de reverberacions sintètiques, que serien els següents:

- **Línies de retard (delay lines):** aquest és l'element imprescindible ja que ens permet crear les reflexions que formaran la reverberació, retardant la senyal que li entra durant el temps que triem. Una reverberació algorítmica en té moltes i cada una amb una longitud de retard diferent. És molt important que a l'hora de triar longituds de retard siguin nombres primers entre ells per evitar que coincideixin les diferents reflexions.
- **Guany:** el guany controla la quantitat de senyal que passa o deixa de passar, amplificant o bé atenuant la senyal que rep.
- **Filtres de pinta (combfilter):** un filtre de pinta és un retard amb una retroalimentació controlada per un guany. Aquesta retroalimentació crea unes repeticions les quals s'atenuen una vegada rere l'altre - a causa del guany- que ens serveixen de reflexions, això fa que el filtre de pinta esdevingui la base per la creació d'una reverberació. Tot i ser l'esquelet és massa simple per modelar una reverberació realista, té un so molt metàl·lic.

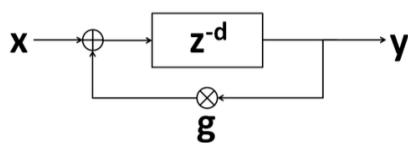


Figura 2.2-1: Esquema d'un filtre de pinta. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

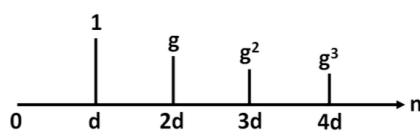


Figura 2.2-2: Resposta impulsional d'un filtre de pinta. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

- **Filtres passa-tot (allpass-filter):** els filtres passa-tot no afecten a la magnitud de la senyal però sí a la fase, això permet crear diferents retards a diferents bandes freqüencials i per tant aportar més difusió a la reverberació. Per altra banda un filtre passa-tot és un filtre de pinta amb una alimentació anticipada (a part de la retroalimentació).

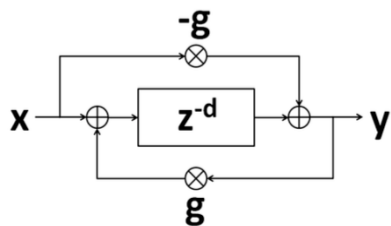


Figura 2.2-3: Esquema d'un filtre passa-tot. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

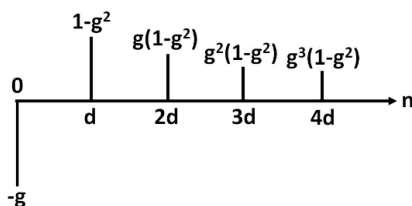


Figura 2.2-4: Resposta impulsional d'un filtre passa-tot. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

- **Matrius:** les matrius operen amb les senyals que reben a l'entrada i extreuen el resultat per la sortida. Són molt útils per afegir més reflexions i mesclar-les entre elles per a què siguin menys predictibles i per tant més reals. Per a una reverberació és important que totes les reflexions que generi siguin d'igual magnitud per assegurar la bona distribució. N'hi ha de molts tipus, algunes de les més famoses són la Hadamard, Anderson, Householder, la diagonal i la circulant entre moltes altres.
- **Filtres:** els filtres ens permeten controlar el timbre de la reverberació, especialment el damping, ja que ens permet atenuar o amplificar diferents bandes de freqüències. Col·locats dins els camins de retroalimentació dels retards ens permeten controlar el temps de decaïment per bandes freqüencials.
- **Moduladors:** molts cops oscil·ladors de baixa freqüència o bé soroll amb banda freqüencial limitada. Ens permeten aplicar canvis lentament als temps de retard per així aconseguir una sonoritat més natural i real. Portat a l'extrem pot aportar un efecte semblant al del chorus i molts cops, especialment per senyals d'entrada amb molts elements d'alta freqüència, ajuden a millorar la difusió. (Dattorro, 1997)

(gDSP - Online Course | Reverb, s.d.; Getting Started With Reverb Design, Part 1: Dev Environments - Valhalla DSP, s.d.; Luff, s.d.; Rafii & Pardo, 2009; Schlecht, 2020)

Al llarg de la història diferents investigadors han anat trobant diferents combinacions d'aquests elements creant així múltiples tipologies d'algorismes, amb diferents estructures:

#### 2.2.2.1.4 Manfred Schroeder

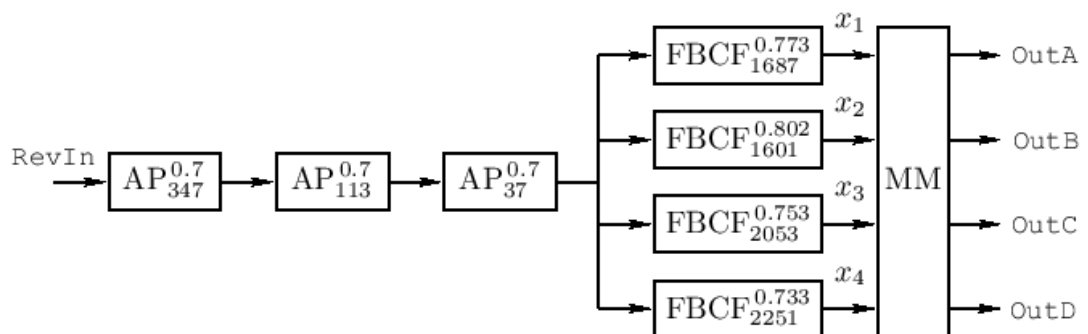


Figura 2.2-5: Esquema de la reverberació de Schroeder. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

La reverberació de Schroeder consisteix en un conjunt de filtres de pinta en paral·lel i un altre conjunt de filtres passa-tot en sèrie -l'ordre en que apareixen aquests dos conjunts és indiferent- i finalment una matriu per mesclar les diferents senyals.

Posar els filtres de pinta en paral·lel permet evitar la forta coloració metàl·lica que els caracteritza. Per altra banda posar els filtres passa-tot en sèrie et permet una gran difusió ja que augmenten notablement la densitat de reflexions. (Smith, 2010)

Més tard van aparèixer modificacions del que s'anomena la Schroeder Reverberation fetes per altres dissenyadors i investigadors:

Hal Chamberlin va utilitzar cinc filtres passa-tot en sèrie, els dos últims doblats en paral·lel per poder obtenir una sortida estèreo. També va afegir un

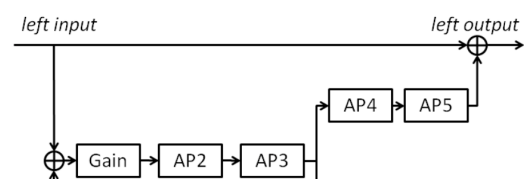
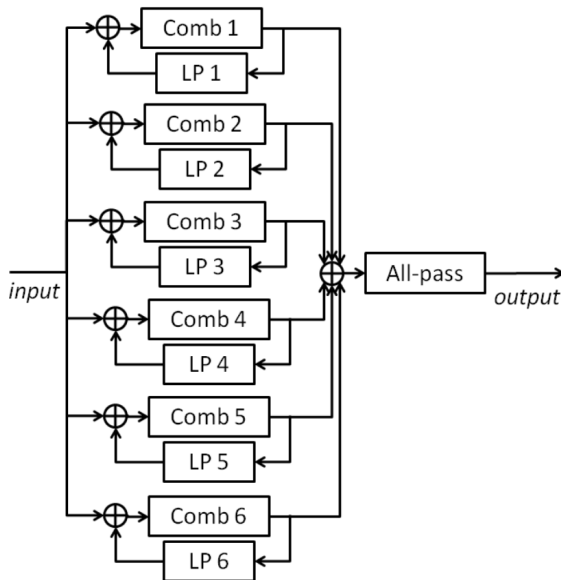


Figura 2.2-6: Esquema de la reverberació de Hal Chamberlin. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".



paràmetre de guany per controlar el guany total de la reverberació. (Rafil & Pardo, 2009)

James Moorer va utilitzar sis filtres de pista en paral·lel i un sol passa-tot, també un filtre passa-baixes dins de cada bucle dels filtres de pista per tal de simular



l'atenuació a alta freqüència conseqüència de l'absorció de l'aire. Moorer també proposava utilitzar un filtre de resposta finita per a simular les reflexions primeres i en canvi utilitzar un sistema de reverberació com el que ell proposava per simular les reflexions tardanes. James Moorer va aconseguir un so més suau i més realista que eliminava el so metàl·lic i l'efecte d'aleteig ("flutter").(Rafil & Pardo, 2009; Smith, 2010)

Figura 2.2-7: Esquema de la reverberació de James Moorer. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

Bill Gardner proposa una combinació diferent de filtres passa-tot per cada mida de sala, quan més gran és la sala a modular més filtres nidificats hi hauran. El principal defecte d'aquesta reverberació és que la creació de la resposta estèreo s'aconsegueix únicament a partir de canviar la fase d'un dels dos canals. (gDSP - Online Course | Reverb, s.d.)

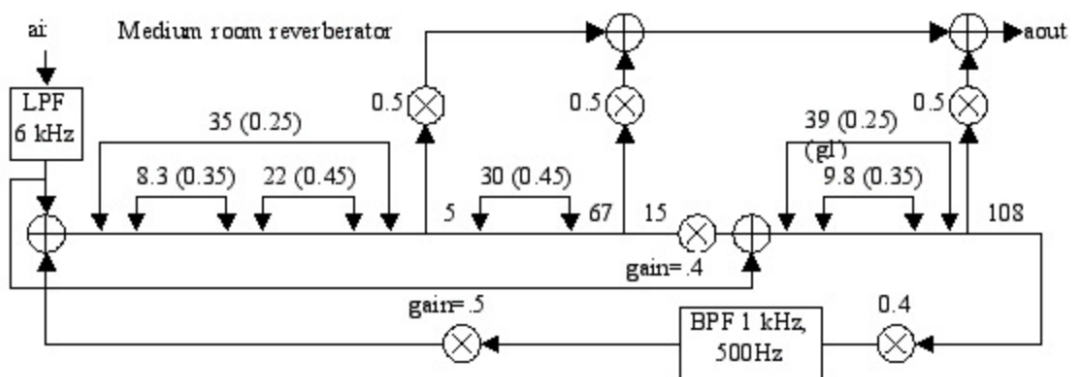


Figura 2.2-8: Esquema de la reverberació de Bill Gardner per a una sala mitjana. Imatge extreta de "gDSP".

Un altre tipus de reverberació algorísmica derivada del sistema de Schroeder és l'anomenada Freeverb. Aquesta utilitza quatre filtres passa-tot en sèrie i vuit filtres de pinta amb passa-baixes - com els de James Moorer- en paral·lel, aquesta estructura per cada canal.

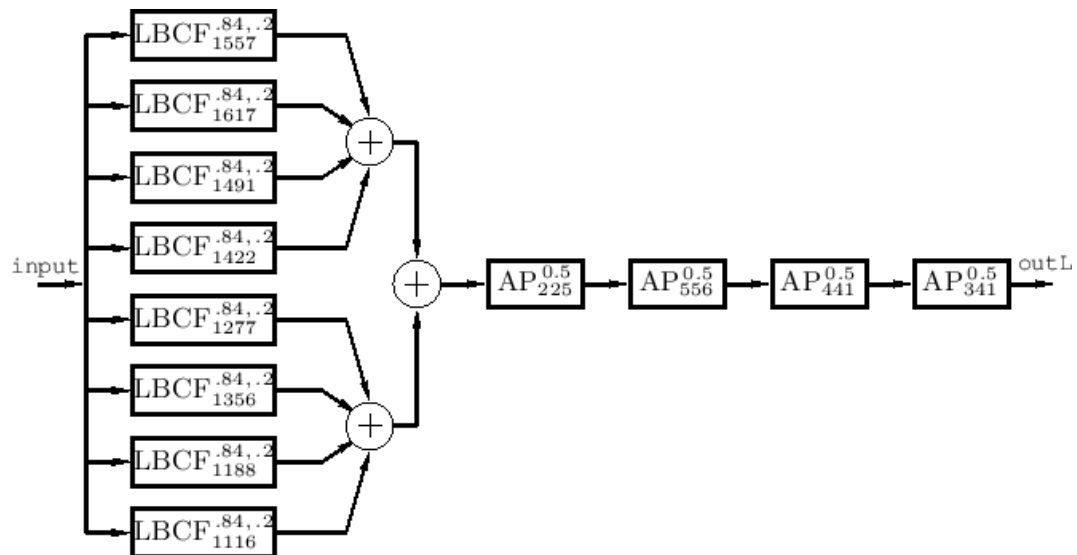


Figura 2.2-9: Estructura de la reverberació Freeverb pel canal esquerre. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

Per determinar l'amplada de la imatge estèreo s'aplica al canal dret un offset enter, que per defecte està afinat a 23, a cada una de les dotze línies de retard. (Smith, 2010)

#### 2.2.2.1.5 FDN (Feedback Delay Network)

Una reverberació FDN consisteix en una matriu de línies de retard que ens permet tenir més densitat de reflexions i més complexitat d'aquestes, gràcies a l'entrecruament de les sortides dels retards. Les matrius de les FDN poden ser de molts tipus, com els que hem comentat anteriorment, per aconseguir diferents reflexions. És considerada un dels algorismes més realistes i s'utilitza molts cops per obtenir reverberacions d'alta qualitat. L'exemple de la figura 10 també inclou un filtre per corregir els modes, l'equalització de la reverberació. (Smith, 2010)

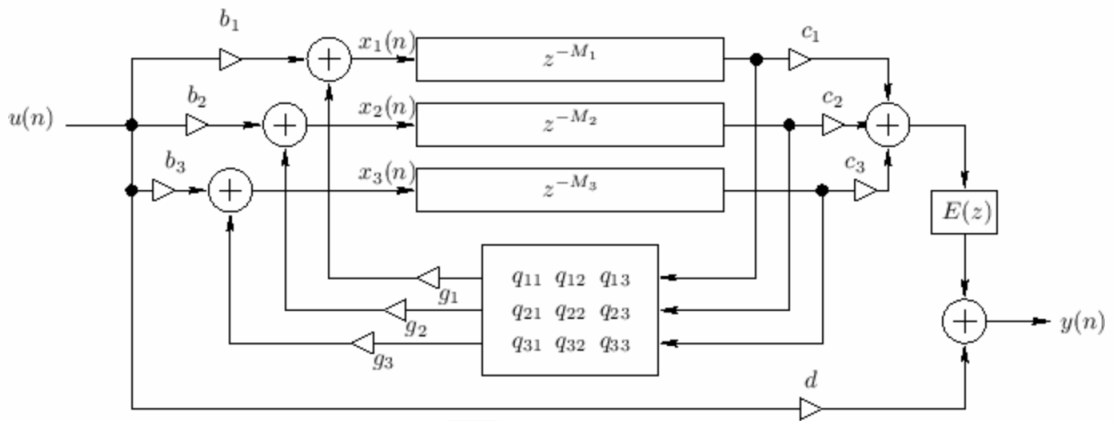


Figura 2.2-10: Exemple de reverberació FDN utilitzant tres línies de retard. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

De les reverberacions tipus FDN han sorgit moltes variants, una d'elles la Zita-Rev1 que combina la matriu de retroalimentació amb un conjunt de filtres passa-tot, com els de Schroeder, en sèrie amb les línies de retard. Molts cops també poden incloure filtres passa-baixes en cada retroalimentació per simular l'amortiment de l'alta freqüència. (Smith, 2010)

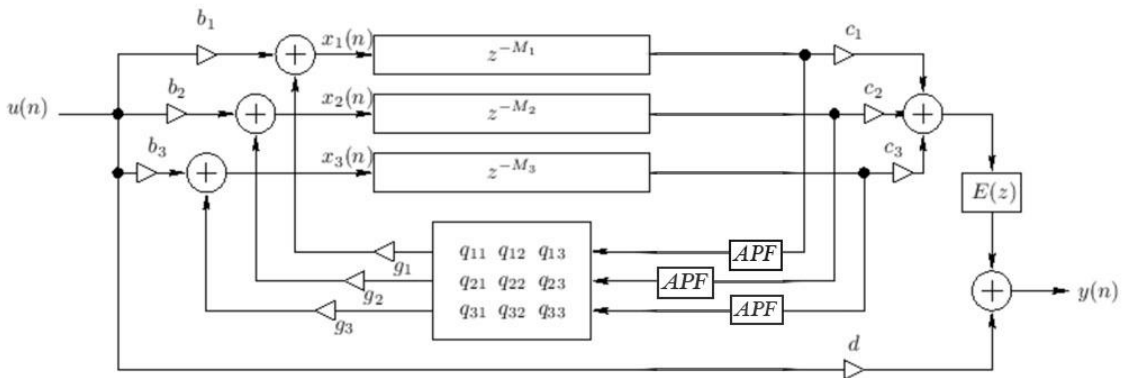


Figura 2.2-11: Exemple de reverberació de Zita-Rev1. Imatge extreta de "Physical Audio Signal Processing".

