



CONSERVATORIO
DI MUSICA

**Niccolò
Piccinni**

BARI

DIPARTIMENTO DI NUOVE TECNOLOGIE E LINGUAGGI MUSICALI

SCUOLA DI MUSICA ELETTRONICA

DIPLOMA ACCADEMICO DI PRIMO LIVELLO IN
MUSICA ELETTRONICA

SERGIO AMATO

ATMOVERB

RIVERBERI ARTIFICIALI PROGRAMMABILI IN FUNZIONE DI
CONDIZIONI ATMOSFERICHE

Autore:

SERGIO AMATO
1048/T

Relatore:

PROF. GIUSEPPE SILVI
ELETTROACUSTICA

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Sergio Amato

ATMOVERB

Copyright © ⓘ ⓘ ⓘ
2022-2023

DISCLAIMER

This document was written with \LaTeX on Mac using ArsClassica, a reworking of the ClassicThesis style designed by André Miede, inspired to the masterpiece *The Elements of Typographic Style* by Robert Bringhurst.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

CONTACTS

✉ amatosergio02@outlook.it

ACKNOWLEDGEMENTS

*We have seen that computer programming is an art,
because it applies accumulated knowledge to the world,
because it requires skill and ingenuity,
and especially because it produces objects of beauty.*

— Donald Ervin Knuth

I wish first of all to thank
the members of the Italian $\text{T}_\text{E}\text{X}$ and $\text{L}_\text{A}\text{T}_\text{E}\text{X}$ User
Group, in particular Claudio Beccari, Fabiano Busdraghi,
Gustavo Cevolani, Rosaria D'Addazio, Agostino De Marco, Massimi-
liano Dominici, Gloria Faccanoni, Claudio Fiandrino, Heinrich Fleck,
Enrico Gregorio, Massimo Guiggiani, Roberto Giacomelli, Gianluca Gor-
ni, Maurizio Himmelmann, Jerónimo Leal, Paride Legovini, Lapo Filip-
po Mori, Gianluca Pignalberi, Luigi Scarso, Marco Stara, Andrea Tonelli,
Ivan Valbusa, Emiliano Giovanni Vavassori and Emanuele Vicentini,
for their invaluable aid during the writing of this work, the detailed
explanations, the patience and the precision in the suggestions,
the supplied solutions, the competence and the kindness:
thank you, guys! Thanks also to all the people who have di-
scussed with me on the forum of the Group, prodigal
of precious observations and good advices. Final-
ly, thanks to André Miede, for his wonderful
ClassicThesis style, and to Daniel Got-
tschlag, who gave to me the
hint for this original
reworking.



INDICE

INTRODUZIONE	2
1 Brevi storie di riverberi	4
1.1 Wallace C. Sabine: l'alba dell'acustica architettonica	5
1.1.1 Loudness	6
1.1.2 Distortion of Complex Sounds: Interference and Resonance	7
1.1.3 Confusion: Reverberation, Echo and Extraneous Sounds	7
1.1.4 Echi di Sabine	8
1.2 Acustici Luoghi Comuni	9
1.2.1 Distanza dalla sorgente	10
1.2.2 Conformazione del gas/Temperatura e densità	10
1.3 Psicoacustica	12
1.4 Spazio	14
1.4.1 Risposta all'impulso	14
1.4.2 Storia dello studio degli spazi	15
1.5 Architetture di riverberazione artificiale	17
1.6 Natural Sounding Schroeder Reverberation	18
1.6.1 Analisi	19
1.7 Moorer's Business	23
1.7.1 Problematiche Del riverberatore	24
1.7.2 Nuove unità riverberanti	24
1.7.3 Nuove unità riverberanti	25
1.7.4 In conclusione	25
2 Implementazione	27
2.1 Filtri	27
2.1.1 Categorie di filtri	27
2.2 Funzione di trasferimento	28
2.3 Tipologie di filtro	29
2.3.1 Low-Pass	29
2.3.2 High-Pass	29
2.3.3 Band-Pass	30
2.4 Filtri Digitali	30
2.5 Delay e Utilizzo	31
2.6 Algoritmi di Schroeder	32
2.6.1 Algoritmi fondamentali	32
2.6.2 Algoritmi derivati	34

2.6.3 Algoritmi Combinati	34
2.7 Algoritmi di Moorer	35
3 Conclusioni	37
Indice dei nomi	38
Bibliografia	39

TODO LIST

ho sistemato un po' il testo, sempre nell'ottica di andare a eliminare eventuali fragilità che lasciano aperte troppe questioni di fisica pura. manca però una terza parte dell'introduzione in cui spieghi quali sono le parti della tesi con i nomi delle parti: es. nel capitolo 1, storia, bla bla bla; nel capitolo 2 ciccio... bla bla bla	2
descrivere le parti	2
i periodi successivi non fanno parte dell'introduzione. andrebbero sistemati ma lo farei dopo che gli hai trovato un posto.	2
Riferimenti bibliografici	4
riferimento automatico al capitolo	4
Riferimenti bibliografici	4
da qui: ho inserito pari pari il testo preso da METP riguardante la ricerca di Sabine. valuta se tenere delle cose che ti interessano e rielaborale facendole tue. solo se c'è qualcosa che ti interessa.	5
a qui	8
in questa sezione...bla bla bla	9

INTRODUZIONE

ho sistemato un po' il testo, sempre nell'ottica di andare a eliminare eventuali fragilità che lasciano aperte troppe questioni di fisica pura. manca però una terza parte dell'introduzione in cui spieghi quali sono le parti della tesi con i nomi delle parti: es. nel capitolo 1, storia, bla bla bla; nel capitolo 2 ciccio... bla bla bla

In questo lavoro di tesi affronto argomenti di riverberazione artificiale e come l'ambiente riverberante influisce sulla percezione sonora. In particolare la mia ricerca si è concentrata sullo studio del comportamento delle vibrazioni acustiche al variare delle *condizioni atmosferiche*, in particolare nelle qualità di: temperatura, umidità e pressione atmosferica; in presenza di mezzi di trasmissione acustica diversi dall'aria. Lo studio dei fenomeni fisici è confluito nell'implementazione di un riverbero a parametri di controllo atmosferici.

La tesi attinge alle ricerche principali che nel novecento hanno introdotto il concetto di riverberazione (Sabine), tecniche di riverberazione artificiale (Schroeder) e poi elaborato quelle tecniche (Moorer) contribuendo allo sviluppo delle possibilità di simulazione di un ambiente sonoro realistico.

Il testo è diviso in tre parti: la presente introduzione, una parte storica, le strategie di implementazione che ho adottato.

descrivere
le parti

i periodi successivi non fanno parte dell'introduzione. andrebbero sistemati ma lo farei dopo che gli hai trovato un posto.

Quando ci troviamo in un determinato luogo, che sia un appartamento, un ufficio o altro, non sempre facciamo caso alle sue proprietà acustiche, magari scorgiamo altri dettagli, come una certa corrispondenza tra i colori delle pareti e gli oggetti di arredamento, ma, le relazioni che intercorrono tra l'ambiente e la percezione sonora, sono informazioni che spesso trascuriamo o che addirittura risultano superflue.