Actualment la majoria de reverberacions algorísmiques mesclen i ordenen les diferents tipologies per obtenir sonoritats ben diferents.

Un exemple d'un algoritme de reverberació actual seria aquest de Schlemmer:

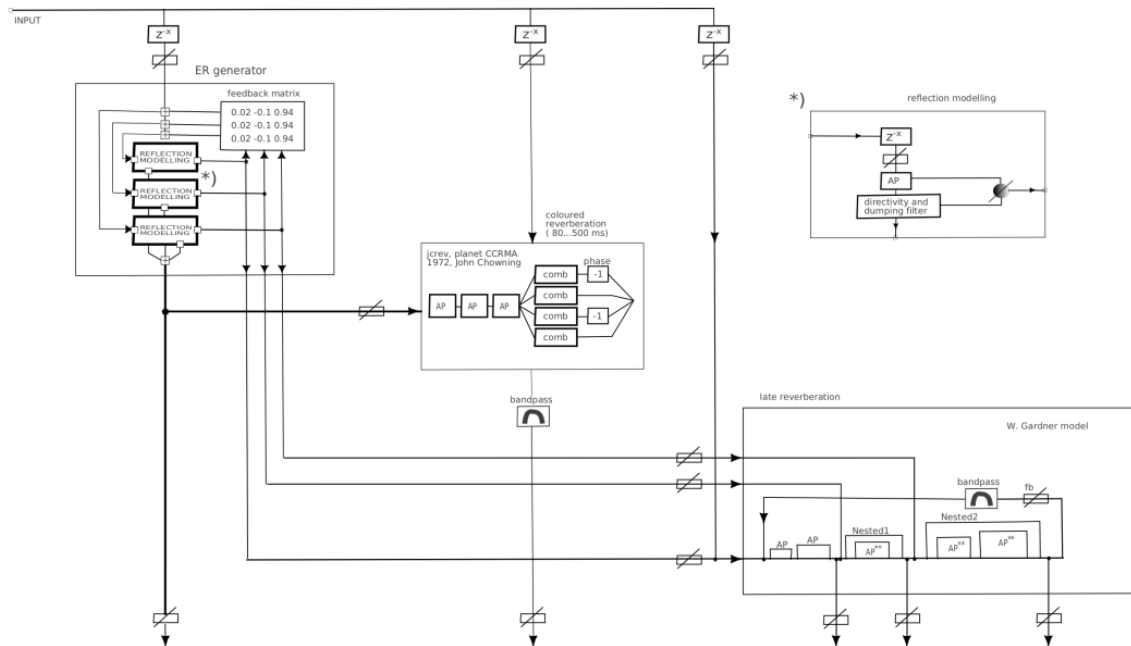


Figura 2.2-12: Exemple de reverberació separada en tres parts, amb un algoritme per les reflexions primeres, mitjanes i tardanes. Imatge extreta de l'article "Reverb Design".

Per les reflexions primeres utilitza una FDN, buscant una part més acolorida i geomètrica, per les mitjanes l'algoritme d'Schroeder, que determina el color i la subjectivitat de l'espai, i finalment per les tardanes el model de Gardner, evitant la coloració. (Schlemmer, s.d.)

### 2.2.2.2 Reverberacions de Convulsió

A diferència de les reverberacions algorísmiques, aquesta tecnologia de reverberació digital utilitza les respostes impulsional d'un recinte per tal d'obtenir, amb qualsevol senyal d'àudio d'entrada, com sonaria aquest en aquell recinte.

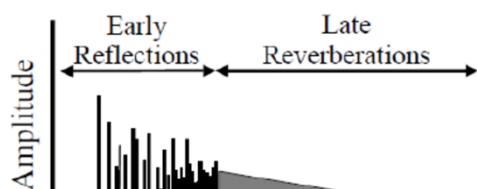


Figura 2.2-13: Representació gràfica d'una resposta impulsional amb les seves seccions: so directe, primeres reflexions i reflexions tardanes. Imatge extreta de l'article "Direct-to-Indirect Acoustic Radiance Transfer".

La resposta impulsional, o IR, és l'evolució temporal de la mesura de pressió acústica d'una delta de Dirac en un recinte, la qual podríem definir com energia acústica infinita en un instant de temps. Aquestes IR es poden obtenir a

partir d'enregistrar les respostes a una delta de Dirac en sales reals, a través de models físics o bé sintèticament.

La primera reverberació sintètica de convolució a temps real va ser la Sony DRE S777. (Musicpublished, 2014)

### 2.2.2.3 Reverberacions de Modelat Físic

Tot i que no es reconegudament un tipus de reverberació digital ja que no se'n fa molt ús en la producció musical, sí que és una manera més d'obtenir les característiques sonores d'un espai de forma digital a partir de les seves propietats físiques.

Es tracta de recrear i modular l'estructura de l'espai físic en termes de funcions matemàtiques per tal de que qualsevol posició o característica es pugui afegir directament a l'equació i calcular el resultat a partir d'aquesta. Com per exemple amb la tècnica de modelatge d'elements finits que ens permet generar respostes impulsional d'aquests espais.

Per tant, gràcies al modelatge físic podem auralitzar espais, és a dir recrear sonorament i de forma precisa espais reals però també ficticis o bé edificacions en ruïnes, sabent com eren anteriorment. L'auralització té moltes aplicacions, des de la recuperació històrica fins al disseny de so de videojocs de realitat virtual i utilitza diferents tècniques com el *ray-tracing* (el qual modela el so prenent-la com a llum), modelatge a partir de maquetes o modelatge a partir de fonts fantasmes. (Kleiner et al., 1993)

El modelat físic també permet moure posicions de la font o del oient en l'espai modelat sense haver d'editar l'algorisme o bé re-mesurar per cada punt, també més flexibilitat de control per l'usuari i amb una relació més directa entre paràmetres físics i paràmetres de la reverberació, però tot això a canvi d'un gran cost de CPU en fer els càlculs de la sala un cop modelada, especialment en modelats d'auditoris o sales de concerts. (Bilbao et al., 2006; *Possibility of a Physical Reverb Model*, s.d.)

Els *plugins* de Physical Audio són un exemple de reverberacions de modelat físic en temps real. (*Physical Modelling Synthesis Plugins*, s.d.)

# 3 EMULACIÓ D'ENTORNS ACÚSTICS AMB UNA REVERBERACIÓ ALGORÍSMICA

## 3.1 Explicació i procediment

Aquest treball busca apropar una reverberació algorísmica a diferents reverberacions d'espais reals. Per tal d'aconseguir aquest objectiu es seguirà el següent procediment amb cadascun dels espais:

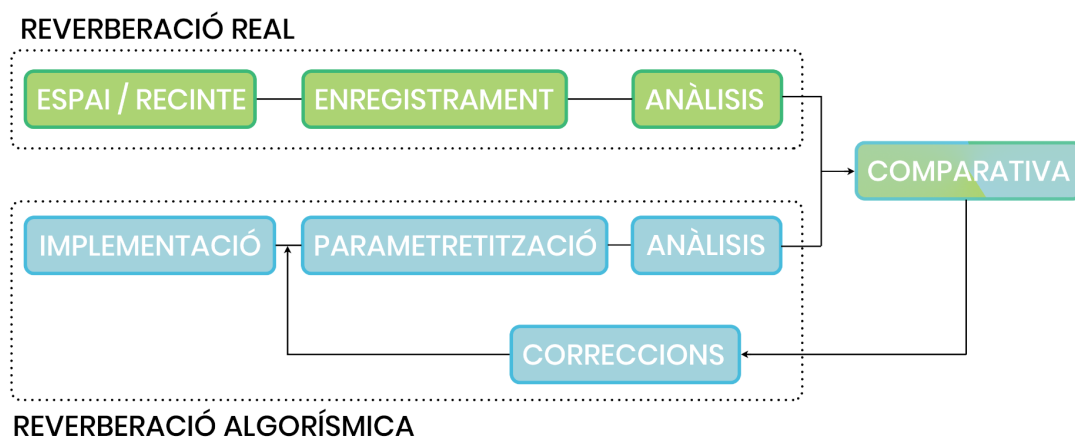


Figura 3.1-1: Esquema del procediment dut a terme.

El primer pas serà caracteritzar la reverberació de diversos espais acústics a partir de la mesura i l'anàlisi de la seva resposta impulsional. Això requerirà, en primer lloc, obtenir aquestes respostes impulsional a través d'un procediment de mesura explicat més endavant i analitzar-les a partir d'un seguit de descriptors enumerats i justificats més endavant, utilitzant REW i MATLAB<sup>2</sup>.

Un cop caracteritzades les respostes impulsional mesurades, la segona part consistirà en implementar una reverberació sintètica algorísmica emprant les estructures típiques descrites al capítol anterior i amb dos objectius específics per tal d'arribar a la finalitat d'aquest treball: que permeti aproximar espais acústics molt diferents i que permeti, idealment, aconseguir un grau de realisme elevat en tots els casos.

Un cop implementada la reverberació algorísmica es parametritzarà segons els descriptors esmentats anteriorment, buscant la relació entre aquests i els diferents

<sup>2</sup> MATLAB: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

valors parametrizables de la reverberació algorísmica, com la quantitat de retard de les línies de retard, les freqüències de tall dels filtres, el guany dels filtres, etc.

Un cop obtinguda la reverberació algorísmica aproximada a la reverberació real corresponent s'exportarà una resposta impulsional d'aquesta (processant una delta de Dirac pel sistema) i s'analitzarà seguint el mateix procediment que amb les mesures de reverberacions reals, obtenint-ne els mateixos descriptors.

Finalment es realitzarà una comparativa entre els descriptors de la reverberació real i l'algorísmica que ens aportarà un resultat analític de com de similars són les dues reverberacions.<sup>3</sup>

## 3.2 Procediment de mesura de les reverberacions reals

El procediment de mesura de les respostes impulsional utilitzat segueix la normativa UNE-EN ISO 3382 en termes de control:

El material necessari per realitzar la mesura és un micròfon omnidireccional de mesura, una font impulsional (un globus o bé un altaveu omnidireccional generant un escombrat de freqüències), una tarja de so i un DAW o bé programari de mesura com REW.

Un cop al recinte s'escullen les posicions de font i receptor, mínim dues diferents per cada un, tenint en compte el següent:

- les posicions de font s'ubiquen on normalment es situen les fonts sonores naturals del recinte
- l'altura de les fonts ha de ser  $> 1.5\text{m}$  respecte el terra
- les posicions de receptor s'ubiquen on normalment es situen els oients
- les posicions del receptor han de ser representatives del total de l'espai
- les posicions del receptor han d'estar allunyades aproximadament  $2\text{m}$  entre elles
- els micròfons han d'estar allunyats aproximadament  $1\text{m}$  de la superfície reflectant més propera
- s'ha d'evitar el so directe, per tant intentar allunyar les posicions de receptor al màxim de les posicions de font
- l'altura dels micròfons ha de ser  $> 1.2\text{m}$  respecte el terra

---

<sup>3</sup> Llibre de càlcul de mesura i anàlisi de les diferents reverberacions adjunt a l'Annex C

Un cop escollides les posicions es graven les corresponents respostes impulsional, amb totes les combinacions possibles de font-recepció, excitant el recinte amb la font impulsional i enregistrant amb el micròfon de mesura. En el cas de ser un arxiu d'àudio (si la font impulsional era un globus, per exemple) s'importa al REW per tal de que ho converteixi a resposta impulsional, si la mesura es realitza a través de REW amb un escombrat de freqüències no cal aquest pas ja que aquest mateix et mostra els resultats com a resposta impulsional.

### 3.3 Caracterització de les reverberacions

Per tal d'analitzar les respostes impulsional, tant dels recintes reals com de la reverberació algorísmica, s'han extret els següents descriptors:

- **Temps de reverberació per bandes de terç d'octava (TR30):** Temps de decaiguda basat en el pendent de la corba de Schroeder entre -5 dB i -35 dB, per a cada banda.
- **Temps de decaïment de les primeres reflexions (EDT):** Temps de decaiguda de les primeres reflexions, basat en el pendent de la corba de Schroeder entre 0 dB i -10 dB.
- **Claredat per la música (C80):** La relació d'energia entre les reflexions primeres i les tardanes en dB, utilitzant l'energia sonora en els primers 80 ms com a part "primera". El C80 s'utilitza més sovint com a indicador de la claredat de la música.
- **Temps central (T<sub>s</sub>):** El temps del "centre de gravetat" de la resposta impulsional al quadrat, semblant a un centroide temporal.

(Mulcahy, s.d.)

- **Brillantor (Br):** Ràtio entre el T30 de les bandes de freqüència més agudes i les mitges.
- **Bass Ratio (BR):** Ràtio entre el T30 de les bandes de freqüència més greus i les mitges.
- **Densitat d'ecos** a través dels descriptors: creixement de la densitat d'ecos ( $n$ ) i l'instant de transició de primeres reflexions a tardanes ( $T_{mix}$ ). (Tukuljac et al., 2019)



- **Densitat de modes** (modes/Hz): consisteix en la quantitat de modes presents per Hz, aquest descriptor s'ha extret de forma manual amb el detector de ressonàncies de REW i fent un càlcul de quantitat de ressonàncies per Hertz a posteriori.

Aquests descriptors han estat escollits ja que, en primer lloc són els estàndards dels programes d'anàlisi de respostes impulsional com REW, Dirac<sup>4</sup> o Odeon<sup>5</sup>.

I en segon lloc seguint els següents paràmetres per caracteritzar suficientment el grau de realisme i propietats de cada reverberació que volem, tenint en compte que:

- Ha de tenir un decaïment del nivell global al llarg del temps
- Ha de tenir un creixement exponencial de reflexions, o de densitat d'aquestes
- Un temps de decaïment més llarg o més curt ens poden situar a un lloc més gran o més petit
- Ha de tenir una resposta freqüencial àmplia i tendint a plana, amb més caràcter modal a les freqüències greus
- Tenim una percepció tímbrica diferent per cada espai
- Tenim una percepció de la comprensió diferent per cada espai
- Les diferents caracteritzacions de les primeres reflexions de la reverberació versus les reflexions tardanes

Aquests paràmetres solen caracteritzar espais acústics amb reverberacions desitjables en un context musical, i que per tant esdevenen un bon punt de partida per dissenyar reverberacions algorísmiques amb unes característiques semblants.

### 3.4 Implementació de la reverberació algorísmica

La reverberació algorísmica serà implementada en Faust<sup>6</sup>, un llenguatge de programació orientat a la síntesi de so i al processament d'àudio. (*Faust Programming Language*, s.d.) Faust té avantatges respecte d'altre programari semblant com Max: tot i ser un llenguatge basat en text, les instruccions de flux d'àudio segueixen metàfores gràfiques, addicionalment ofereix una àmplia llibreria d'objectes destinats a la creació

---

<sup>4</sup> Dirac: <https://www.acoustics-engineering.com/html/dirac.html>

<sup>5</sup> Odeon: <https://odeon.dk/>

<sup>6</sup> Faust: <https://faust.grame.fr/>

de reverberacions algorísmiques i exemples d'efectes ja fets, mostrant el diagrama del codi implementat a temps real i permetent navegar-hi. Aquesta prestació és molt pràctica sobretot a l'hora d'estudiar els exemples proporcionats. També permet exportar el projecte en múltiples formats i per diferents plataformes.

Per tal d'implementar la reverberació amb FAUST s'ha seguit el següent model de Geraint Luff (Luff, s.d.) ja que està molt ben descrit, detallat i mescla diferents estructures típiques de reverberació algorísmica sobre una base de FDN, l'estructura de reverberació algorísmica que et permet modificar més els diferents paràmetres independentment. (Abel & Huang, 2006)

És una reverberació molt estable, evitant el típic inconvenient de moltes reverberacions algorísmiques que estan "afinades" de forma precisa per un resultat concret però en variar els paràmetres deixa de sonar correctament. Aquest model de Luff permet crear des de reverberacions molt curtes fins a reverberacions de grans dimensions. (Luff, s.d.)

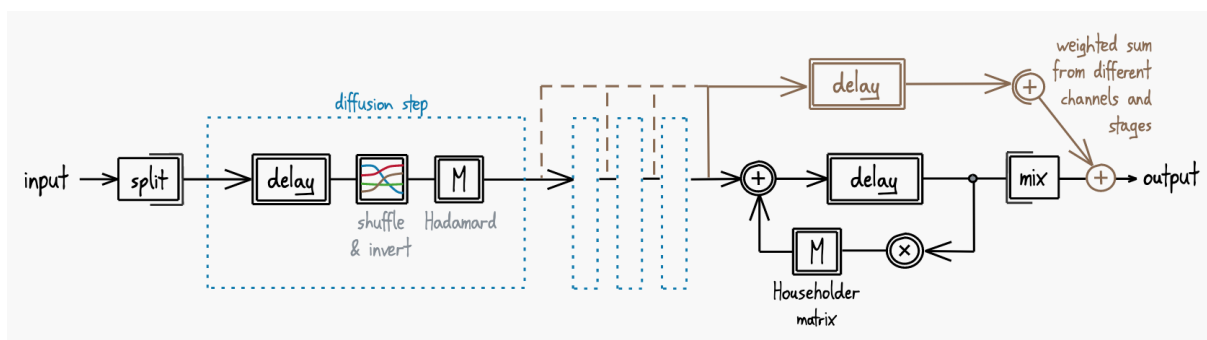


Figura 3.4-1: Esquema final del disseny de reverberació de Geraint Luff, utilitzant passos de difusió, primeres reflexions i una FDN. Imatge extreta de "Let's Write a Reverb".

L'algorisme dissenyat, seguint el seu mateix esquema, consta de tres elements bàsics:

- A. Reflexions primeres
- B. Difusió
- C. FDN

En el següent diagrama de flux de Faust podeu veure cadascun dels elements, que comentarem tot seguit.

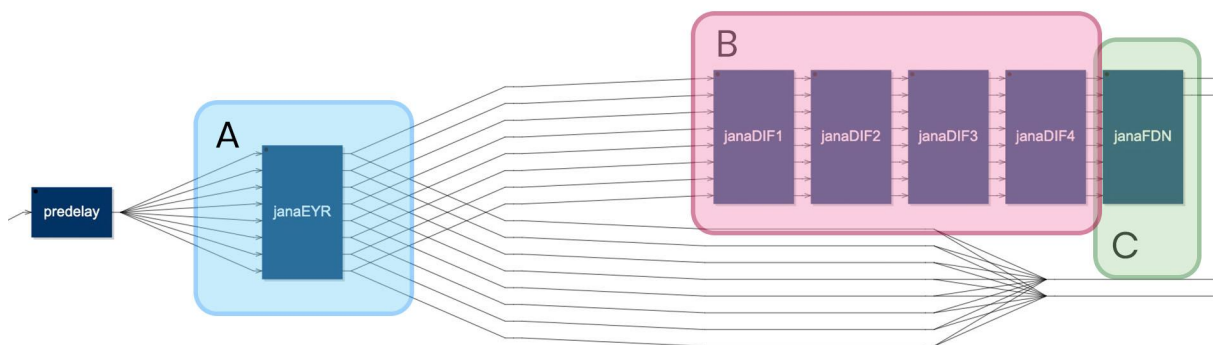


Figura 3.4-2: Esquema del fragment principal de la reverberació implementada.

### 3.4.1 Reflexions primeres (A)

Com s'ha comentat anteriorment al segon capítol les primeres reflexions són aquelles que arriben primer a les orelles de l'oient, ja que prenen el camí més curt, rebotant un mínim de cops sobre les superfícies. Així doncs les reflexions primeres de la reverberació implementada, intentaran modelar aquests primers rebots rebuts per l'oient a través de 8 línies de retard que s'envien directament a la sortida, i alhora alimenten la FDN a través dels difusors, amb un guany independent per cada retard per tal de controlar quina quantitat d'energia aporta cada reflexió. A diferència del model descrit per Geraint Luff, s'ha decidit col·locar-les a l'inici, justament per simular la física d'una sala, on primer reps les primeres reflexions i més tard la cua, la qual està formada per les reflexions d'aquestes primeres reflexions.

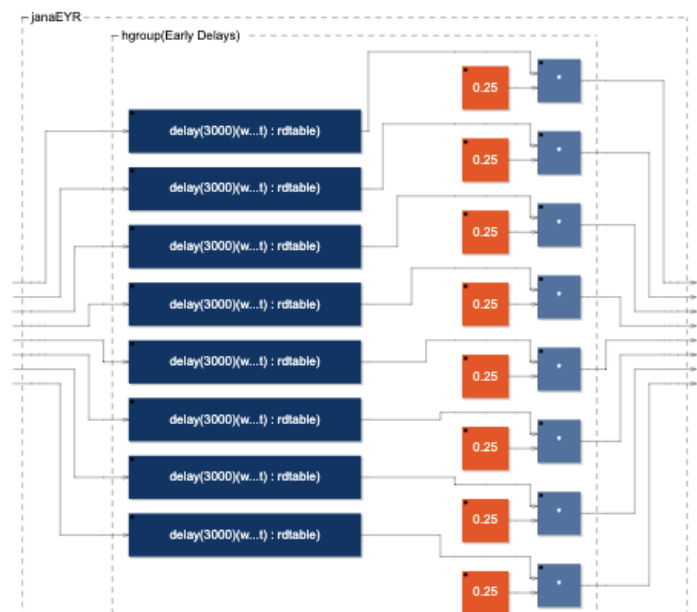


Figura 3.4-3: Esquema de les primeres reflexions implementades.

### 3.4.2 Difusió (B)

La difusió ajuda a generar reflexions per a que la reverberació tingui més textura i sigui més realista, escapant del so metàl·lic i molt ressonant dels filtres de pinta. Així doncs cada grup de difusió (janaDIF1, janaDIF2...) consta de quatre elements, o passos per aconseguir aquest objectiu:

- Línies de retard
- Canvi de ruteig
- Canvi de polaritat
- Matriu Hadamard

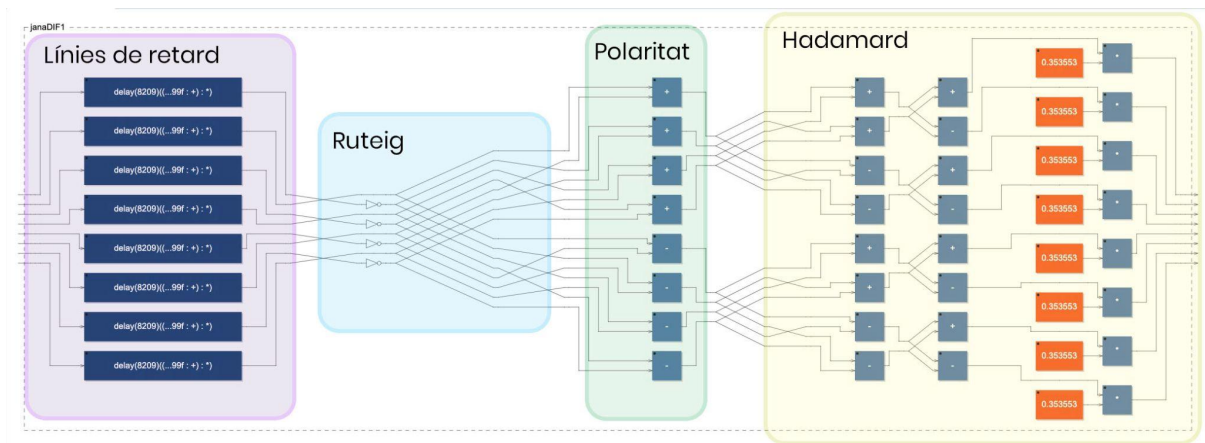


Figura 3.4-4: Esquema del pas de difusió implementat.

És una forma molt més senzilla de generar difusió, que fa més fàcil i intuïtiva la tria de paràmetres que no pas els filtres passa-tot que proposava Schroeder. Les línies de retard creen reflexions, que es reordenen amb un canvi de ruteig i de polaritat diferent a cada etapa de difusió, i finalment la matriu Hadamard aconsegueix que totes les línies contribueixin a la resta de línies, per tant fa créixer exponencialment la quantitat de reflexions generades als anteriors passos.

### 3.4.3 FDN (C)

La FDN tal com s'ha definit al capítol anterior consisteix en una matriu de línies de retard on s'entrecreuen les seves sortides a través de la retroalimentació i una matriu. Així doncs la FDN implementada en aquesta reverberació algorísmica consta de cinc elements:

- Línies de retard
- Modulació de baixa freqüència a les línies de retard
- Banc de filtres passa-banda
- Guanys per controlar la retroalimentació
- Matriu de Hadamard

He escollit la matriu Hadamard, tot i que al model proposa una matriu Householder, ja que només la matriu Householder d'ordre 4 conté totes les reflexions d'igual magnitud. La meua reverberació en ser de 8 canals m'obligava a doblar la Householder, fet que impedia la mescla de tots els retards, és a dir, dividia en dos la FDN, i per tant obtenia menys densitat de reflexions.

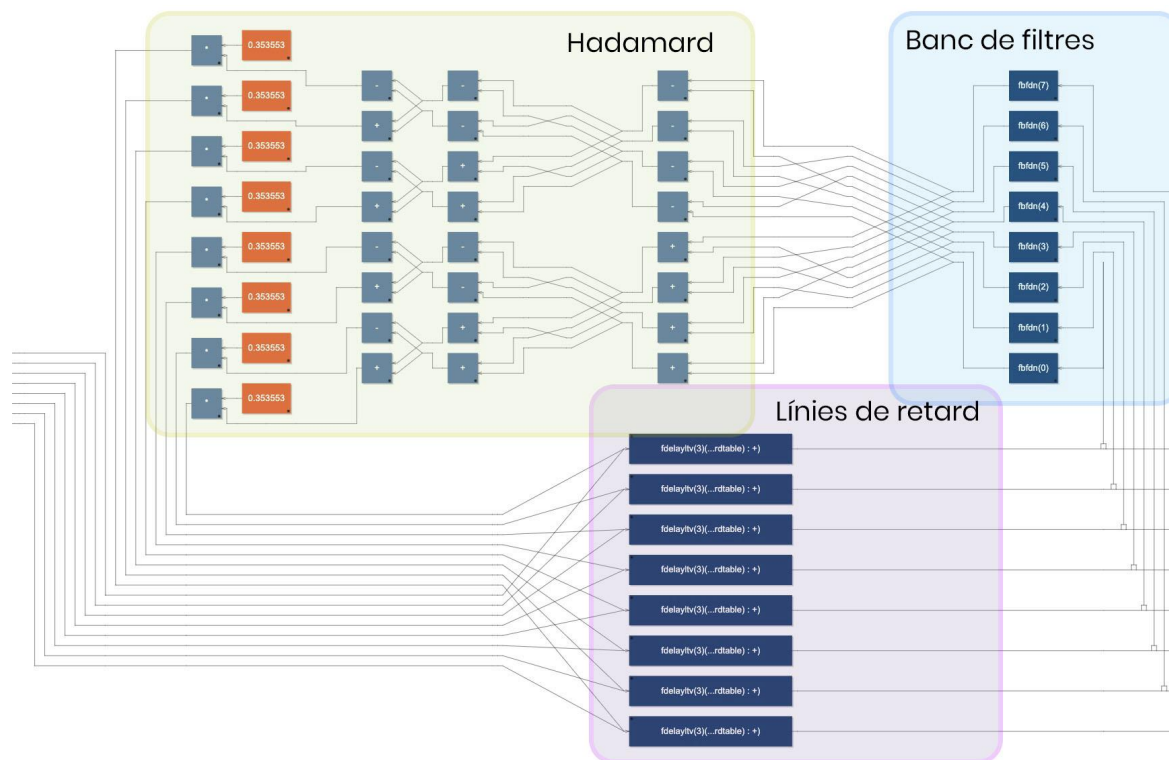


Figura 3.4-5: Esquema de la FDN implementada.

Les línies de retard aporten, com a la difusió, noves reflexions. Aquestes línies de retard compten amb una modulació de baixa freqüència que varia els valors dels retards, no més de 5Hz ni més de 8 mostres de profunditat de modulació, si no, es perceben canvis d'afinació en el so. Aquestes modulacions estan pensades per simular les petites variacions que pot patir una sala, des de petits canvis de temperatura, moviment de l'aire, o fins i tot els petits moviments de l'oient que desplacen la posició de les seves orelles i alhora esmorteix, en la mesura del possible, les ressonàncies.

L'estructura de retroalimentació permet una generació controlada de reflexions. Aquest control s'obté a partir d'un guany al camí de retroalimentació, si el guany és menor a 1, a cada cicle les reflexions perdran energia, causant així el típic decaïment d'una reverberació. Portant més enllà aquesta idea del guany de retroalimentació, a diferència del model que només utilitza un únic passa-baixes, s'ha implementat el banc de filtres passa-banda, per poder controlar el decaïment de la reverberació per bandes a partir de la variació del guany de cada banda. Finalment l'estructura té una matriu Hadamard, altre cop com a la difusió, per multiplicar la quantitat de reflexions obtingudes..

Per completar la reverberació s'han inclòs una sèrie d'extres presents en la majoria de reverberacions algorísmiques: un retard previ entre el so directe i el reverberant (*pre-delay*) que és clau per modelar les dimensions de la reverberació, un filtre passa-baixes general per controlar subtilment la tímbrica de la reverberació general, i un *wet-dry* i un volum de màster ja que són paràmetres estandarditzats en els *plugins* de processament.<sup>7</sup>

Un cop obtinguda l'estructura general de la reverberació s'ha implementat una interfície gràfica per poder controlar còmodament els diferents paràmetres de cadascun dels elements:



Figura 3.4-6: Interfície gràfica de la reverberació implementada

<sup>7</sup> El codi complet es troba adjuntat a l'Annex A

Un cop implementada i provada la reverberació hem pogut observar que l'estructura escollida presenta una sèrie d'avantatges i desavantatges.

Com s'ha esmentat anteriorment, una FDN és un algorisme de reverberació molt versàtil i et permet modificar acuradament i més independentment els diferents paràmetres de la reverberació, aquesta configuració de Geraint Luff permet fer reverberacions molt variades, tant curtes i imitant recintes petits com reverberacions enormes i amb una tria de valors molt més intuïtiva i no tant a base de prova-error.

Tot i així l'estructura escollida té un seguit d'inconvenients:

- No permet el control freqüencial de les primeres reflexions
- Augmentar i disminuir la difusió és difícil de parametritzar ja que consisteix en un canvi de l'estructura principal de la reverberació (eliminar o afegir passos de difusió).
- Les reflexions tardanes, en alimentar-se de les reflexions primeres, i per tant partint dels temps de retard d'aquestes, creixen lentament i força separades de les primeres reflexions, no permetent així una transició tan fluïda entre reflexions primeres i tardanes com podem observar en la reverberació de molts espais reals.