In un ambiente reale, i rapporti tra gli elementi presenti al suo interno, sono innumerevoli, definendo in maniera quasi assoluta la peculiarità dei suoni che si propagano. Possiamo pressochè dire che l'evento acustico è legato indissolubilmente allo spazio che ha attorno. La tesi ha lo scopo di indagare l'influenza che le caratteristiche

ambientali e climatiche hanno sulla propagazione di un' onda sonora, portando allo studio e implementazione di algoritmi in grado di simulare queste ultime. Lo sviluppo di questa tesi è stato guidato principalmente dalla curiosità dell'autore di comprendere se e quanto, queste caratteristiche esterne all'evento sonoro, possano definirne il timbro e la percezione.

1

BREVI STORIE DI RIVERBERI

In questo capitolo cerco di tracciare il percorso di ricerca storica che ha portato allo studio del riverbero acustico e successivamente all'implementazione dei *riverberatori artificiali*. La letteratura storica si è concentrata sullo sviluppo di riverberatori artificiali in grado di simulare le risposte caratteristiche di un determinato ambiente mediante l'utilizzo di filtri. L'implementazione che propongo nel capitolo...ciccio si basa su queste ricerche e sulle architetture proposte da Schroeder e Moorer con soluzioni di controllo dei parametri derivanti da condizioni atmosferiche.

Riferimenti
bibliografi-
ci

riferimento
automa-
tico al
capitolo

Riferimenti
bibliografi-
ci



Figura 1: Fogg Art Museum lecture hall

1.1 WALLACE C. SABINE: L'ALBA DELL'ACUSTICA ARCHITETTONICA

da qui: ho inserito pari pari il testo preso da METP riguardante la ricerca di Sabine. valuta se tenere delle cose che ti interessano e rielaborale facendole tue. solo se c'è qualcosa che ti interessa.

Nonostante l'acustica architettonica sia stata per millenni parte integrante delle capacità progettuali di strutture, la *fisica acustica* ha ottenuto una base scientifica solida solo nei primi del novecento, ad opera di *Wallace Sabine*¹. La definizione del tempo di riverbero da parte di Sabine è un punto di partenza anche nella letteratura sulla modellazione digitale dell'effetto, fin dal principio, nell'opera di *Manfred Schroeder*². Dopo Sabine il tempo di riverbero può essere descritto, misurato, previsto. Tutto quello che sappiamo fare oggi continua ad attingere alle sue ricerche.

The following investigation was not undertaken at first by choice, but devolved on the writer in 1895, through instructions from the Corporation of Harvard University to propose changes from remedying the acoustical difficulties in the lecture-room o the Fogg Art Museum, a building that had just been completed. About two years were spent in experimenting on this room, and permanent changes where then made. Almost immediately afterward it become certain that a new Boston Music Hall would be erected, and the questions arising in the consideration of its plans forced a not unwelcome continuance of the general investigation³.

Trovo significativo che una ricerca così approfondita e miliare possa essere scaturita da una semplice problematica come quella di dover analizzare e correggere l'acustica di una sala universitaria. Sulla base di un vuoto letterario, nulla di organico sul fenomeno del riverbero se non per cenni sparsi provenienti dalla storia della fisica, *Manfred Schroeder* ha costruito una ricerca organica, con seri problemi da risolvere, anche di diversa natura, come per esempio la scelta del cronografo (1885) per misurare il tempo

1 Sabine, 1921.

2 Schroeder, 1962, 1964.

3 Sabine, 1921.

...perfect noiselessness, portability, and capacity to measure intervals of time from a half of second to ten seconds with considerable accuracy⁴.

Sono proprio queste parole a rivelare che non poteva esserci un momento diverso nella storia dell'uomo in cui la convergenza di esigenze e possibilità tecniche avrebbe portato alla soluzione di problematiche irrisolte (o non considerate) per secoli.

In order that hearing may be good in any auditorium, it is necessary that the sound should be sufficiently loud; that the simultaneous components of a complex sound should maintain their proper relative intensities; and that the successive sounds in rapidly moving articulation, either of speech or music, should be clear and distinct, free from each other and from extraneous noises. These three are the necessary, as they are the entirely sufficient, conditions for good hearing⁵.

Una tripletta di problemi minimi da comprendere e risolvere per rendere accettabile il riverbero acustico di un ambiente.

1.1.1 Loudness

Illustrando una condizione semplice di auditorium in forma di spazio piano, con un oratore ed un ascoltatore, *Wallace Sabine* introduce il concetto di propagazione del suono in forma emisferica, che si riduce di intensità all'aumentare della sua dimensione (distanza dall'origine) proporzionalmente. Aumenta il pubblico, il suono perde intensità più rapidamente, assorbito. La parte superiore della propagazione si muove libera, non affetta da assorbimenti. I primi accorgimenti: elevare l'oratore ed alzare da terra le file posteriori: il teatro Greco. Un tetto su questa struttura incrementerebbe l'intensità media, soprattutto dei suoni sostenuti nel tempo, e ne bilancerebbe la resa tra fronte e fondo sala.

The problem of calculating the loudness at different parts of such an auditorium is, obviously, complex, but it is perfectly determinate, and as soon as the reflecting and absorbing power of the audience and of the various wall-surfaces are known it can be solved approximately⁶.

⁴ Sabine, 1921.

⁵ Sabine, 1921.

⁶ Sabine, 1921.

Ne ricaviamo la prima ufficiale considerazione: non si può parlare di Riverbero, al singolare, ma di Riverberi di un luogo. Perfettamente determinati, calcolabili, ma molti per ogni ambiente che descriviamo.

1.1.2 Distortion of Complex Sounds: Interference and Resonance

In termini di *loudness*, i suoni diretti ed i suoni riflessi si rinforzano l'un l'altro quando viaggiano insieme. Possono però trovarsi nella condizione di cancellarsi a vicenda. Nella descrizione del ronte d'onda che si muove per successioni di stati opposti, compressioni e rarefazioni, si possono avere condizioni in cui il suono riflesso da pareti distinte produca nello spazio della sala una zona di incontro di queste riflessioni, in cui entrambe le compressioni e le rarefazioni si trovino rinforzate, in fase. Ma si può avere l'occorrenza opposta, un punto di incontro in cui le compressioni e le rarefazioni non si succedono ma si sovrappongono, annullandosi. Tutto questo accade in relazione al suono emesso, alla sua altezza, che variando, varia l'intero stato di equilibrio, l'intero stato di interferenza.

C'è un altro fenomeno che occorre in queste circostanze, in relazione con l'interferenza, ovvero la risonanza.

The word *resonance* has been used loosely as synonymous with *reverberation*, and even with *echo*, and is so given in some of the more voluminous but less exact popular dictionaries. In scientific literature the term has received a very definite and precise application to the phenomenon, wherever it may occur, of the growth of a vibratory motion of an elastic body under periodic force stimed to its natural rates of vibration. A word having this significance is necessary; and it is very desirable that the term should not, even popularly, by meaning many things, cease to mean anything exactly⁷.

Gli uomini che chiedono rispetto per le parole, meritano rispetto, perché rispettano gli uomini. Anche questa è risonanza.