### 3.5 Parametrització

L'objectiu d'aquest treball és controlar la reverberació algorísmica amb els descriptors perceptivament rellevants descrits anteriorment, no modificant els diferents paràmetres de forma individual, així doncs cal un procés de parametrització dels controls.

Cadascun dels descriptors està relacionat amb un, o més d'un, paràmetre de la reverberació algorísmica implementada. Així doncs, per tal de poder establir aquestes relacions i aplicar-les a la implementació d'una interfície de control més pràctica de la reverberació, s'ha dut a terme un procés d'anàlisi i comparativa entre valor del paràmetre modificat i valor mesurat del descriptor corresponent. Un cop obtinguda la gràfica comparativa se n'ha extret l'equació de regressió que escalarà el paràmetre corresponent, observant quina de les estratègies de regressió (lineal, exponencial o polinòmica) s'acurava més.

### 3.5.1 Temps de reverberació

El temps de reverberació està directament relacionat amb els respectius guanys del banc de filtres de la FDN i amb el guany de retroalimentació, també de la FDN.

És l'únic descriptor del qual hi ha una fórmula tancada, segurament per el seu ús habitual i perquè és la característica principal d'una reverberació, general per controlar en diferents estructures de reverberacions algorísmiques. Per una FDN és la següent:

$$20\log(|h|) = \frac{-60T_s}{T_{30}(\omega)} M \quad \text{on } M \text{ és el retard i } h \text{ és la magnitud del filtre. (Pirkle, 2013)}$$

En implementar l'equació al codi s'ha utilitzat la fórmula que inclou l'exemple de FDN pròpia de Faust:

$$g = e^{\frac{-3\log(10) \cdot M}{T_{30}(\omega) \cdot SR}} \quad \text{on } g \text{ és el guany de la banda, } M \text{ el retard i } SR \text{ la freqüència de mostreig.}$$

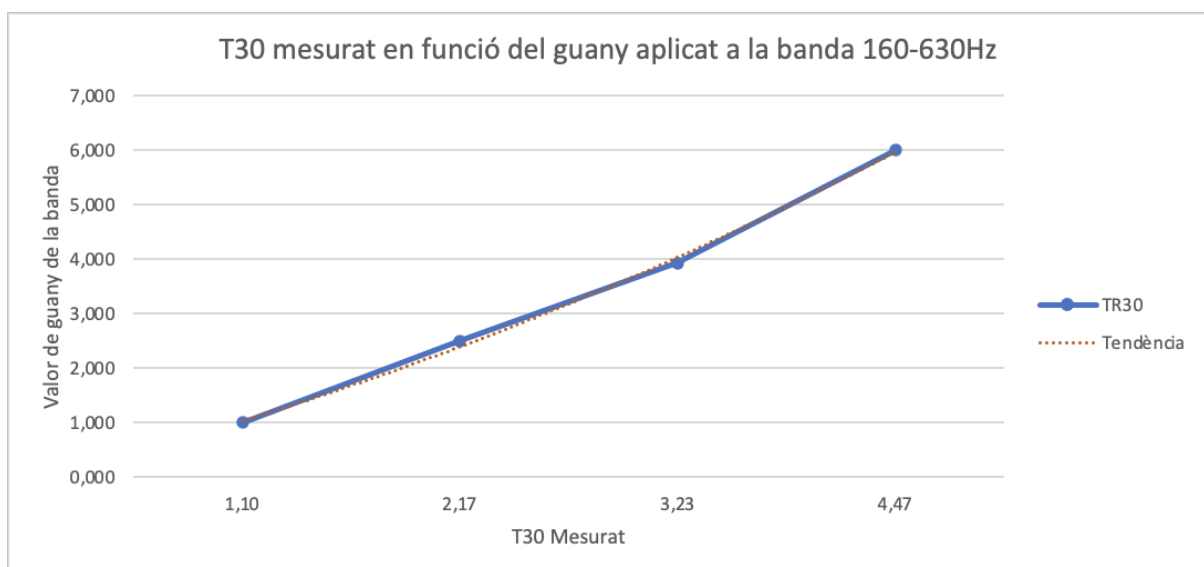


Figura 3.5-1: Gràfica sobre la relació entre el T30 mesurat i el guany aplicat a la banda de 160-630Hz.

L'equació de regressió corresponent a la gràfica de T30 és la següent:

$$y = 0.06406406x^2 + 1.115902x - 0.2845164$$

### 3.5.2 Temps de decaïment de les primeres reflexions

El temps de decaïment de les primeres reflexions està relacionat amb la durada total de les primeres reflexions sintetitzades, és a dir amb la quantitat de retard de la línia de retard més llarga d'aquestes.



Tot i que aquest descriptor també es mostra per bandes al REW, se n'ha fet una mitjana ja que la nostra estructura de reverberació no permet tenir un control per bandes freqüencials de les primeres reflexions.

Per tal de parametritzar l'espai entre els valors de retard de les primeres reflexions, s'han escollit uns valors model i s'escalaran segons la mida de la sala. Així doncs el paràmetre utilitzat per obtenir els següents valors és l'escalatge de les reflexions primeres.

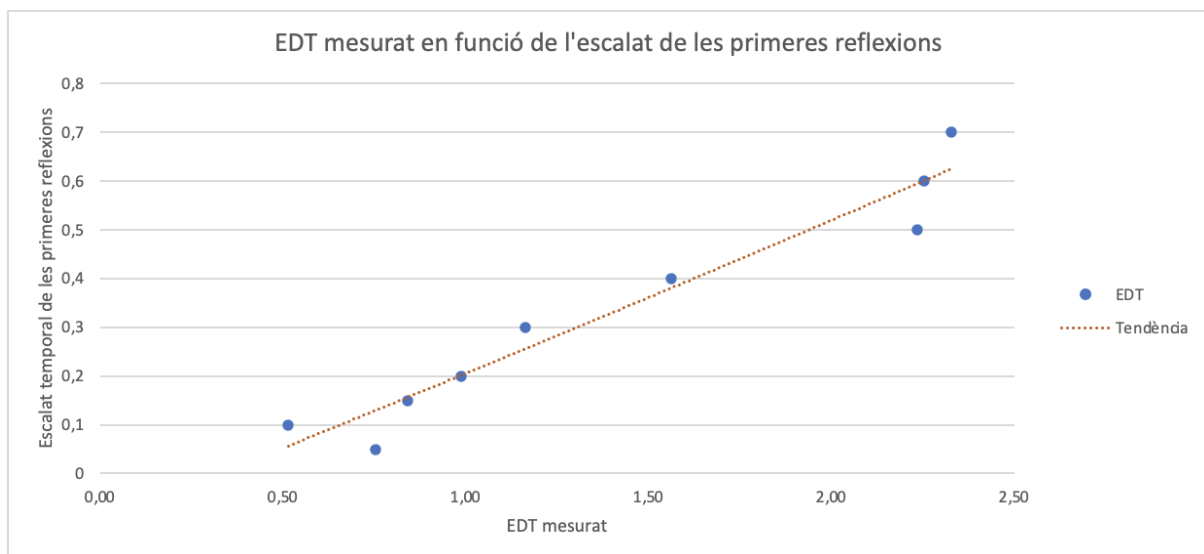


Figura 3.5-2: Gràfica sobre la relació entre l'EDT mesurat i l'escalatge de les primeres reflexions.

L'equació de regressió corresponent és:

$$y = 0.313206x - 0.106199$$

### 3.5.3 Claredat per la música

La claredat és la ràtio entre l'energia de les primeres reflexions i l'energia de les tardanes, la podem controlar a partir d'un guany a la sortida de la FDN, que ens permetrà tenir més claredat quan menys quantitat de reflexions tardanes tinguem (és a dir menys energia de reflexions tardanes).

$$C80 = 10 \log \left( \frac{\text{Energia total de les primeres reflexions}}{\text{Energia total de les reflexions tardanes}} \right)$$

La claredat també es mostra per bandes al REW, però se n'ha fet una mitjana ja que la nostra estructura de reverberació no permet tenir un control per bandes freqüencials de l'energia total de les reflexions tardanes i que no afecti als valors de T30.

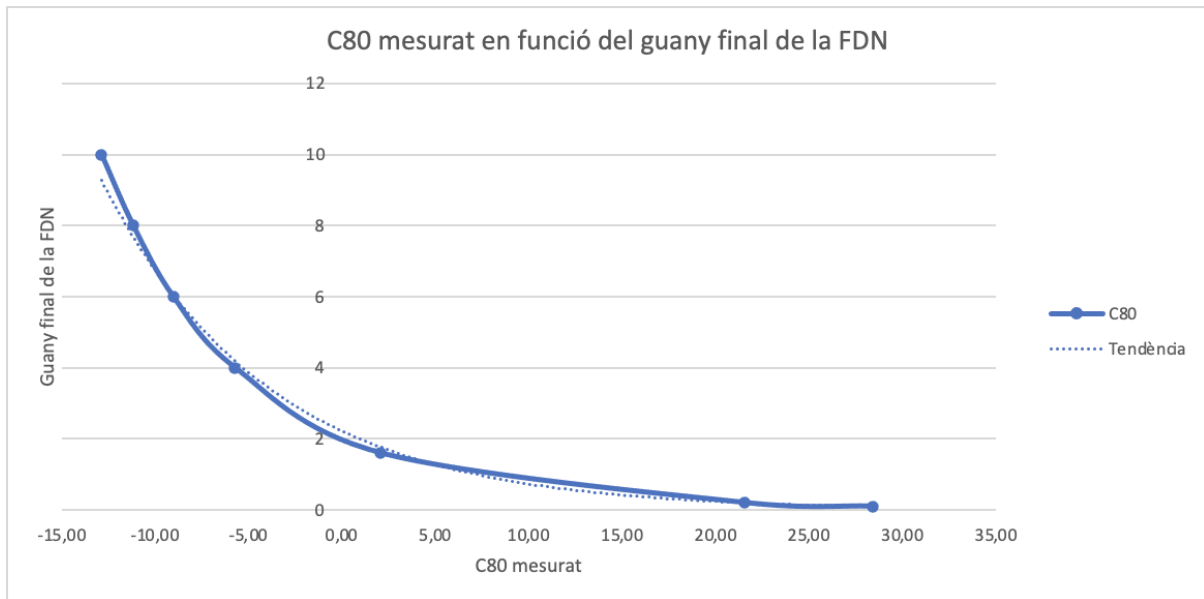


Figura 3.5-3: Gràfica de la relació entre el C80 mesurat i el guany aplicat a posterior de la FDN.

Equació de regressió:

$$y = 0.01177255x^2 - 0.3860948x + 2.176421$$

### 3.5.4 Temps central

El temps central mostra quin moment de la reverberació té més energia. Com que la FDN genera una cua sempre amb una forma de decaiguda similar, qui determina on hi ha més energia a la reverberació és el temps de retard del difusor, que a més a més de determinar en quin moment comença a difondre també determina com de ràpid difon (és a dir com de ràpid creix la densitat de reflexions). També hi influeix, lleugerament, com de llarga és la cua produïda per la FDN.

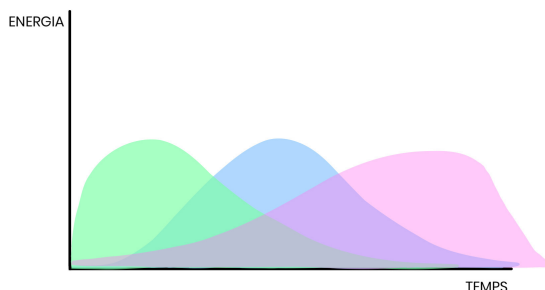


Figura 3.5-4: Esquema-gràfica de la relació entre el temps de retard del difusor i el temps central. Aquest esquema ens mostra com diferents temps de retard del difusor (rosa, verd, blau), determinen en quin moment de la reverberació hi ha més energia.

Aquest descriptor també es mostra per bandes al REW, però se n'ha fet una mitjana ja que la nostra estructura de reverberació no permet tenir un control per bandes freqüencials del difusor.

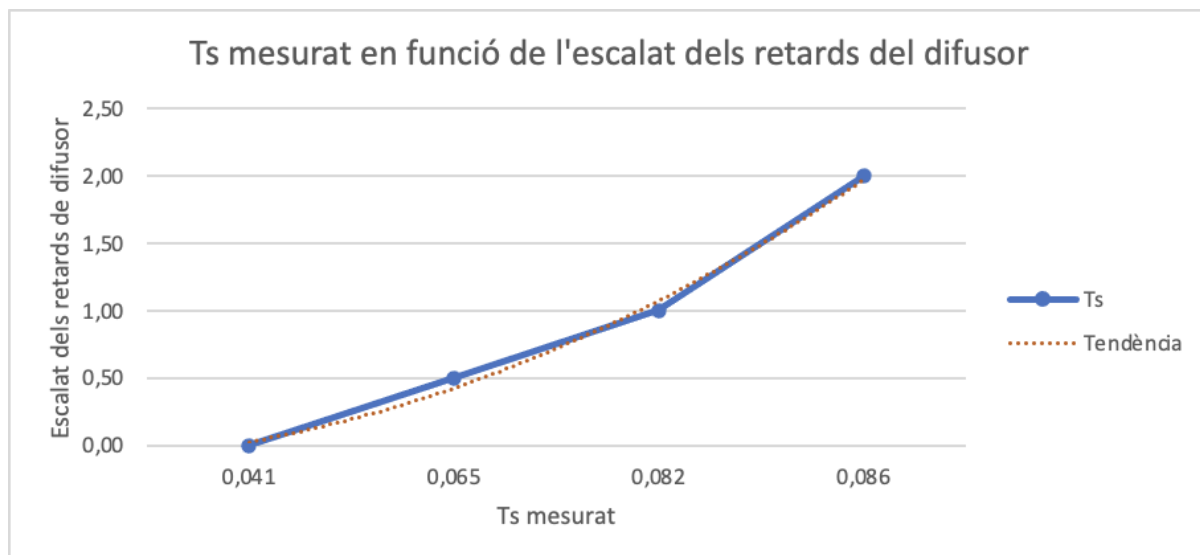


Figura 3.5-5: Gràfica de la relació entre el temps central mesurat i l'escalat dels retards del difusor.

Equació de regressió:

$$y = 1229.282x^2 - 120.5801x + 2.861878$$

### 3.5.5 Brillantor i *Bass Ratio*

Tot i mostrar-los com a descriptors, perquè donen una bona idea general del timbre de la reverberació, no caldrà parametritzar-los ja que provenen directament d'un càlcul lineal del temps de reverberació, per tant parametritzant el temps de reverberació automàticament s'obté la brillantor i la ràtio de greus desitjada.

### 3.5.6 Densitat d'ecos: creixement i temps de transició entre primeres reflexions i tardanes

Tal com s'ha esmentat anteriorment, el creixement de la densitat d'ecos vindrà donada pel temps de retard del difusor. Com menor sigui el temps de retard més ràpid creixerà la densitat d'ecos ja que la separació entre reflexions serà molt reduïda i apareixen més reflexions en menys temps. Així doncs el paràmetre que controlarem per variar aquest descriptor (n) serà un escalat dels retards de difusió.

El temps de transició, el pas entre les primeres reflexions i les tardanes, vindrà donat segons la suma de tots els retards del difusor, o temps total de retard abans de sonar la FDN. Així doncs està relacionat amb el retard de la primera reflexió més tardana i més directament amb l'escalat dels temps de retard dels difusors.

En l'esquema d'aquesta reverberació el descriptor del temps de transició ( $T_{mix}$ ) modifica el mateix paràmetre que el temps central, l'escala dels temps dels retards dels difusors. Així doncs s'han valorat els dos descriptors i s'ha decidit utilitzar el descriptor del temps central per tal de parametritzar l'escala dels retards ja que té una tendència més definida i estable.