1.1.3 Confusion: Reverberation, Echo and Extraneous Sounds

Si entra così nel cuore della ricerca di *Wallace Sabine*, l'atto pratico di comprendere il malfunzionamento acustico del luogo speciico,

⁷ Sabine, 1921.

cinque secondi ed oltre di riverbero tale da rendere impossibile comprendere la propria voce in una semplice discussione. Il fenomeno definito *riverbero* il processo delle rilessioni multiple, tra superfici, pareti, soffitto e pavimento, dapprima da una e poi da un'altra e poi da molte superfici, cambiando (o perdendo) un poco ad ogni rilessione, fino a diventare inudibile. Questo il fenomeno *riverbero*, che include il caso speciale denominato *eco*. Il *riverbero* consiste inoltre in una massa di suono che riempie uno spazio della quale è impossibile cogliere ed analizzare la singola riflessione. Il termine *eco* è riservato al caso specifico di riflessione pulita, singola, generata da una singola superficie ed a volte ripetuta, nel caso di più superfici riflettenti. Nel *riverbero* ci concentriamo a definirne il tasso di decadimento del suono nel tempo, nel caso dell'*eco* l'intensità è un fattore secondario, mentre risulta un fattore discriminante l'intervallo temporale tra il suono originario ed il tempo di arrivo della riflessione all'ascoltatore.

La misurazione temporale diventa quindi fondamentale, oggi piuttosto scontata per misurazioni fisiche di ordine infinitamente piccole, ma per *Wallace Sabine* non era proprio così.

Il percorso di misurazione del tempo di decadimento del *suono residuo* (il suono che resta in aria dopo che la fonte sonora ha cessato di produrlo) evidenzia a *Wallace Sabine* che ci sono due e due variabili soltanto di un luogo ad influire sul risultato cronometrico: la forma della stanza, inclusa la dimensione; i materiali, incluso l'arredamento.

1.1.4 Echi di Sabine

Ci sono innumerevoli spunti di riflessione tra le pagine dei testi di *Wallace Sabine*⁸, dai quali, agli scopi di una corretta implementazione digitale del riverbero e soprattutto agli scopi di un corretto utilizzo musicale, possiamo ricavare:

- La durata del suono residuo ascoltabile in un ambiente è approssimativamente uguale in ogni punto dello spazio.
- La durata del suono residuo ascoltabile in un ambiente è approssimativamente indipendente dalla posizione della sorgente.

Sono questi due presupposti fondamentali, sui quali cercheremo di costruire un pensiero musicale prima ancora che uno strumento musicale, quale il riverbero digitale può essere.

a qui

⁸ Sabine, 1921.

Grazie a queste ricerche, numerosi progressi sono stati fatti nell'ambito dell'acustica ambientale e consistono nelle fondamenta delle attuali conoscenze. Innanzitutto l'autore identifica le condizioni necessarie per una buona acustica:

- Intensità adeguata del suono;
- Distorsione minima dell'onda complessa;
- Percezione chiara delle riflessioni.

Gli studi condotti, ponendo questi come gli obiettivi da raggiungere, hanno riscontrato come maggiori cause cattive riverberazioni, risonanze e assorbimento acustico non ottimale.

In generale gli esperimenti si concentrano sulla durata del decadimento del suono riverberato e dell'influenza che hanno pareti e corpi all'interno della stanza sull'assorbimento dell'energia generale.

Il culmine di questo studio, oltre a dimostrare che esiste una correlazione tra la quantità di superficie assorbente (pareti, sedute, persone) e la qualità di percepimento del suono in una stanza, è lo sviluppo di una formula in grado di ricavare il tempo in cui il suono decade fino ad una situazione di equilibrio. Parliamo di *RT60* ovvero il tempo in cui il suono (riverberato) decade di 60 dB.

$$RT60 = \frac{24(\ln 10)V}{cs_a} \quad (1)$$

Di cui:

- V è il volume della stanza
- c è la velocità del suono
- s_a è il valore di assorbimento totale espresso in Sabins

Possiamo calcolare i Sabins sommando l'area totale delle pareti (per esempio 4 mura + 1 soffitto e 1 pavimento) e moltiplicandola per il coefficiente di assorbimento (ovviamente il coefficiente può essere diversificato per i diversi materiali delle pareti). Da notare che il coefficiente è un valore che varia tra 0 (minimo assorbimento) e 1 (massimo assorbimento).

L'articolo è considerato un capolavoro di acustica applicata e ha avuto una grande influenza sullo sviluppo della scienza del suono e sulla progettazione degli spazi sonori.

1.2 ACUSTICI LUOGHI COMUNI

in questa sezione...bla bla bla

1.2.1 Distanza dalla sorgente

La distanza dalla sorgente sonora è risaputo comportare una diminuzione di intensità. Dato che l'onda si propaga in modo sferico, segue la legge dell'inverso del quadrato, comportando una diminuzione di 6 db ad ogni raddoppio della distanza.

1.2.2 Conformazione del gas/Temperatura e densità

Parlare di temperatura è importante in quanto è un fattore che influisce in diversi altri fattori presi in esame in questa tesi, ed è inoltre il punto di partenza della mia ricerca. Dalla temperatura dipendono infatti la velocità del suono nel mezzo e il valore di assorbimento atmosferico. La velocità del suono possiamo calcolarla secondo la seguente formula:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma P_s}{\rho}} \quad (2)$$

dove

- γ è il coefficiente di dilatazione adiabatica
- P_s è la pressione circostante
- ρ è la densità del gas

La densità del gas, come per il coefficiente di dilatazione adiabatica, varia a seconda della temperatura che, data la sua presenza in varie equazioni, diviene un fattore determinante per la velocità del suono e dunque per le caratteristiche del riverbero. Possiamo calcolare la densità tramite la seguente formula (pag 173):

$$\rho = \frac{stp * hg}{1 + (t * hg * 0.00367)} \quad (3)$$

di cui:

- stp è la densità del gas a temperatura e pressione standard;
- hg è la pressione barometrica del mercurio in centimetri;
- t è la temperatura in gradi Celsius;
- 0.00367 è il coefficiente di dilatazione termica, una costante comune a tutti i gas

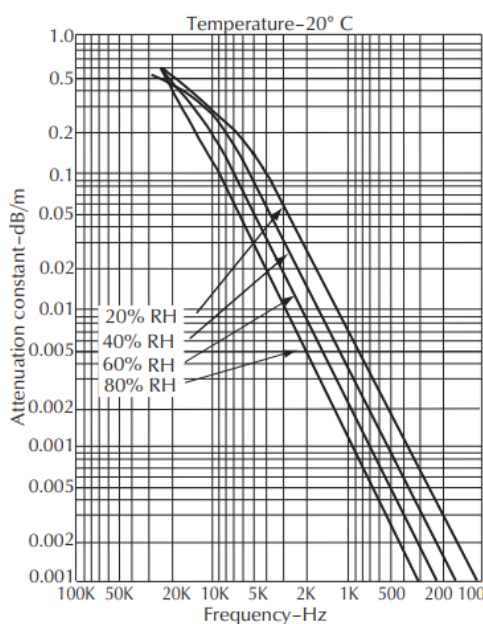
Possiamo verificare la densità standard dei gas a tabella [1](#)

Tabella 1: Tabella raffigurante la densità di alcuni gas a

Nome del gas	Simbolo	Densità(kg/m ²)
Aria	-	1.2930
Ammonia	NH ₃	0.7710
Nitrogen	N ₂	1.2507
Chlorine	Cl ₂	3.2170
Carbon dioxide	CO ₂	1.9760
Hydrogen	H ₂	0.0899
Methane	CH ₄	0.7170
Carbon Monoxide	CO	1.2500
Oxygen	O	1.4290
Water Vapour	H ₂ O	0.804

Assorbimento atmosferico

Rappresenta l'effetto di dissipazione dell'energia data dall'azione combinata di viscosità e calore del mezzo. Perdite di energia aggiuntive sono dovute all'umidità assoluta. Questo effetto comporta inoltre un aumento dell'attenuazione con l'aumento delle frequenze.

**Figura 2:** Tabella dei coefficienti di assorbimento dell'aria

Umidità

Il livello di umidità del gas si riferisce alla presenza o meno di molecole d'acqua nel mezzo. La sua influenza non è tanto impattante per quanto riguarda la velocità dell'onda, ma sull'assorbimento

acustico totale comportando un abbattimento di intensità a diverse frequenze.

Fenomeni di Riflessione

Le riflessioni sono alla base di ciò che chiamiamo riverbero. Consistono nella riflessione di un'onda sonora sulle diverse superfici che circondano l'evento acustico, esse siano pareti oppure oggetti che si interpongono nella propagazione dell'onda.

Affinché ci sia una riflessione, la superficie riflettente deve necessariamente essere più larga di almeno $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda. Quando l'oggetto è più piccolo di questa soglia si ha una diffrazione, ovvero l'onda sonora curva attorno ad esso.

Un altro fenomeno, che possiamo considerare inverso alla riflessione, è *l'assorbimento*. L'assorbimento è dovuto alle proprietà del materiale che, appunto, al posto di riflettere l'onda assorbono parte dell'energia, trattenendola e restituendo un'onda smorzata. Più un materiale è assorbente, più sarà rapido il decadimento dell'energia sonora nello spazio fino a tornare in una situazione di stabilità. La condizione di stabilità sussiste infatti, quando la quantità di energia assorbita è la medesima dell'energia prodotta.

Fenomeni di Rifrazione

La rifrazione similmente alla riflessione si ha quando è il mezzo di trasmissione a subire delle variazioni, comportando dunque una differenza nella propagazione in atto. Queste variazioni possono essere, per esempio, temperatura, densità o direttamente un mezzo diverso, basti pensare ad un'onda prodotta in aria che incontra una superficie d'acqua.

1.3 PSICOACUSTICA

Altro aspetto da tenere in considerazione è il nostro sistema uditivo. In un sistema lineare in frequenza data in input una lista di frequenze, l'output conterrà le stesse, anche se magari dissimili in ampiezza e fase. Il nostro apparato uditivo, infatti, a causa di secoli di evoluzione e cambiamenti ha sviluppato dei comportamenti che non lo rendono un sistema lineare, portando dunque a delle inesattezze dal punto di vista percettivo. Ecco alcuni esempi di fenomeni di non linearità a cui siamo sottoposti:

- Distorsione armonica: È la percezione di armoniche superiori di un tono puro. Questa distorsione può essere dovuta ad una pressione eccessiva dell'onda sul timpano;
- Tono di combinazione: Detto anche "*terzo suono di Tartini*" è un effetto psicoacustico che comporta nella percezione di un terzo suono, nonostante in input i suoni siano stati solo 2. La frequenza del tono ricostruito non sarebbe altro che la differenza tra i 2 toni di partenza
- Curve isofoniche: Il fenomeno delle curve isofoniche comporta una diversa percezione di ampiezza a per diverse frequenze ma aventi stesso SPL. Per fare un esempio una sinusoide da 1000 Hz a 110 Db SPL ha la stessa percezione di una sinusoide da 3000 Hz ma a 100 Db SPL (ballou - Handbook for Sound Engineers - 2008 - pag 43).

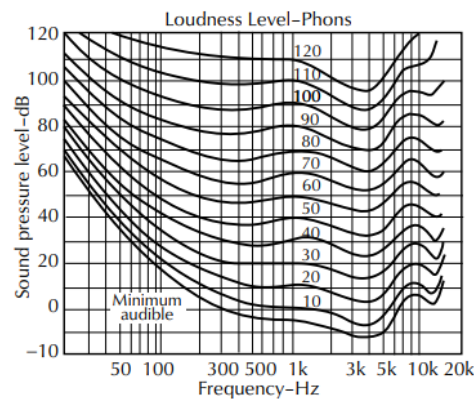


Figura 3: Grafico che mostra il comportamento delle curve isofoniche

Questo è anche il motivo per il quale siamo più sensibili nella banda intorno ai 4 KHz, comportando dolore nell'ascoltatore se sottoposto a db elevati.

Percezione della distanza

Più interessante ai fini della tesi è la percezione della distanza, tema chiave nello studio degli spazi e della propagazione del suono. È noto che, duplicata la distanza tra fonte sonora e ascoltatore, il SPL decade di 6 dB. Nonostante questo, affinché abbiamo la percezione della duplicazione della distanza c'è bisogno della diminuzione di almeno 20 dB (j. Blauert spatial hearing).

Un elemento che però ci permette di comprendere quando una fonte è lontana è la sua composizione spettrale, infatti, a causa dell'assorbimento dell'aria (del mezzo per essere più precisi) le frequenze

alte saranno assorbite maggiormente, comportando una presenza più elevata di basse frequenze.

Per questo, in modo tale da replicare distanza e vicinanza dalla fonte sonora, oltre a questi accorgimenti è da tenere in considerazione il rapporto tra suono diretto e riverberato. In un ambiente reale infatti, è proprio il rapporto tra le due sorgenti a determinare dove e quanto è distante un evento sonoro.

1.4 SPAZIO

Come citato poc'anzi quando si parla di suono bisogna considerare quindi lo spazio e il mezzo in cui l'onda si propaga. Possiamo classificare gli spazi in diverse categorie, le principali sono (Davis - Pag 178):

- **Free Field:** È definito così uno spazio uniforme, libero da ostacoli che potrebbero produrre delle riflessioni o rifrazioni e non contaminato da sorgenti sonore estranee. Esempi di questo tipo sono le sale anecoiche (senza eco), camere particolari il cui scopo è quello di ridurre al minimo le riflessioni delle onde, utili per eseguire test precisi su apparecchiature audio.
- **Reverberant field:** È uno spazio chiuso, con pochissimo assorbimento acustico, in cui la pressione sonora è uniforme in ogni punto e le onde si propagano allo stesso modo in tutte le direzioni. Caratteristiche di questo tipo possiamo trovarle in luoghi come camere vuote o cavità.
- **Semireverberant Field:** È il tipo di spazio più comune che possiamo incontrare, nel quale l'energia è sia assorbita che riflessa. L'energia si muove in più direzioni ma è comunque percepibile il punto di origine della fonte di generazione dell'evento sonoro.