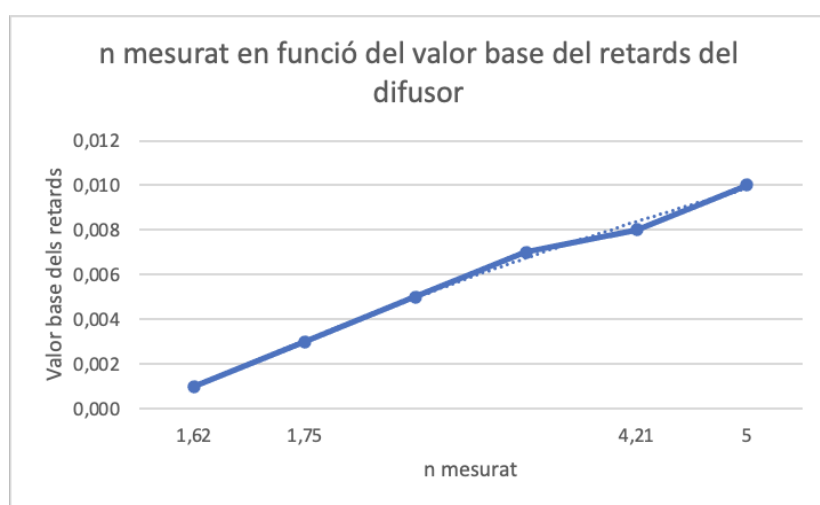


Figura 3.5-6: Gràfica de la relació entre l'índex de creixement de la densitat d'ecos i el valor base dels retards del difusor.

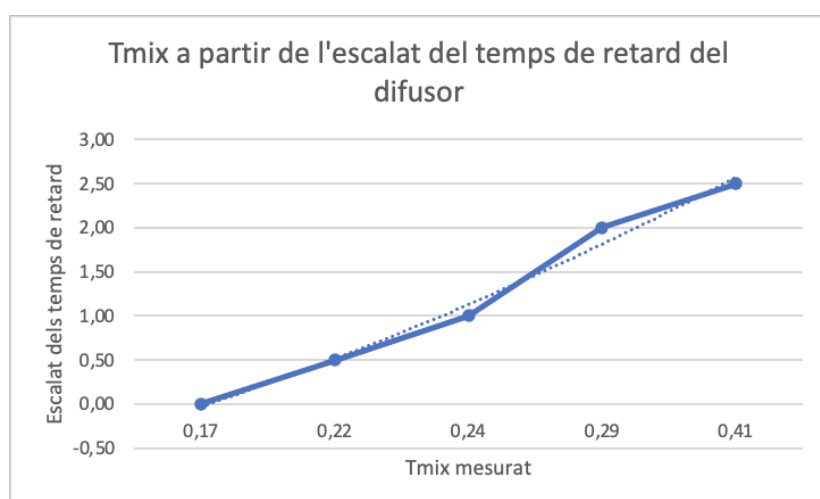


Figura 3.5-7: Gràfica de la relació entre el  $T_{mix}$  i l'escalat del temps de retard del difusor.

De la gràfica de l'índex de creixement de la densitat de reflexions (n), s'ha extret la següent equació de regressió:

$$y = -0.00008638852x^2 + 0.002970774x - 0.002797545$$

### 3.5.7 Densitat modal

A la percepció de la densitat modal hi influeixen quatre aspectes de l'esquema de la reverberació implementada: la quantitat de difusió, la modulació, la separació entre les línies de retard i l'harmonicitat dels valors de retard.

La quantitat de difusió es parametriza canviant la ruta del senyal, segons si passa per més o menys difusors.

La modulació permet una percepció de reverberació amb més densitat modal ja que varia a baixa freqüència els retards de la FDN fent que les principals ressonàncies dels diferents retards variïn lleugerament la seva posició freqüencial i per tant es percebi com molts modes actuant simultàniament a prop de la mateixa zona freqüencial.

La separació entre els valors de retard, molt relacionada amb l'harmonicitat dels retards, també afecta a la densitat modal ja que amb valors de retard molt pròxims entre ells la densitat modal serà més reduïda ja que es trobaran aproximadament tots al voltant de la mateixa freqüència de ressonància, mentre que si estan més separats abastin més rang freqüencial.

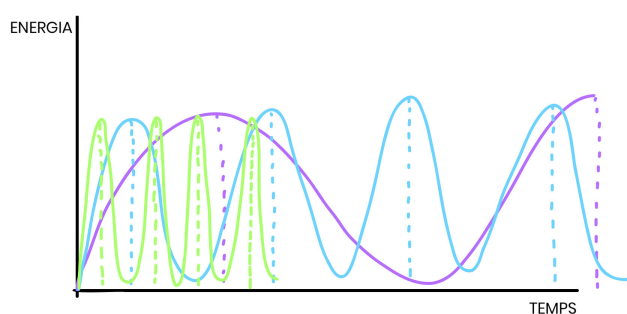


Figura 3.5-8: Esquema-gràfica de la relació entre la distància entre retards i la densitat modal. Aquest esquema ens mostra com segons la distància entre els valors de retard la resposta freqüencial d'aquests es concentrarà més o menys en una ressonància.

L'harmonicitat dels valors de retard actualment està implementada en valor "òptim" ja que per tots els retards s'han buscat nombres primers, per tal d'assegurar que no tinguessin cap relació de múltiples entre ells. Tot i així es podria buscar el so metàl·lic i

l'efecte filtre de pinta forçant aquests nombres primers a aproximar-se a valors múltiples entre ells.

A partir de la parametrització, s'ha arribat a la conclusió que els valors analitzats pel descriptor de densitat modal no s'adapten a les necessitats d'anàlisi que té aquest treball. Per tal d'extreure el valor de densitat modal, s'utilitzava el buscador de ressonàncies de REW, el qual no mostra tots els pics existents sinó que mostra les ressonàncies més prominents. Així doncs obtenim, a mesura que s'augmenten els paràmetres cap a més densitat modal, una disminució en la densitat dels modes principal però no una informació sobre l'augment de la densitat de modes de baixa amplitud.

Per altra banda, per tal de comprovar si tenien un caràcter molt diferent segons la duració de la cua, es van analitzar els valors per  $T30 = 1s$  i  $T30 = 3s$ .

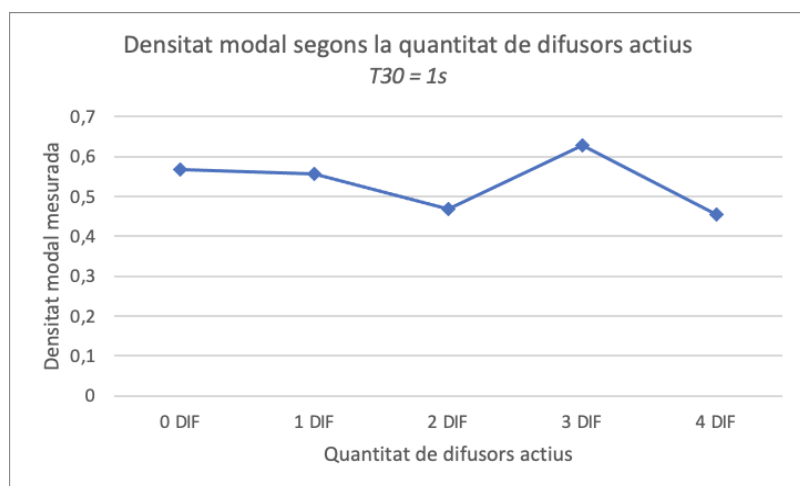


Figura 3.5-9: Gràfica de la relació entre la densitat modal i la quantitat de difusió, amb un temps de reverberació d'un segon.

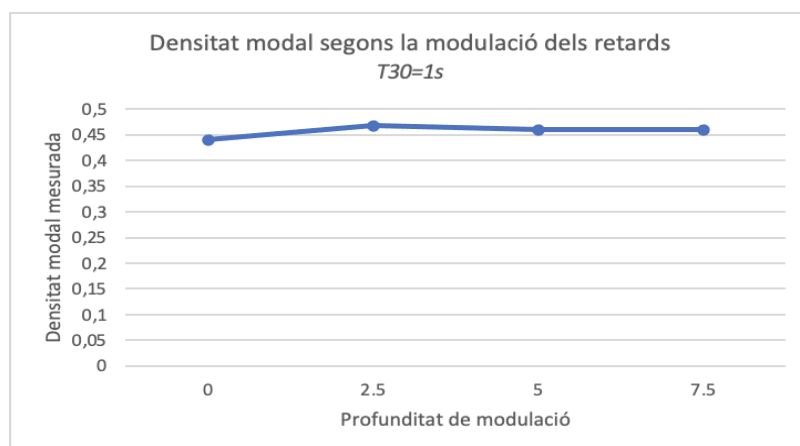


Figura 3.5-10: Gràfica de la relació entre la densitat modal i la modulació dels retards, amb un temps de reverberació d'un segon.

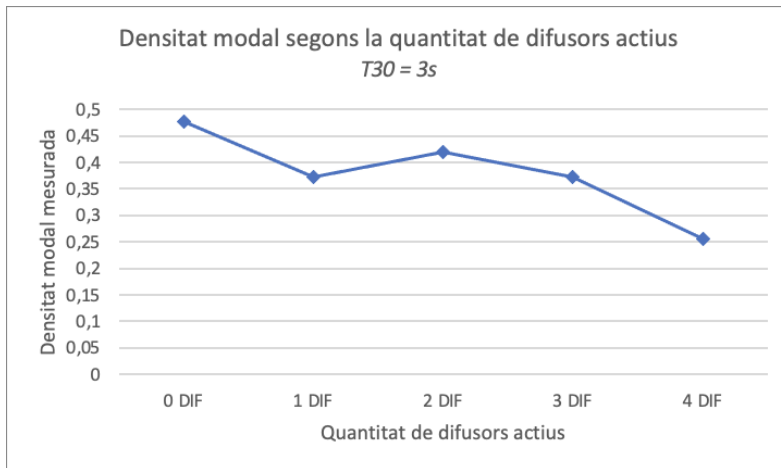


Figura 3.5-11: Gràfica de la relació entre la densitat modal i la quantitat de difusió, amb un temps de reverberació de tres segons.

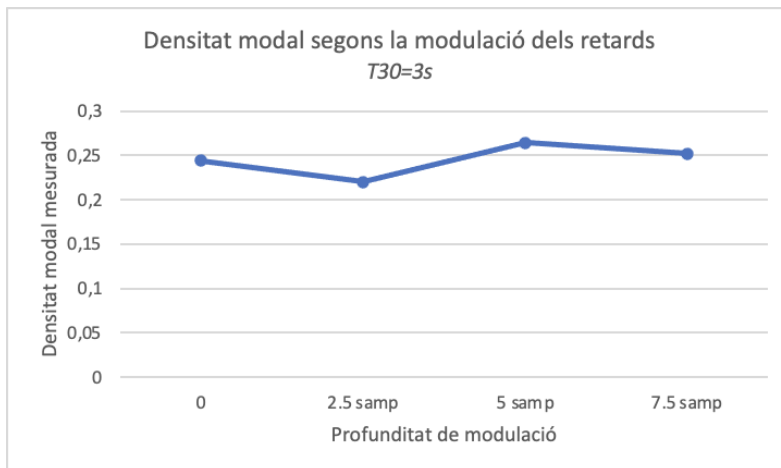


Figura 3.5-12: Gràfica de la relació entre la densitat modal i la modulació dels retards, amb un temps de reverberació de tres segons.

Com es pot veure a les gràfiques la densitat tendeix a baixar, és a dir a perdre ressonàncies prominents, quants més difusors hi apliquem, especialment amb una reverberació més llarga. Per altra banda, segurament a causa de que REW només mesura les ressonàncies prominents, no es veu una gran aportació per part de la modulació dels retards a disminuir la densitat modal. És per aquests motius que s'ha decidit excloure el descriptor de densitat modal per l'anàlisi i parametrització d'aquest treball.

### 3.6 Implementació de la reverberació parametritzada

L'objectiu d'implementar una reverberació amb una interfície més pràctica és oferir un control a alt nivell, perceptiu, que automatitzi de forma simplificada la parametrització

completa de la reverberació algorísmica, és a dir on s'hi puguin inserir directament les dades dels descriptors.

Per tal d'implementar-la s'ha utilitzat cada una de les equacions de regressió per mapejar els controladors segons els descriptors objectiu.

Obtenint així una interfície més senzilla i amb menys elements controlables:<sup>8</sup>

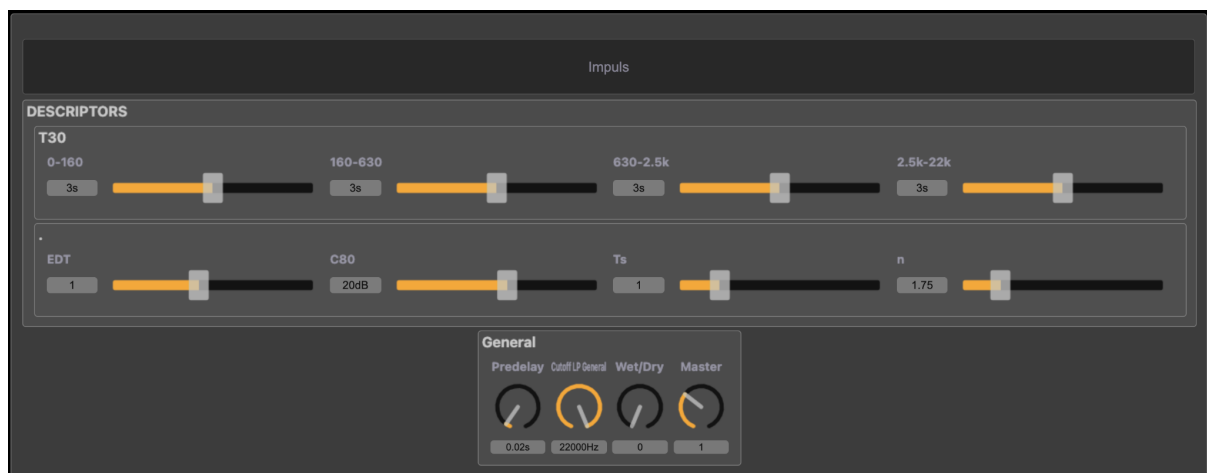


Figura 3.6-1: Interfície gràfica de la reverberació implementada amb els descriptors com a controladors.

Un pas addicional en la simplificació de l'ús d'aquesta reverberació podria ser definir i emmagatzemar diferents configuracions dels paràmetres o *presets*, corresponents a diferents reverberacions objectius. Una prestació que, malauradament, no és trivial d'incorporar en Faust ja que no et permet actualitzar els valors dels diferents controladors a partir d'un botó.

## 3.7 Anàlisi comparativa entre les reverberacions reals i la seva parametrització algorísmica

### 3.7.1 Mostra de referència

Tal com s'ha descrit a l'inici, després de mesurar algunes reverberacions reals, decidir com es caracteritzaven aquestes reverberacions, implementar i parametritzar la reverberació, falta definir quines seran les reverberacions de referència per testear la

---

<sup>8</sup> El codi complet es troba adjuntat a l'Annex B



reverberació implementada i analitzar-les amb els descriptors finalment escollits i parametritzats en la reverberació sintètica.

Per tal d'obtenir una mostra variada, i així poder avaluar la fiabilitat i versatilitat de la reverberació implementada, s'han escollit tres espais amb una reverberació molt diferent entre ells: una cabina d'estudi petita de l'ESMUC, un passadís d'una casa residencial i la sala de cor de l'ESMUC.<sup>9</sup>

De la cabina d'estudi, en ser un recinte molt petit i sec, s'espera una decaiguda ràpida de la reverberació, un nivell de claredat elevat i un creixement ràpid de la densitat de reflexions.

Del passadís s'espera una decaiguda no tan ràpida però tampoc molt extensa, un nivell de claredat més baix i un creixement mitjà de la densitat de reflexions.