1.4.1 Risposta all'impulso

Al giorno d'oggi conosciamo una tecnica in grado di eseguire una fotografia delle caratteristiche acustiche in grado di descrivere come il suono si propaga da un punto di emissione ad un ricevitore.

Parliamo di *Risposta all'impulso* ovvero del modello fisico-matematico di un sistema lineare, non dipendente dal tempo, composto solo da un input ed un output (A.Farina - ROOM IMPULSE RESPONSES AS TEMPORAL AND SPATIAL FILTERS - 2006).

Le informazioni contenute sono sia relative al dominio del tempo, ad esempio riflessioni e ritardi nella propagazione che, relative al dominio della frequenza, comportando quindi modifiche dal punto di vista spettrale.

Il sistema utilizzato viene detto *Black box* che, come detto in precedenza è composto da un singolo input ed un singolo output. All'interno di questa black box gli elementi che concorrono all'acquisizione dei dati matematici dello spazio che si vuole registrare sono:

- Un generatore di segnale: Tipicamente un pc;
- Un amplificatore di segnale;
- Un diffusore di segnale: il quale riproduce il segnale nello spazio in modo omnidirezionale;
- Un ricevitore: un microfono anch'esso omnidirezionale, in quanto vogliamo escludere la direzionalità dallo studio.

Per misurare quindi la risposta all'impulso riproduciamo il segnale attraverso l'altoparlante nello spazio e contemporaneamente registriamo come, quel segnale, si propaga in quel determinato spazio e in quelle determinate condizioni, attraverso il microfono.

Il segnale originale consiste in uno sweep esponenziale il quale parte dalla frequenza f_1 , termina a frequenza f_2 in t secondi.

Il segnale riverberato conterrà al suo interno componenti spettrale non presenti nell'originale, che corrispondono alla risposta lineare in frequenza dello spazio. Attraverso un processo di convoluzione, ampiamente spiegato e perfezionato dal prof. A Farina, siamo in grado di restituire la risposta all'impulso del sistema lineare.

È da tenere conto che però una singola registrazione non è in grado di descrivere tutto lo spazio. La risposta all'impulso, come già detto, è relativa soltanto al punto in cui è posizionato il ricevitore e soltanto per il punto da cui è emesso il suono. Per la mappatura dello spazio per restituire un'immagine fedele dello spazio sono necessarie numerose registrazioni. Come per una fotografia, maggiore è il numero di "pixel", più definita sarà l'immagine. Per questo è un lavoro che, soprattutto per luoghi ampi, richiede moltissimo tempo e spesso si tende ad effettuare un numero di registrazioni non necessario a restituire un modello fedele.

1.4.2 Storia dello studio degli spazi

Storicamente, in ambito musicale, lo spazio è stato sempre presente ed essenziale durante le performance. Basti pensare agli audito-

rium greci, dove la conformazione permette sia un rinforzo in termini di ampiezza, ma anche una forte intelligibilità delle parole in modo tale da raggiungere chiaramente tutti i presenti. Gli ascoltatori, posti ad un'angolazione di circa 120 gradi, ricevevano il suono diretto dall'oratore, seguito dalle riflessioni provenienti sia dal pavimento dell'orchestra, che dal retro del palco, anche se con minor intensità. Il pal-



Figura 4: Foto del teatro greco di Siracusa



Figura 5: Foto dell'auditorium Nino Rota del conservatorio di Bari

co, inoltre, aveva un'altezza compresa tra 1m e 3.6m, comportando una differenza nell'angolo di incidenza del suono diretto (Auditorium Acoustics and Architectural Design Di Michael Barron). Infine, un altro accorgimento degli architetti greci, i quali avevano scoperto le proprietà di assorbimento, era il posizionamento tra le sedute di vasi contenenti ceneri, i quali avevano lo scopo di assorbire l'energia sonora che sarebbe stata riflessa indietro verso il palco. Un'altro esempio

in cui vediamo lo spazio come protagonista, è il caso degli organi, in cui il luogo è la vera e propria cassa armonica dello strumento. L'acustica dell'organo è fortemente legata alla sua ubicazione, infatti, a differenza di altri strumenti musicali i quali possono essere spostati e trasportati, per l'organo non è possibile. Inoltre i luoghi provvisti di organo sono spesso molto riverberanti, come ad esempio le chiese e i teatri, e questo concorre alla definizione timbrica dello strumento

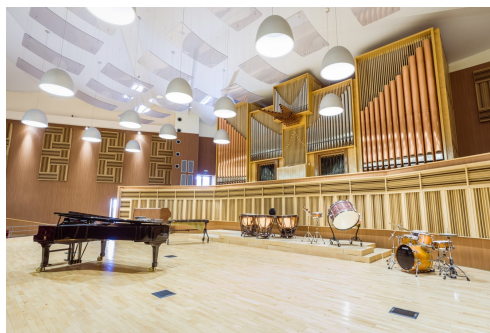


Figura 6: Foto dell'organo presente nell'auditorium N.Rota

Lo spazio come parametro

Si è dovuto attendere però circa gli anni 60 affinché lo spazio diventasse un vero e proprio parametro compositivo.

“*Gesang der Jünglinge*” di Karlheinz Stockhausen è un’opera importantissima per l’epoca in cui è stata composta. Il brano, nato pentafonico e successivamente ridimensionato in quadrifonia, rappresenta l’avanguardia del serialismo integrale. Come accennato in precedenza, questo lavoro è il primo esempio in cui vediamo la gestione dello spazio come parametro compositivo, al pari di ampiezza, altezza e timbro. Gli altoparlanti, disposti circolarmente attorno agli ascoltatori, creano uno spazio in cui immergersi permettendo complessi movimenti tra gli stessi. Vengono infine introdotti termini quali “Intervallo spaziale” e “Accordi di spazio”.

1.5 ARCHITETTURE DI RIVERBERAZIONE ARTIFICIALE

Non esiste un unico modo di ricreare un riverbero ma, come è possibile intuire, negli anni si sono sviluppate differenti tecniche per raggiungere questo scopo. Innanzitutto bisogna definire 2 categorie di principali:

- Analogici
- Digitali

Le tecniche di riverberazione analogica, non presentano processi di trasformazione digitale del segnale, senza quindi utilizzare operazioni matematiche al loro interno. Di questa categoria citiamo:

- Riverberi Elettromeccanici: Questa tipologia di riverbero utilizza un elemento riverberante all’interno del proprio circuito. Due

esempi degni di nota sono gli “*spring reverb*” e “*plate reverb*” che, come suggerisce il nome, utilizzano molle, nel primo caso e placche metalliche, nel secondo, per simulare l'effetto del riverbero sul segnale originale. In poche parole l'elemento riverberante fungeva da ponte tra l'entrata e l'uscita del sistema, modificando le proprietà acustiche del segnale in input.

- Camere riverberanti: Questa tipologia si serve di uno spazio realmente esistente al cui interno è presente un diffusore ed un microfono. Il segnale originale viene emesso dall'altoparlante che, diffondendosi nello spazio circostante, acquisisce un riverbero non presente all'origine. Il risultato viene poi successivamente registrato dal microfono, conservando le nuove proprietà.

Per quanto riguarda le tecniche di *riverberazione digitale*, parliamo di processi in cui il segnale originale, digitalizzato, subisce modifiche tramite calcoli matematici. La tecnica più diffusa è quella del riverbero algoritmico che prevede una serie di *somme*, *prodotti* e *delay*. Successivamente parleremo in modo più dettagliato di questa tecnica.

Degna di nota è un'ulteriore tecnica digitale, diffusasi negli ultimi anni, che utilizza la *convoluzione*. Senza entrare troppo nei dettagli la convoluzione è un processo matematico di moltiplicazione tra due segnali che avviene campione per campione. La convoluzione è utilizzata tra il segnale originale e la risposta all'impulso di uno spazio esistente, producendo in output un segnale avente le medesime caratteristiche di quest'ultimo.

1.6 NATURAL SOUNDING SCHROEDER REVERBERATION

La base da cui partiamo per la realizzazione del riverbero algoritmico sono gli studi fatti da Manfred R. Schroeder riportati nel suo articolo “Natural Sounding Artificial Reverberation” pubblicato nel 1962 in seguito agli esperimenti condotti a Murray Hill, presso i Bell Laboratories.

Manfred Robert Schroeder è stato un fisico tedesco conosciuto per i suoi studi su acustica, telecomunicazioni e computer grafica. Nasce nel 1926, ad Ahlen in Germania e già da giovane mostra interesse nell'elettronica e nelle telecomunicazioni. Dopo un periodo di interruzione dallo studio a causa del suo reclutamento durante la Seconda Guerra mondiale, Manfred conclude i suoi studi sotto la tutela del

prof Erwin Meyer, un' autorità nel mondo dell'acustica. In seguito alla sua laurea, il suo lavoro è stato lodato dall'amministrazione dei Bell Laboratories, i quali gli hanno offerto un impiego nella divisione di ricerca a Murray Hill, New Jersey. Da lì in poi ha proseguito le sue ricerche spaziando dalle telecomunicazioni all'acustica conseguendo numerosi riconoscimenti in tutto il mondo.

Il sopracitato laboratorio Bell Labs è inoltre importante da citare in quanto, oltre ad essere un' istituzione nel campo delle telecomunicazioni, è un eccezionale esempio di collaborazione e progresso. Il laboratorio era un apparato di Bell System, una società telefonica che ha operato in America fornendo servizi a livello nazionale. Lo scopo del laboratorio, dunque, era quello di fornire nuove tecnologie all'avanguardia nel campo delle telecomunicazioni. Da ciò si può facilmente intuire innanzitutto il grande capitale e le tecnologie messe a disposizione dei ricercatori, tra cui Schroeder, e dell'ambiente ricco di menti portate all'innovazione tecnologica.

1.6.1 Analisi

Come detto, partirò dall'analisi fatta da Schroeder per la progettazione del riverbero. In quel periodo, parliamo del 1962, gli studi e le tecnologie in grado di sintetizzare un riverbero erano acerbe. Le tecniche più diffuse all'epoca, le quali partivano da delay creati su nastro magnetico, disco o molle, non producevano un effetto fedele al riverbero naturale per 2 aspetti principali:

- La loro risposta, sia in frequenza che in ampiezza, non era piatta, comportando una "colorazione" nel risultato, soprattutto se solo una piccola parte del segnale diretto veniva missato al segnale riverberato.
- La densità degli echi non era sufficiente a creare un risultato credibile. La ricerca di Schroeder ci mostra che circa 1000 echi al secondo è un risultato accettabile per un riverbero sintetico. Consideriamo che in un ambiente reale le riflessioni sono infinite, ma questo sarebbe un risultato quasi impossibile da raggiungere

Nel suo articolo "Natural Sounding Artificial Reverberation", M. R. Schroeder mostra il suo approccio alla risoluzione per le problematiche sopracitate.

In primo luogo per ovviare al primo problema è necessario creare una linea di ritardo con feedback che abbia una risposta piatta in

ampiezza e frequenza. Utilizzando lo schema proposto da Schroeder, abbiamo un dispositivo (informatico, in questo caso) incaricato di restituire un singolo eco, dopo un ritardo temporale (t)

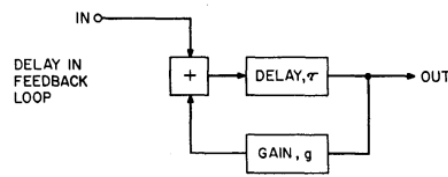


Figura 7: Delay all'interno di un feedback

Dato che l'obiettivo è quello di produrre un elevato numero di echi a partire da un numero contenuto di oggetti, inseriamo dunque la linea di ritardo in un feedback avente come moltiplicatore (g) < 1 . Il risultato sarà un segnale che decade di g volte ad ogni ciclo.

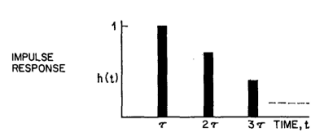


Figura 8: risposta in ampiezza

La sua risposta in frequenza invece, presenta in modo periodico picchi e valli sullo spettro, aventi come valori rispettivamente $(1 + g)$ e $(1 - g)$. L'autore, data la somiglianza ad un pettine, rinomina il ciclo sopra descritto *Comb Filter*, e così mi riferirò al medesimo d'ora in avanti.

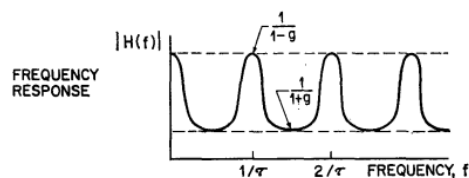


Figura 9

Questo comportamento del filtro comporta però una certa non esattezza in termini di spettro che Schroeder cerca di evitare, raffinando l'algoritmo tramite successive integrazioni. La soluzione proposta dall'autore e Logan è il messaggio del suono diretto moltiplicato per $(-g)$ e il suono riverberato moltiplicato per $(1 - g^2)$. Questo comporta una risposta piatta per tutte le frequenze. Il filtro risultante, chiamato *All Pass Filter*, è descritto secondo il seguente schema e per le successive integrazioni, viene utilizzato come unità riverberante di base.

Per risolvere la problematica della densità degli echi, la soluzione di Schroeder è quella di connettere in serie più riverberatori, in mo-

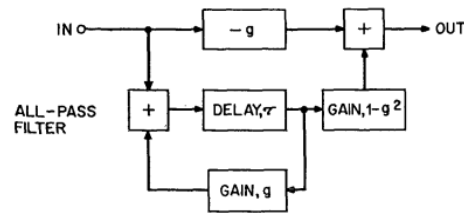


Figura 10: All Pass filter di Schroeder

do tale che la densità cresca in modo frattale per ogni unità connessa. Dato che abbiamo risolto il problema di una possibile colorazione del filtro, possiamo non preoccuparci che questo avvenga per una connessione in serie.