De la sala de cor, en ser un recinte molt espaiós, buit i reverberant, s'espera una decaiguda lenta, un nivell de claredat baix i un creixement lent de la densitat de reflexions.

### 3.7.1.1 Anàlisi de les respostes impulsional mesurades

#### 1. Passadís de casa

DESCRIPTORS	MESURA
T30 <sub>Low</sub>	0.47s
T30 <sub>Mid-Low</sub>	0.87s
T30 <sub>Mid-High</sub>	1.07s
T30 <sub>High</sub>	0.71s
EDT	0.65s
C80	9.02dB
T <sub>s</sub>	0.06s
BR	0.68
Br	0.86
n	1.43

Taula 3-1: Llista de valors dels descriptors en l'anàlisi de la mesura del passadís de casa.

<sup>9</sup> Repositori de respostes impulsional generades i mesurades al llarg del treball, així com també lloc de descàrrega del *plugin* final: <https://jblanco944.wixsite.com/sabineaschroeder>

## 2. Sala de cor ESMUC

DESCRIPTORS	MESURA
T30 <sub>Low</sub>	1.04s
T30 <sub>Mid-Low</sub>	1.13s
T30 <sub>Mid-High</sub>	1.80s
T30 <sub>High</sub>	0.97s
EDT	0.89s
C80	7.85dB
T <sub>s</sub>	0.06s
BR	0.57
Br	1.01
n	5

Taula 3-2: Llista de valors dels descriptors en l'anàlisi de la mesura de la sala de cor de l'ESMUC.

## 3. Cabina d'estudi ESMUC

DESCRIPTORS	MESURA
T30 <sub>Low</sub>	0.62s
T30 <sub>Mid-Low</sub>	0.57s
T30 <sub>Mid-High</sub>	0.47s
T30 <sub>High</sub>	0.43s
EDT	0.47s
C80	11.13dB
T <sub>s</sub>	0.04s
BR	1.37
Br	0.92
n	4.99

Taula 3-3: Llista de valors dels descriptors en l'anàlisi de la mesura d'una cabina d'estudi de l'ESMUC.

### 3.7.1.2 Anàlisi de les respostes impulsional sintetitzades

#### 1. Passadís de casa artificial

DESCRIPTORS	MESURA
T30 <sub>Low</sub>	0.33s
T30 <sub>Mid-Low</sub>	0.80s
T30 <sub>Mid-High</sub>	0.85s
T30 <sub>High</sub>	0.35s
EDT	0.15s
C80	26.70dB
Ts	0.02s
BR	0.64
Br	0.75
n	5

Taula 3-4: Llista de valors dels descriptors en l'anàlisi de la síntesi del passadís de casa.

#### 2. Sala de cor ESMUC artificial

DESCRIPTORS	MESURA
T30 <sub>Low</sub>	0.63s
T30 <sub>Mid-Low</sub>	0.98s
T30 <sub>Mid-High</sub>	1.28s
T30 <sub>High</sub>	0.58s
EDT	0.15s
C80	27.48dB
Ts	0.02s
BR	0.89
Br	0.99
n	1.52

Taula 3-5: Llista de valors dels descriptors en l'anàlisi de la síntesi de la sala de cor de l'ESMUC.

#### 3. Cabina d'estudi ESMUC artificial

DESCRIPTORS	MESURA
T30 <sub>Low</sub>	0.83s
T30 <sub>Mid-Low</sub>	0.71s
T30 <sub>Mid-High</sub>	0s

T30 <sub>High</sub>	0.24s
EDT	0.39s
C80	31.93dB
T <sub>s</sub>	0.02s
BR	1.35
Br	0.01
n	5

Taula 3-6: Llista de valors dels descriptors en l'anàlisi de la síntesi d'una cabina d'estudi de l'ESMUC.

Per tal de fer una comparativa gràfica entre les dues reverberacions (real i artificial del mateix recinte) s'han utilitzat gràfiques radials, escalades logarítmicament per millorar-ne la visualització. S'han fet dues gràfiques per cada recinte, la primera del temps de reverberació, aprofitant que està separat per bandes, i la segona amb la resta de descriptors. Aquesta separació s'ha fet per qüestions de claredat.

També s'ha calculat la distància euclidiana entre les dues reverberacions per tal d'obtenir una diferència numèrica. S'han escalat els valors de 0 a 5 perquè el canvi d'unitat no influís en la distància obtinguda.

### 3.7.1.3 Passadís de casa

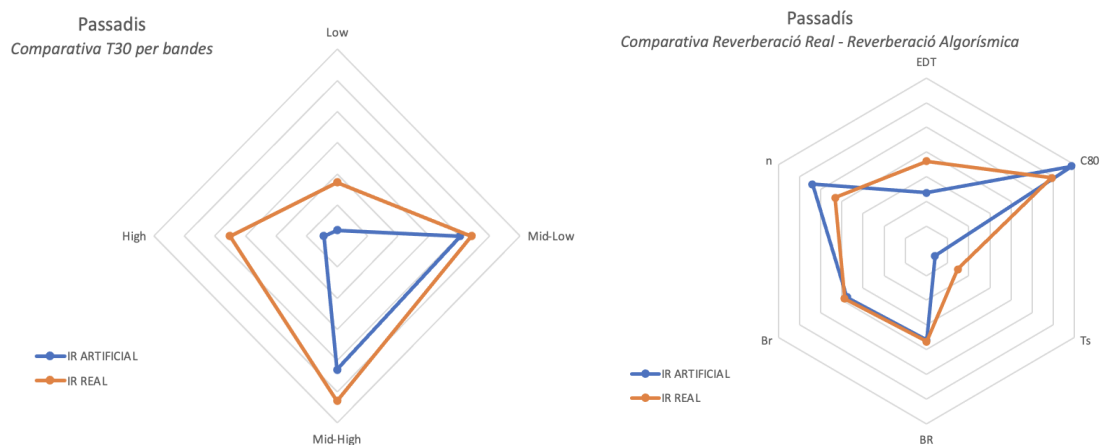


Figura 3.7-1: Comparativa entre la mesura de la reverberació real i la reverberació artificial del passadís de casa.

Distància euclidiana: **3.379/5**

### 3.7.1.4 Sala de Cor

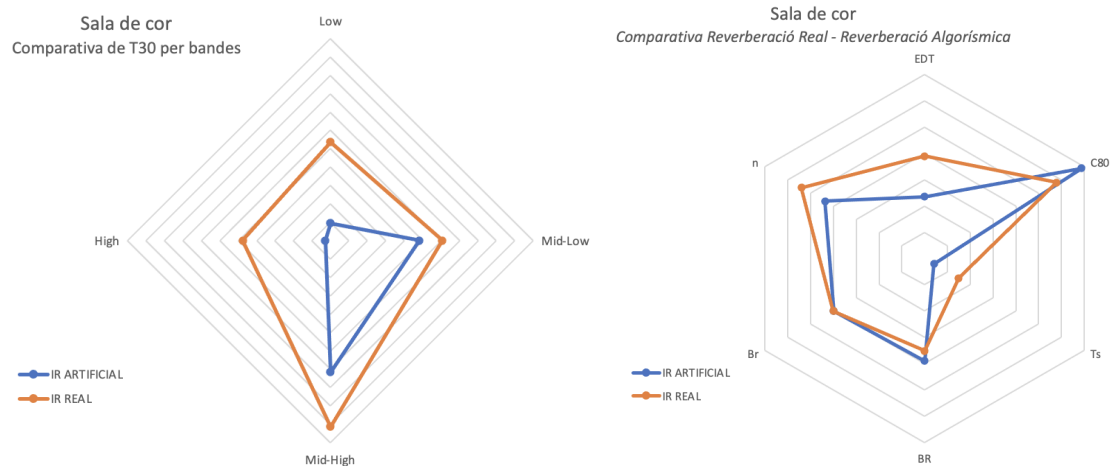


Figura 3.7-2: Comparativa entre la mesura de la reverberació real i la reverberació artificial de la sala de cor.

Distància euclidiana: **3.630/5**

### 3.7.1.5 Cabina d'estudi

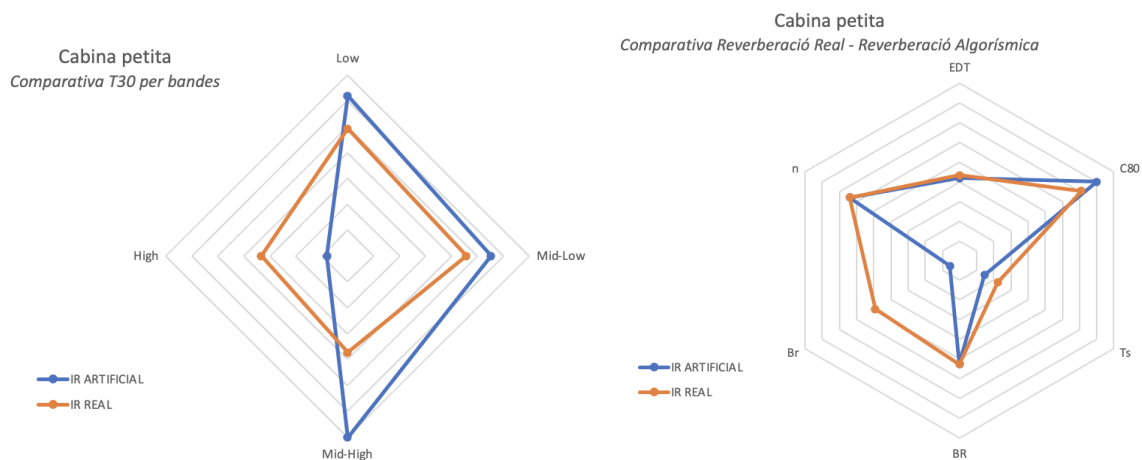


Figura 3.7-3: Comparativa entre la mesura de la reverberació real i la reverberació artificial de la cabina d'estudi.

Distància euclidiana: **3.260/5**

## 3.8 Resultats

Tot i que la reverberació algorísmica està força pròxima a la reverberació real, si que s'esperava més semblança entre una i altre, especialment veient unes regressions tan clares com per exemple les de la decaiguda de les primeres reflexions, la claredat o el temps de reverberació. Després de veure tot el procés i analitzar els resultats s'han pogut concloure un seguit de possibles errors o fets que hagin conduït a obtenir aquests resultats i que serviran de primeres idees per la millora d'aquest treball.

El primer de tots consisteix en la mesura de l'índex de creixement ( $n$ ). Per tal d'obtenir aquest valor s'ha utilitzat el codi obert de MATLAB de l'article "A Sparsity Measure for Echo Density Growth in General Environments". Aquesta anàlisi funciona molt bé per les respostes impulsional de mostra que inclou, però no dona tants bons resultats amb altres respostes impulsional generades o enregistrades, comptant així amb un marge d'error molt gran dels resultats. Tot i així, en ser una dada clau per simular una reverberació i en no trobar cap més sistema que ho pogués mesurar, es va tirar endavant amb aquesta mesura. És molt probable que en la parametrització d'aquest descriptor, que afecta a un paràmetre clau com és la separació dels retards del difusor, s'acumulés un error que distorsiona la resta de valors, de descriptors i per tant distorsiona els resultats obtinguts.

Un altre error observat, vist massa tard, és que en la relació de guany entre reflexions primeres i reflexions tardanes, que determina la claredat, només s'ha considerat pujar el guany de la FDN, fet que implica guanys elevats que comporten a augmentar el temps de reverberació i fins tot a saturar la reverberació. Hagués estat preferible controlar el descriptor de claredat amb una expressió del tipus:  $(a) * E_{\text{early}} / (1-a) * E_{\text{lates}}$ , de manera que amb  $a=0$  s'obté una claredat mínima, sense primeres reflexions, i amb  $a=1$  tens una claredat màxima, sense reflexions tardanes.

Una altra qüestió és si la interpretació del temps central és correcta, ja que la interacció amb el descriptor del temps central en la segona versió de la reverberació dona un efecte de control del *predelay* auditivament. Segurament caldria enllaçar-lo d'alguna manera amb la durada de les primeres reflexions per no perdre la continuïtat de la reverberació, amb el guany d'aquestes i fins i tot amb el guany de les reflexions tardanes, fet que causaria també una modificació del C80. Una altre possible solució seria un cop

obtinguda la reverberació, amb els temps de retard òptims per cada part, aplicar una subtil envolupant general per controlar on hi ha el centroide d'energia, que seria el temps central.

A partir de tot el que s'ha anomenat anteriorment i dels resultats es pot observar que els paràmetres d'aquesta reverberació implementada estan molt més interrelacionats del que s'havia suposat en un principi, i per tant que caldria una anàlisi multi-paramètrica molt més complexa per determinar amb major precisió la relació entre cada descriptor perceptiu i els paràmetres interns de la reverberació, i també un replantejament de tota la parametrització i la correlació entre paràmetres i descriptors.

## 4 CONCLUSIONS

Tot i no donar els resultats esperats, aquest treball pretén ser un punt de partida, o una continuació, de la relació entre l'acústica i el disseny de reverberacions sintètiques. Dos mons que tot i treballar sobre el mateix fenomen físic, poden arribar a ser tan allunyats i tenir estratègies i descriptors tan diferents. Personalment m'ha sorprès la falta d'informació sobre la relació entre tots els descriptors que s'utilitzen dia a dia en acústica per tal d'interpretar un recinte i els paràmetres a modificar de les diferents estratègies i algorismes per crear reverberacions sintètiques.

Així doncs aquest treball s'ha focalitzat en la intersecció d'aquests dos mons tan fascinants, propers i allunyats alhora, proposant una metodologia per a aplicar criteris perceptius a reverberacions algorísmiques, que podria arribar a servir per crear programari lliure, o més econòmic, de simulació de sales, més eficient i portable. És a la vegada una eina pedagògicament interessant per ajudar a entendre millor les estratègies de disseny de reverberacions sintètiques, també obrint possibles vies de recerca en aquest camp.

Tot i així, com s'ha esmentat anteriorment, és una introducció i per tant encara queda molt treball futur per fer: endinsar-se i explorar el món dels ambisònics; buscar, a part d'una aproximació tant analítica, una aproximació més subjectiva; obtenir i poder controlar més descriptors i de forma més precisa; explorar la incorporació d'aprenentatge automàtic per a millorar el mapatge dels paràmetres algorísmics als descriptors de la reverberació desitjats, i fins i tot aplicar-hi més paràmetres altament perceptius com l'aleteig ("*flutter*") d'una sala, per exemple.



## 5 BIBLIOGRAFIA

*9 Reverb Parameters Every Producer MUST KNOW | Waves.* (s.d.). Waves.Com. Recuperat 12 març 2022, de <https://www.waves.com/9-reverb-parameters-every-producer-must-know>

*A History of Reverb in Music Production.* (s.d.). IZotope. Recuperat 27 gener 2022, de <https://www.izotope.com/en/learn/a-history-of-reverb-in-music-production.html>

Abel, J. S., & Huang, P. (2006). *A Simple, Robust Measure of Reverberation Echo Density*. 10.

Beranek, L. (1996). *Concert and Opera Halls: How They Sound*. Acoustical Society of America. [https://books.google.es/books/about/Concert\\_and\\_opera\\_halls.html?id=5i1UAA AAMAAJ&redir\\_esc=y&hl=ca](https://books.google.es/books/about/Concert_and_opera_halls.html?id=5i1UAA AAMAAJ&redir_esc=y&hl=ca)

Bilbao, S., Arcas, K., & Chaigne, A. (2006). *A Physical Model for Plate Reverberation*. 5, V-V. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2006.1661238>

Dattorro, J. (1997). *Effect Design. Part 1: Reverberator and Other Filters*. 25.

*Faust Programming Language.* (s.d.). Recuperat 2 abril 2022, de <https://faust.grame.fr/>  
Feedback. (2022). En Wikipedia.

<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Feedback&oldid=1071126113>

*Feedforward Comb Filters | Physical Audio Signal Processing.* (s.d.). Recuperat 19 març 2022, de

[https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/Feedforward\\_Comb\\_Filters.html](https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/Feedforward_Comb_Filters.html)

*From Springs, Plates & Buckets To Physical Modelling.* (s.d.). Recuperat 7 febrer 2022, de <https://www.soundonsound.com/techniques/springs-plates-buckets-physical-modelling>

*GDSP - Online Course | Reverb.* (s.d.). Recuperat 11 febrer 2022, de <http://gdsp.hf.ntnu.no/lessons/6/36/>

*Getting Started With Reverb Design, Part 1: Dev Environments—Valhalla DSP.* (s.d.). Recuperat 6 febrer 2022, de <https://valhalladsp.com/2021/09/20/getting-started-with-reverb-design-part-1-dev-environments/>

- JoeCrow. (2020, març 17). Reverb Parameters Explained! *Joe Crow - The Audio Pro*.  
<https://www.joecrowtheaudiopro.com/2020/03/17/reverb-parameters-explained/>
- Kleiner, M., Dalenbäck, B.-I., & Svensson, P. (1993). Auralization-An Overview. *J. Audio Eng. Soc*, 41(11), 861-875.
- LiquidSonics. (2019, juny 26). What Is The Difference Between Algorithmic And Convolution Reverb? *LiquidSonics*.  
<https://www.liquidsonics.com/2019/06/26/what-is-the-difference-between-algorithmic-and-convolution-reverb/>
- Luff, G. (s.d.). *Let's Write A Reverb*. Signalsmith Audio. Recuperat 9 març 2022, de  
<https://signalsmith-audio.co.uk/writing/2021/lets-write-a-reverb/>
- Mcallister, M. (2021, juny 24). *What is Spring Reverb?* Produce Like A Pro.  
<https://producelikeapro.com/blog/spring-reverb/>
- McLuhan, M., & Powers, B. R. (1989). *The Global Village: Transformations in World Life and Media in the 21st Century*. Oxford University Press.
- Mulcahy, J. (s.d.). *REW Help*. Recuperat 14 maig 2022, de  
<https://www.roomeqwizard.com/REWhelp.pdf>
- Musicpublished, C. (2014, juny 24). *A brief history of reverb*. MusicRadar.  
<https://www.musicradar.com/tuition/tech/a-brief-history-of-reverb-602421>
- Nesting (computing). (2021). En *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nesting\\_\(computing\)&oldid=1057787180](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nesting_(computing)&oldid=1057787180)
- Physical Modelling Synthesis Plugins*. (s.d.). Physical Audio. Recuperat 7 febrer 2022, de  
<https://physicalaudio.co.uk/>
- Pirkle, W. C. (2013). *Designing audio effect plug-ins in C++ with digital audio signal processing theory*. Focal Press.
- Possibility of a Physical Reverb Model*. (s.d.). Recuperat 7 febrer 2022, de  
[https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Possibility\\_Physical\\_Reverb\\_Model.html](https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Possibility_Physical_Reverb_Model.html)
- Rafii, Z., & Pardo, B. (2009). *Learning to Control a Reverberator Using Subjective Perceptual Descriptors*. 285-290.
- Rafil, Z., & Pardo, B. (2009). A Digital Reverberator Controlled Through Measures Of The Reverberation. *NWU-EECS-09-08*, 13.

Reverb Types—Effect-O-Pedia | Valhalla Plugins. (2018, maig 14). *Valhalla DSP*.  
<https://valhalladsp.com/2018/05/14/effect-o-pedia-reverb-types/>

Reverb: What Do All Those Knobs Do? (s.d.). Recuperat 19 març 2022, de  
<https://www.soundonsound.com/techniques/reverb-what-do-all-those-knobs-do>

Reverberation. (2022). En *Wikipedia*.  
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Reverberation&oldid=1064877846>

Savage, S. (2014). *Mixing and Mastering in the Box: The Guide to Making Great Mixes and Final Masters on Your Computer*. Oxford University Press.

Schlecht, S. J. (2020). FDNTB: The Feedback Delay Network Toolbox. *Proceedings of the 23rd International Conference on Digital Audio Effects (DAFx2020)*, 1, 8.

Schlemmer, U. (s.d.). *Reverb Design*.

Smith, J. O. (2010). *Physical Audio Signal Processing: For Virtual Musical Instruments and Audio Effects* (Vol. 3). CCRMA. <https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>

The History of EMT and Plate Reverb. (2019, abril 10). *WikiAudio*.  
<https://www.wikiaudio.org/emt-140-plate-reverb/>

Tukuljac, H. P., Pulkki, V., Gamper, H., Godin, K., Tashev, I. J., & Raghuvanshi, N. (2019). A Sparsity Measure for Echo Density Growth in General Environments. *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682878>

Uso de la Reverberación. (2018, abril 10). *ACUSMATICA*.  
<https://www.acusmatica.net/uso-de-reverberacion/>

# 6 ANNEXOS

## 6.1 Annex A

### 6.1.1.1 Codi de la reverberació sense parametritzar

```
import("stdfaust.lib");

MAXDELAY = 10000;

MAXLENTH = 2048;

coeffs=(1,-1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,1);

householder4 = si.bus(4)<:par(i,4,par(j,4,* (ba.take(4*i+j+1,coeffs))):>_);

delays =
(prime_delay((hslider("D1[unit:s]",0.013,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("D2[unit:s]",0.035,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("D3[unit:s]",0.059,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("D4[unit:s]",0.079,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("D5[unit:s]",0.087,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("D6[unit:s]",0.092,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("D7[unit:s]",0.098,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("D8[unit:s]",0.101,0,0.2,0.001))*ma.SR));

scale = hslider("h:[2]DIFUSOR/Escalador[style:knob]",1,0,5,0.01);

earlyscale = hslider("[9]Separador Earlys[style:knob]",1,0,5,0.01);

lengths1=(prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD1",0.0025,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD2",0.005,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD3",0.0075,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD4",0.01,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD5",0.0125,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD6",0.015,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD7",0.0175,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF1/DIFD8",0.02,0,0.2,0.001))*ma.SR));

lengths2=(prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF2/DIFD1",0.005,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF2/DIFD2",0.01,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF2/DIFD3",0.015,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF2/DIFD4",0.02,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF2/DIFD5",0.025,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF2/DIFD6",0.03,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/
```

```

h:DIF2/DIFD7",0.035,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF2/
DIFD8",0.04,0,0.2,0.001))*ma.SR));

lengths3=(prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF3/DIFD1",0.01,0,0.2,0.001))*ma.SR
),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF3/DIFD2",0.02,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_
delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF3/DIFD3",0.03,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((v
slider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF3/DIFD4",0.04,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("
h:[2]DIFUSOR/h:DIF3/DIFD5",0.05,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIF
USOR/h:DIF3/DIFD6",0.06,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:D
IF3/DIFD7",0.07,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF3/DIFD
8",0.08,0,0.2,0.001))*ma.SR));

lengths4=(prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF4/DIFD1",0.02,0,0.2,0.001))*ma.SR
),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF4/DIFD2",0.04,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_
delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF4/DIFD3",0.06,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((v
slider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF4/DIFD4",0.08,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("
h:[2]DIFUSOR/h:DIF4/DIFD5",0.1,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFU
SOR/h:DIF4/DIFD6",0.12,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DI
F4/DIFD7",0.14,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((vslider("h:[2]DIFUSOR/h:DIF4/DIFD8
",0.16,0,0.2,0.001))*ma.SR));

earlydelay =
(prime_delay((hslider("ED1[unit:s]",0,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("ED
2[unit:s]",0.01,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("ED3[unit:s]",0.022,0,0.2
,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("ED4[unit:s]",0.031,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime
_delay((hslider("ED5[unit:s]",0.039,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("ED6[
unit:s]",0.042,0,0.2,0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("ED7[unit:s]",0.049,0,0.2,
0.001))*ma.SR),prime_delay((hslider("ED8[unit:s]",0.053,0,0.2,0.001))*ma.SR));

//FDN

fcbands = (160, 630, 2500);

fcgains = (hslider("[4]2.5k-22k[style:knob]",0.98,0,1,0.01), hslider("[3]630-
2.5k[style:knob]",0.96,0,1,0.01), hslider("[2]160-630[style:knob]",0.97,0,1,0.01),
hslider("[1]20-160[style:knob]",0.98,0,1,0.01)); //gains van al revés (últim nombre
primera banda)

LFOfreqs=
(hslider("LFO1[unit:Hz]",2.8,0,20,0.1),hslider("LFO2[unit:Hz]",2.1,0,20,0.1),hslide
r("LFO3[unit:Hz]",2.3,0,20,0.1),hslider("LFO4[unit:Hz]",2.1,0,20,0.1),hslider("LFO5
[unit:Hz]",3.2,0,20,0.1),hslider("LFO6[unit:Hz]",4.2,0,20,0.1),hslider("LFO7[unit:H
z]",2.2,0,20,0.1),hslider("LFO8[unit:Hz]",3.2,0,20,0.1)); //valor límit

```

```

LFOmod_Depth =
(hslider("LFO1[unit:samp]",4.5,0,20,0.1),hslider("LFO2[unit:samp]",2.5,0,20,0.1),hs
lider("LFO3[unit:samp]",5,0,20,0.1),hslider("LFO4[unit:samp]",4,0,20,0.1),hslider("
LFO5[unit:samp]",6,0,20,0.1),hslider("LFO6[unit:samp]",8,0,20,0.1),hslider("LFO7[un
it:samp]",3,0,20,0.1),hslider("LFO8[unit:samp]",5.5,0,20,0.1));

feedbackgain = hslider("[5]Feedback Gain[style:knob]",1,1,4,0.01);

t30 = (hslider("h:[3]DESCRIPTORS/v:T30/[4]2.5k-
22k[unit:s]",3,0,6,0.001),hslider("h:[3]DESCRIPTORS/v:T30/[3]630-
2.5k[unit:s]",3,0,6,0.0001),hslider("h:[3]DESCRIPTORS/v:T30/[2]160-
630[unit:s]",3,0,6,0.0001),hslider("h:[3]DESCRIPTORS/v:T30/[1]0-
160[unit:s]",3,0,6,0.0001)); //aguts a greus

fbfdn (j) = fi.filterbank(3,fcbands):par(i,4,(exp(-
3.0*log(10.0)*(vgroup("[2]Delays
FDN",ba.take(1+j,delays)))/((ba.take(i+1,t30))*ma.SR)))):>_ ;

lategain = (hslider("[6]Late Gain[style:knob]",1.6,0,10,0.05));

janaFDN = hgroup("[7]FDN",(si.bus(16):>par(i,8,(de.fdelayltv(3, MAXDELAY,
vgroup("[4]LFO Mod Depth",ba.take(i+1,LFOmod_Depth))*vgroup("[3]LFO
Freqs",os.osc(ba.take(i+1,LFOfreqs)))+(vgroup("[2]Delays
FDN",ba.take(i+1,delays))))))~(si.bus(8):par(i,8,(*(feedbackgain))):par(i,8,(fbfdn
(i)):ro.hadamard(8):par(i,8,(*(2^(-1.5))))):par(i,8,(*(lategain)))));

//DIFF LUFF

janaDIF1 =
par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths1)*(scale))))):route(8,8,1,2,2,1,3,4
,4,3,5,6,6,5,7,8,8,7):_,*(-1),_,*(-1),_,*(-1),_,*(-
1):ro.hadamard(8):par(i,8,(*(2^(-1.5)))));

janaDIF2 =
par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths2)*(scale))))):route(8,8,1,4,2,3,3,1
,4,2,5,8,6,7,7,5,8,6):* (-1),* (-1),_,* (-1),* (-1),* (-1),_,* (-
1):ro.hadamard(8):par(i,8,(*(2^(-1.5)))));

janaDIF3 =
par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths3)*(scale))))):route(8,8,1,3,2,4,3,2
,4,1,5,7,6,8,7,6,8,5):_,* (-1),_,* (-1),_,* (-1),_:*ro.hadamard(8):par(i,8,(*(2^(-
1.5)))));

janaDIF4 =
par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths4)*(scale))))):route(8,8,1,1,2,4,3,3
,4,2,5,5,6,8,7,7,8,6):_,* (-1),* (-1),_,* (-1),* (-
1),_:*ro.hadamard(8):par(i,8,(*(2^(-1.5)))));

```

```

janaEYR = hgroup("[6]Early
Delays",par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,earlydelay)*(earlyscale))))):*(0.80
),*(0.70),*(0.60),*(0.50),*(0.40),*(0.30),*(0.20),*(0.10));

t = button ("[1]Impuls");

cutoff = hslider("h:[9]General/[2]Cutoff LP
General[unit:Hz][scale:log][style:knob]",22000,20,22000,10);

predelay =
de.delay(MAXDELAY,(hslider("h:[9]General/[1]Predelay[unit:s][style:knob]",0.02,0,0.
1,0.001)*ma.SR));

preDDIF = par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(hslider("h:[9]General/[1]Delay
PREDIF[unit:s][style:knob]",0.02,0,0.1,0.001))*ma.SR)));

mix = hslider("h:[9]General/[3]Wet/Dry[style:knob]",0,0,1,0.01);

process=
(t:ba.impulsify),_:route(2,3,1,1,1,2,1,3,2,1,2,2,2,3):>(predelay<:janaEYR<:si.bus(1
6)<:(preDDIF:janaDIF1:janaDIF2:janaDIF3:janaDIF4:janaFDN:_,_,!,!,!,!,!),(route(8,
2,1,1,1,2,2,1,2,2,3,1,3,2,4,1,4,2,5,1,5,2,6,1,6,2,7,1,7,2,8,1,8,2)):>par(i,2,(fi.lo
wpass(1,cutoff)):par(i,2,*(hslider("h:[9]General/[4]Master[style:knob]",1,0,3,0.0
1)))):par(i,2,*(1-mix)),(par(i,2,*(mix))):>_,_);

//Llista de delays primers