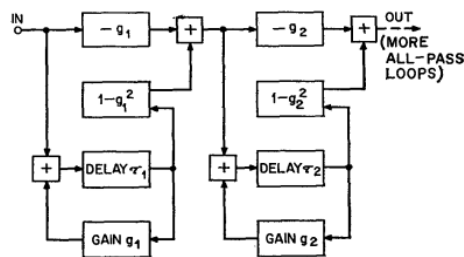


Figura 11: sequenza di 5 All Pass

La densità che si cerca di raggiungere, ovvero quella di circa 1000 echi al secondo, è facilmente raggiungibile con 5 riverberatori in serie (il numero prodotto è di circa 810). A differenza di Schroeder abbiamo a disposizione molte più risorse, in termini di potenza di calcolo infatti possiamo serializzare molti più riverberatori e raggiungere un numero di riflessioni elevatissimo.

Successivamente, avendo constatato l'efficienza del riverberatore All Pass, Schroeder cerca di implementare alcune caratteristiche della riverberazione naturale.

Esse sono:

- Missaggio del suono diretto con il suono riverberato, senza alterare la struttura di All Pass;
- Inserimento di un leggero sfasamento temporale tra, appunto, il segnale diretto e il segnale riverberato, dato che come sappiamo, il suono diretto raggiunge l'ascoltatore prima delle riflessioni;
- La dipendenza alle frequenze del tempo di riverbero;

Il segnale non riverberato restituito dalla sequenza di all-pass risulta parecchio ininfluenza, per questo Schroeder consiglia di multipli-

care per $(-g)$ e sommare il segnale diretto proprio con questa serie, come illustrato in figura 12.

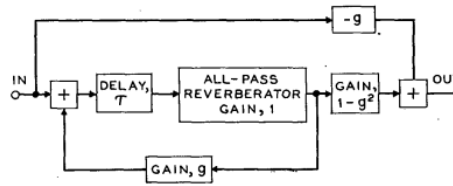


Figura 12: sequenza di All Pass con aggiunta di segnale diretto

Il box chiamato “All-pass reverberator” contiene, come detto, la serie di All Pass, inserito all’interno di un ulteriore feedback loop. Da notare il delay iniziale, il quale permette un ritardo rispetto al suono diretto, rifornendo anche il secondo punto.

Un ultimo aspetto da considerare dell’articolo, è l’utilizzo combinato di filtri Comb e All-pass per ricercare, al contrario dell’obiettivo originale, una risposta frequenziale altamente irregolare, come nel caso delle stanze reali. In seguito agli esperimenti condotti ai Bell Telephone Laboratories, in cui si è scoperto che ad alte densità di riflessioni le irregolarità sono impercettibili, si è pensato di ricostruire l’algoritmo in modo tale da ricreare le condizioni di una stanza reale. Lo schema è raffigurato in figura 13

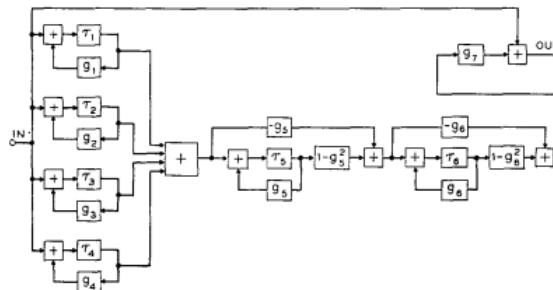


Figura 13: Configurazione Comb-All Pass

Questa nuova configurazione conformazione prevede:

- Un certo numero di Filtri Comb, aventi tempi di delay incommensurabili oppure primi, connessi in parallelo. Questi filtri produrranno le cosiddette “Early reflections”;
- Un certo numero di All-Pass connessi in serie, in modo tale da incrementare la densità degli echi.
- Al tutto verrà aggiunta una quantità di segnale diretto come nelle precedenti iterazioni.

1.7 MOORER'S BUSINESS

Un successivo studio sulla simulazione digitale dei riverberi è stato condotto da *James A. Moore* intorno al 1979, pubblicando i suoi risultati su *Computer Music Journal*, Vol. 3, No. 2. L'articolo, intitolato *"About this Reverberation Business"*, tratta di ulteriori integrazioni e accorgimenti che possono essere applicati durante lo sviluppo di un riverbero.

L'autore, infatti, partendo dalla letteratura già presente, tra cui gli articoli di Schroeder e J.Chowning, sperimenta nuovi algoritmi, rendendo più snelli i precedenti, sempre tendendo ad una realistica del riverbero.

Innanzitutto vengono ripresi i sistemi fondamentali dell'analisi di Schroeder, vale a dire, il filtro Comb (visto in figura 7) e il filtro All Pass (visto in figura 10). Quest'ultimo in una seconda versione caratterizzata da una singola moltiplicazione, a fronte delle 3 precedenti, rendendolo più sostenibile a livello di computazione.

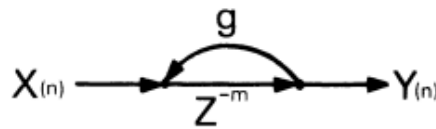


Figura 14: Filtro Comb di Moorer

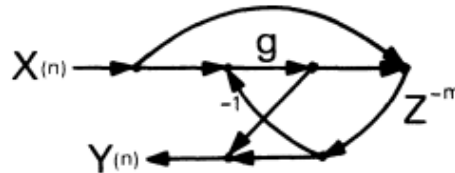


Figura 15: Filtro All Pass di Moorer

Aventi le seguenti funzioni di trasferimento:

$$T(z) = \frac{g + z^{-m}}{1 + gz^{-m}} \quad (4)$$

$$T(z) = \frac{z^{-m}}{1 - gz^{-m}} \quad (5)$$

Osservando la funzione trasferimento dell'All Pass possiamo notare come il coefficiente del numeratore sia in ordine inverso di quello al denominatore, forzando gli zeri ad essere reciproci dei poli, definendo il comportamento All Pass del filtro.

Seguendo il lavoro fatto da Schroeder, per utilizzare i sistemi come riverberatori è necessario utilizzare una combinazione degli stessi.

Le combinazioni sono le medesime viste in precedenza e proposte da Schroeder (fig 11 e 13). Parliamo dunque di una serie di All Pass nel primo algoritmo e, una cascata di comb filter seguiti da 2 All Pass nel secondo

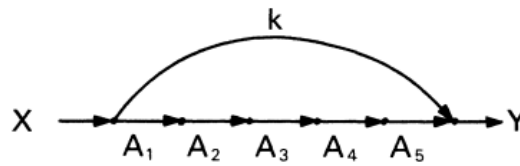


Figura 16: Filtro Comb di Moorer

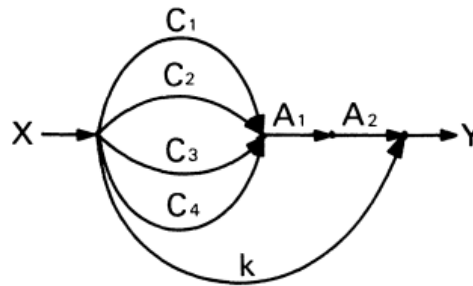


Figura 17: Filtro All Pass di Moorer

1.7.1 Problematiche Del riverberatore

Il riverberatore così ottenuto, però, non rispecchia alcune caratteristiche desiderate, portando ad aberrazioni acustiche non presenti in natura. Le problematiche riscontrate possono essere riassunte in:

- riverberazione non ottimale per suoni impulsivi e con transienti molto corti, producendo pattern ritmici composti dagli echi al posto di un riverbero uniforme;
- riverberazione con un carattere metallico, soprattutto per tempi molto lunghi;

A questo punto l'autore considera l'utilizzo di nuove unità riverberanti, ma comunque mantenendo la struttura Comb-All Pass, ritenuta la migliore in termini di risposta.