```

## 6.2 Annex B

### 6.2.1.1 Codi de la reverberació parametritzada

```
import("stdfaust.lib");

MAXDELAY = 8209;

//CORBES REGRESSIÓ

//T30:  $y = -0.2845164 + 1.115902*x + 0.06406406*x^2$ 

//n:  $y = -0.002797545 + 0.002970774*x - 0.00008638852*x^2$ 

//EDT:  $y = 0.313206*x - 0.106199$ 

//C80:  $y = 2.176421 - 0.3860948*x + 0.01177255*x^2$ 

//Ts:  $y = 2.861878 - 120.5801*x + 1229.282*x^2$ 

nedp= hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[2]./[4]n[tooltip:Índex Creixement de la Densitat d'Ecos]", 1.75, 1,5, 0.01);

ned= -0.00008638852*(nedp^(2))+0.002970774*nedp-0.002797545;

delays =
(prime_delay(0.013*ma.SR),prime_delay(0.035*ma.SR),prime_delay(0.059*ma.SR),prime_delay(0.079*ma.SR),prime_delay(0.087*ma.SR),prime_delay(0.092*ma.SR),prime_delay(0.098*ma.SR),prime_delay(0.101*ma.SR));

scale = hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[2]./[3]Ts",1,0,5,0.01);

earlyscale = hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[2]./[1]EDT",1,0,2.33,0.01);

//EARLYS-----
earlydelay =
(prime_delay(0*ma.SR),prime_delay(0.01*ma.SR),prime_delay(0.022*ma.SR),prime_delay(0.031*ma.SR),prime_delay(0.039*ma.SR),prime_delay(0.042*ma.SR),prime_delay(0.049*ma.SR),prime_delay(0.053*ma.SR));

janaEYR =
par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,earlydelay))*(0.313206*(earlyscale)-0.106199)))):(*(0.80),*(0.70),*(0.60),*(0.50),*(0.40),*(0.30),*(0.20),*(0.10));

//DIF-----

//0.0825*(ned^(2))+0.1366*ned+1.3056 fórmula polinòmica

//0.7141*(ned)+0.6456 fórmula lineal
```



```

lengths1 =
(prime_delay((ned)*ma.SR),prime_delay((2*(ned))*ma.SR),prime_delay((3*(ned))*ma.SR)
,prime_delay((4*(ned))*ma.SR),prime_delay((5*(ned))*ma.SR),prime_delay((6*(ned))*ma
.SR),prime_delay((7*(ned))*ma.SR),prime_delay((8*(ned))*ma.SR));

lengths2 =
(prime_delay((2*(ned))*ma.SR),prime_delay((4*(ned))*ma.SR),prime_delay((6*(ned))*ma
.SR),prime_delay((8*(ned))*ma.SR),prime_delay((10*(ned))*ma.SR),prime_delay((12*(ne
d))*ma.SR),prime_delay((14*(ned))*ma.SR),prime_delay((16*(ned))*ma.SR));

lengths3 =
(prime_delay((4*(ned))*ma.SR),prime_delay((8*(ned))*ma.SR),prime_delay((12*(ned))*m
a.SR),prime_delay((16*(ned))*ma.SR),prime_delay((20*(ned))*ma.SR),prime_delay((24*(
ned))*ma.SR),prime_delay((28*(ned))*ma.SR),prime_delay((32*(ned))*ma.SR));

lengths4 =
(prime_delay((8*(ned))*ma.SR),prime_delay((16*(ned))*ma.SR),prime_delay((32*(ned))*
ma.SR),prime_delay((40*(ned))*ma.SR),prime_delay((48*(ned))*ma.SR),prime_delay((56*(
ned))*ma.SR),prime_delay((64*(ned))*ma.SR),prime_delay((72*(ned))*ma.SR));

janaDIF1 = par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths1)*(1229.282*(scale)^(2)-
120.5801*(scale)+2.861878))))):route(8,8,1,2,2,1,3,4,4,3,5,6,6,5,7,8,8,7):_,*(-
1),_,*(-1),_,*(-1),_,*(-1):ro.hadamard(8):par(i,8,*(2^(-1.5))));

janaDIF2 = par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths2)*(1229.282*(scale)^(2)-
120.5801*(scale)+2.861878))))):route(8,8,1,4,2,3,3,1,4,2,5,8,6,7,7,5,8,6):* (-1),* (-
1),_,*(-1),* (-1),* (-1),_,*(-1):ro.hadamard(8):par(i,8,*(2^(-1.5))));

janaDIF3 = par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths3)*(1229.282*(scale)^(2)-
120.5801*(scale)+2.861878))))):route(8,8,1,3,2,4,3,2,4,1,5,7,6,8,7,6,8,5):_,*(-
1),_,*(-1),_,*(-1),_:*ro.hadamard(8):par(i,8,*(2^(-1.5))));

janaDIF4 = par(i,8,(de.delay(MAXDELAY,(ba.take(i+1,lengths4)*(1229.282*(scale)^(2)-
120.5801*(scale)+2.861878))))):route(8,8,1,1,2,4,3,3,4,2,5,5,6,8,7,7,8,6):_,*(-
1),* (-1),_,*(-1),* (-1),_:*ro.hadamard(8):par(i,8,*(2^(-1.5))));

//FDN-----
fcbands = (160, 630, 2500);

LFOfreqs = (2.8,2.1,2.3,2.1,3.2,4.2,2.2,3.2);

LFOmod_Depth = (4.5,2.5,5,4,6,8,3,5.5);

```

```

t30 = (hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[1]T30/[4]2.5k-
22k[unit:s]",3,0,6,0.001),hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[1]T30/[3]630-
2.5k[unit:s]",3,0,6,0.0001),hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[1]T30/[2]160-
630[unit:s]",3,0,6,0.0001),hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[1]T30/[1]0-
160[unit:s]",3,0,6,0.0001));

fbfdn (j) = fi.filterbank(3,fcbands):par(i,4,*(exp(-
3.0*log(10.0)*(ba.take(1+j,delays))/((0.06406406*(ba.take(i+1,t30))^2)+(1.115902*(
ba.take(i+1,t30))-0.2845164)*ma.SR)))):>_ ;

lategain = (hslider("v:[2]DESCRIPTORS/h:[2]./[2]C80[unit:dB]",20,-17,50,0.01));

janaFDN = (si.bus(16):>par(i,8,(de.fdelayltv(3, MAXDELAY,
ba.take(i+1,LFOmod_Depth)*(os.osc(ba.take(i+1,LFOfreqs)))+(ba.take(i+1,delays))))))
~(si.bus(8):par(i,8,(fbfdn(i)):ro.hadamard(8):par(i,8,*(2^(-
1.5))))):par(i,8,*(0.01177255*(lategain^2))-0.3860948*(lategain)+2.176421));

//PROCESS-----
t = button ("[1]Impuls");

cutoff = hslider("h:[9]General/[2]Cutoff LP
General[unit:Hz][scale:log][style:knob]",22000,20,22000,10);

predelay =
de.delay(MAXDELAY,(hslider("h:[9]General/[1]Predelay[unit:s][style:knob]",0.02,0,0.
5,0.001)*ma.SR));

mix = hslider("h:[9]General/[3]Wet/Dry[style:knob]",0,0,1,0.01);

process=
(t:ba.impulsify),_:route(2,3,1,1,1,2,1,3,2,1,2,2,2,3):>(predelay<:janaEYR<:si.bus(1
6)<:(janaDIF1:janaDIF2:janaDIF3:janaDIF4:janaFDN:_,_!,!,!,!,!),(route(8,2,1,1,1,
2,2,1,2,2,3,1,3,2,4,1,4,2,5,1,5,2,6,1,6,2,7,1,7,2,8,1,8,2)):>par(i,2,(fi.lowpass(1,
cutoff)):par(i,2,*(hslider("h:[9]General/[4]Master[style:knob]",1,0,3,0.01))):pa
r(i,2,*(1-mix))),(par(i,2,*(mix))):>_,_;

//Llista de delays primers

```

## 6.3 Annex C

### 6.3.1.1 Taula de resultats de l'anàlisi de la reverberació real i artificial del passadís

IR REAL	EDT (s)	T30 (s)	C80	TS (s)	BR	Br	n
50	0,639	0	15,11	0,075			
63	0,609	0,354	15,5	0,062			
80	0,429	0,375	18,71	0,047			
100	0,562	0,754	13,28	0,055			
125	0,728	0,865	7,96	0,078			
160	0,378	0,493	14,93	0,037			
200	0,25	0,629	16,51	0,034			
250	0,48	0,787	10,99	0,041			
315	0,495	0,793	10,36	0,041			
400	0,766	0,839	7,24	0,06			
500	0,79	1	6,37	0,061			
630	0,824	1	4,5	0,068			
800	1	1	1,38	0,087			
1000	1	1	1,49	0,085			
1250	0,836	1	5,11	0,066			
1600	0,822	1	5,45	0,062			
2000	0,928	1	4,33	0,064			
2500	0,802	0,901	5,42	0,056			
3150	0,75	0,853	6,23	0,051			
4000	0,625	0,822	6,77	0,05			
5000	0,482	0,751	9,1	0,036			
6300	0,54	0,694	8,17	0,041			
8000	0,419	0,607	10,28	0,033			
10000	0,348	0,537	11,17	0,03			
Tlow	0,56	<b>0,47</b>	14,25	0,06			
Tmid-low	0,60	<b>0,87</b>	9,33	0,05			
Tmid-high	0,92	<b>1,07</b>	3,86	0,07			
Thigh	0,53	<b>0,71</b>	8,62	0,04			
	<b>0,650625</b>		<b>9,015</b>	<b>0,055</b>	<b>0,68186839</b>	<b>0,86239546</b>	<b>1,43</b>

IR ARTIFICIAL	EDT (s)	T30 (s)	C80	TS (s)	BR	Br	n
50	0,608	0,384	48,14	0,064			
63	0,497	0,302	48,96	0,052			
80	0,406	0,235	46,15	0,042			
100	0,325	0,194	40,83	0,034			
125	0,253	0,277	30,51	0,027			
160	0,252	0,575	19,34	0,025			
200	0,139	0,677	17,24	0,019			
250	0,151	0,818	21,1	0,016			
315	0,109	0,771	20,52	0,014			
400	0,172	0,721	15,48	0,017			
500	0,138	0,841	15,82	0,015			
630	0,139	0,945	15,05	0,016			
800	0,04	0,936	21,21	0,006			
1000	0,046	0,866	25,53	0,005			
1250	0,048	0,894	20,55	0,006			
1600	0,033	0,906	17,59	0,007			
2000	0,026	0,805	23,38	0,004			
2500	0,035	0,694	24,86	0,004			
3150	0,034	0,578	27,72	0,003			
4000	0,035	0,463	27,88	0,003			
5000	0,029	0,445	27,22	0,003			
6300	0,032	0,461	27,81	0,003			
8000	0,028	0,069	28,74	0,002			
10000	0,032	0,061	29,25	0,002			
Tlow	0,39	<b>0,33</b>	38,99	0,04			
Tmid-low	0,14	<b>0,80</b>	17,54	0,02			
Tmid-high	0,04	<b>0,85</b>	22,19	0,01			
Thigh	0,03	<b>0,35</b>	28,10	0,00			
	<b>0,15</b>		<b>26,70</b>	<b>0,016</b>	<b>0,637</b>	<b>0,748</b>	<b>5</b>

### 6.3.1.2 Taula de resultats de l'anàlisi de les reverberacions reals i artificials de la sala de cor

IR REAL	EDT (s)	T30 (s)	C80	TS (s)	BR	Br	n
50	1	0,942		7,87	0,111		
63	0,783	1		10,39	0,085		
80	0,744	1		7,07	0,106		
100	0,695	0,913		7,37	0,078		
125	2	0,931		0,13	0,128		
160	0,753	0,735		6,81	0,077		
200	0,819	0,764		8,41	0,049		
250	0,677	0,912		8,39	0,041		
315	0,809	1		4,91	0,068		
400	0,939	1		4,7	0,064		
500	0,98	1		4,42	0,052		
630	1	2		2,55	0,067		
800	1	2		5,42	0,058		
1000	1	2		4,24	0,068		
1250	1	2		4,29	0,069		
1600	1	2		5,95	0,051		
2000	0,962	2		6,7	0,044		
2500	1	2		7,18	0,037		
3150	0,853	2		8,74	0,028		
4000	1	1		9,09	0,026		
5000	0,87	1		10,55	0,023		
6300	0,434	0,831		14,74	0,01		
8000	0,097	0,669		16,91	0,007		
10000	0,005	0,56		21,52	0,002		
Tlow	0,95	1,04		6,61	0,10		
Tmid-low	0,92	1,13		5,56	0,06		
Tmid-high	1,16	1,80		5,63	0,05		
Thigh	0,54	0,97		13,59	0,02		
<b>0,47420833</b>		<b>11,12625</b>		<b>0,041</b>	<b>1,37045605</b>	<b>0,91573034</b>	<b>4,99</b>

IR ARTIFICIAL	EDT (s)	T30 (s)	C80	TS (s)	BR	Br	n
50	0,633	0,464		34,64	0,066		
63	0,517	0,404		31,73	0,054		
80	0,4	0,302		28,07	0,044		
100	0,362	0,817		19,12	0,03		
125	0,243	0,929		24,3	0,026		
160	0,217	0,852		26,74	0,023		
200	0,164	0,851		22,38	0,018		
250	0,126	1		19,05	0,016		
315	0,138	1		19,16	0,015		
400	0,098	0,917		23,99	0,01		
500	0,072	0,807		30,45	0,008		
630	0,097	1		29,37	0,009		
800	0,069	2		23,94	0,008		
1000	0,044	0,045		28,35	0,005		
1250	0,055	2		26,01	0,006		
1600	0,079	2		26,04	0,006		
2000	0,058	1		27,33	0,005		
2500	0,045	1		28,55	0,004		
3150	0,044	0,772		30,81	0,004		
4000	0,058	0,612		31,21	0,004		
5000	0,043	0,578		31,24	0,003		
6300	0,05	0,55		31,77	0,004		
8000	0,051	0,508		32,23	0,003		
10000	0,05	0,456		32,98	0,003		
Tlow	0,40	<b>0,63</b>		27,43	0,04		
Tmid-low	0,12	<b>0,98</b>		24,07	0,01		
Tmid-high	0,06	<b>1,28</b>		26,70	0,01		
Thigh	0,05	<b>0,58</b>		31,71	0,00		
<b>0,15</b>		<b>27,48</b>		<b>0,016</b>	<b>0,889</b>	<b>0,986</b>	<b>1,52</b>

### 6.3.1.3 Taula de resultats de l'anàlisi de les reverberacions reals i artificials de la cabina petita

IR REAL	EDT (s)	T30 (s)	C80	TS (s)	BR	Br	n
50	0,62	0,381	20,78	0,064			
63	0,4	0,403	14,78	0,047			
80	0,747	0,691	7,67	0,081			
100	0,553	0,795	12,98	0,063			
125	0,549	0,724	9,84	0,057			
160	0,88	0,742	0,8	0,083			
200	0,916	0,723	3,83	0,064			
250	0,174	0,593	12,76	0,023			
315	0,577	0,57	10,15	0,036			
400	0,257	0,531	11,08	0,027			
500	0,413	0,468	11,67	0,032			
630	0,442	0,547	11,14	0,039			
800	0,376	0,497	11,69	0,032			
1000	0,393	0,519	12,05	0,029			
1250	0,398	0,464	12,08	0,034			
1600	0,455	0,449	9,67	0,04			
2000	0,472	0,452	9,59	0,035			
2500	0,419	0,451	11,21	0,03			
3150	0,458	0,474	9,51	0,036			
4000	0,419	0,495	11,1	0,029			
5000	0,427	0,45	10,51	0,032			
6300	0,393	0,41	11,73	0,027			
8000	0,327	0,397	15,3	0,022			
10000	0,316	0,325	15,11	0,022			
Tlow	0,62	<b>0,62</b>	11,14	0,07			
Tmid-low	0,46	<b>0,57</b>	10,11	0,04			
Tmid-high	0,42	<b>0,47</b>	11,05	0,03			
Thigh	0,39	<b>0,43</b>	12,21	0,03			
<b>0,47420833</b>		<b>11,12625</b>	<b>0,041</b>	<b>1,370456</b>	<b>0,91573</b>		<b>4,99</b>

IR ARTIFICIAL	EDT (s)	T30 (s)	C80	TS (s)	BR	Br	n
50	0,597	0,601	22,23	0,063			
63	0,496	0,798	17,84	0,054			
80	0,384	0,812	23,23	0,041			
100	0,3	0,825	21,76	0,033			
125	0,254	0,934	20,29	0,028			
160	0,192	1	21,16	0,022			
200	0,161	1	20,94	0,018			
250	0,128	0,09	38,26	0,013			
315	0,104	0,076	40,23	0,011			
400	0,085	2	12,04	0,023			
500	6	1	5,46	0,055			
630	0,053	0	35,4	0,006			
800	0,041	0	36,07	0,005			
1000	0,026	0	35,03	0,004			
1250	0,025	0	36,95	0,003			
1600	0,029	0	36,29	0,002			
2000	0,016	0	43,36	0,002			
2500	0,017	0,006	49,11	0,002			
3150	0,02	0,008	46,76	0,002			
4000	0,015	0	43,05	0,001			
5000	0,009	0,005	47,79	0,001			
6300	0,013	0,004	49,08	0,001			
8000	0,012	0,003	50,18	0,001			
10000	0,013	1	13,77	0,01			
Tlow	0,37	<b>0,83</b>	21,09	0,04			
Tmid-low	1,17	<b>0,71</b>	25,39	0,02			
Tmid-high	0,03	<b>0,00</b>	39,47	0,00			
Thigh	0,01	<b>0,24</b>	41,77	0,00			
<b>0,394625</b>		<b>31,9283333</b>	<b>0,01670833</b>	<b>1,35005</b>	<b>0,00635</b>		<b>5</b>