1.7.2 Nuove unità riverberanti

Nel corso delle sue sperimentazioni Moorer costruisce altre 4 unità riverberanti, alcune molto simili tra di loro in quanto i concetti alla base restano i medesimi. In particolare, l'intuizione dell'autore è stata quella di introdurre un ulteriore filtro all'interno dei feedback.

Lo scopo del filtro, ricollegandoci agli argomenti trattati nei capitoli precedenti, è quello di simulare l'attenuazione delle alte frequenze causate dall'aria. Come già detto, è un coefficiente che, in base a caratteristiche quali umidità e temperatura, sottrae energia alle alte frequenze dello spettro, scurendo quest'ultimo.

1.7.3 Nuove unità riverberanti

Come detto, le unità proposte sono 4, ma una in particolare sembra essere la più efficiente, ovvero sia:

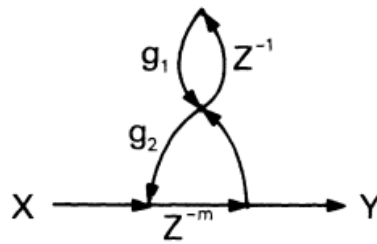


Figura 18: Filtro Comb con all'interno un filtro Passa Basso

Come è possibile notare, si tratta di un Comb filter al cui interno è presente un filtro di tipologia Low pass $T(z)$. Il valore di g_1 controlla il roll-off del filtro e in seguito troveremo un modo per capire quale valore sarà più conveniente. All'interno, i valori g_1 e g_2 seguiranno la condizione di $g_1 + g_2 < 1$ per motivi di stabilità.

La risposta in frequenza, a detta di Moorer, non sarà in grado di restituire un valore coerente alla realtà, in quanto il singolo filtro Low pass (di primo ordine) è un compromesso per rendere il tutto più efficiente.

Successivamente, nell'articolo viene anche consigliato di tenere in considerazione della modifica dei tempi di delay in base alle caratteristiche dell'aria (temperatura e umidità), anche se nel testo si fa riferimento a valori standard e non modificabili. I valori di g , dipendenti dall'umidità, sono in seguito esposti grazie agli studi di Moorer nel seguente grafico.

1.7.4 In conclusione

Moorer conclude la sezione riportando i risultati ottenuti. L'inserimento del filtro permette una miglior riverberazione per i suoni impulsivi, infatti il tempo di ogni eco risulta essere esteso, soprattutto per quanto riguarda le prime riflessioni e nascondendo i vuoti creati

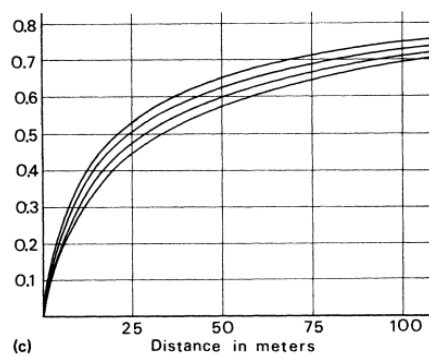


Figura 19: Grafico raffigurante l'andamento del valore di g a causa dell'assorbimento dell'aria

dalla bassa densità. Il risultato sonoro non è particolarmente entusiasmante a detta dell'autore, ma sopperisce ad alcune mancanze delle precedenti iterazioni, rendendo questo sistema il più efficace al momento della scrittura.

2 | IMPLEMENTAZIONE

2.1 FILTRI

Prima di proseguire con l'analisi del riverberatore, c'è bisogno di introdurre il concetto di filtro, oggetto essenziale per la creazione di quest'ultimo. Un filtro possiamo definirlo come un dispositivo o rete di dispositivi in grado di separare segnali complessi in base alla loro frequenza. Un filtro, come suggerisce il nome, filtra e permette ad alcune bande di frequenze di essere successivamente emesse oppure escluse dall'output finale. Alcune caratteristiche presenti nella maggior parte dei filtri sono:

- Banda Passante: Banda di frequenze che passa attraverso un filtro e che subisce una perdita di meno di 3 dB;
- Banda Stoppata: Banda di frequenze che passa attraverso un filtro e che subisce una perdita di 3 db o più;
- Frequenza di Taglio È la frequenza dove il filtro inizia ad eseguire modifiche al segnale, come abbattimenti o enfattizzazioni;
- Ordine: È una caratteristica definita dal numero di oggetti all'interno del filtro che concorrono al medesimo risultato, di solito inerenti a scopi di risposta in frequenza del filtro. Se tutti gli elementi sono eterogenei, per esempio passa basso o passa alto, l'attenuazione sarà di 6 db per ordine. Un filtro passa basso del quarto ordine avrà abbattimento di 24 db, ma un passa banda del medesimo ordine ne abatterà soltanto 12.

2.1.1 Categorie di filtri

In seguito a queste caratteristiche, possiamo ad eseguire brevi categorizzazioni di filtri in base alla loro componentistica e comportamenti.

Una prima categorizzazione che possiamo eseguire, riguarda la presenza o meno, di componenti che amplificano il segnale. Parliamo di:

- Filtri Passivi: Sono filtri che non possiedono amplificatori di segnale, quindi il loro unico scopo è quello di attenuare ciò che li attraversa;
- Filtri Attivi: Al contrario, i filtri attivi hanno componenti che permettono l'amplificazione di determinate bande o dell'intero segnale, aggiungendo energia dove necessario.

Parliamo di **equalizzatore** per identificare un dispositivo il cui scopo è quello di sopperire a caratteristiche non gradite, riguardanti ampiezza, frequenza o fase, in modo tale da ricreare la risposta desiderata. Gli equalizzatori, per compiere ciò, sono costituiti da filtri, implementati per svolgere diversi tipi di modifiche.

2.2 FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

Prima di proseguire è necessario affrontare in questa sezione un concetto matematico che negli anni ha contribuito allo studio e alla creazione di filtri digitali grazie alla sua estrema versatilità, ovvero le funzioni di trasferimento.

In breve, una funzione di trasferimento è la trasformata della risposta all'impulso di un sistema LTI (Linear Time-Invariant) e riassume in sé le sue caratteristiche.

Si presenta nella seguente forma:

$$H(s) = \frac{\sum_{k=0}^K a_k s^k}{\sum_{n=0}^N a_n s^n} \quad (6)$$

È definita tramite una funzione razionale fratta, ovvero una funzione costituita dal rapporto di due polinomi. Ognuno dei due polinomi individua un'equazione rispettivamente di k -mo e n -mo grado ovvero che ci saranno k soluzioni per il polinomio al numeratore ed n soluzioni per il polinomio al denominatore. Queste soluzioni saranno tutti i valori che rendono nulla la funzione: quelle che azzerano il numeratore si dicono **zeri** ($-z_k$), quelle che azzerano il denominatore si dicono **poli** ($-p_n$).

La forma fattorizzata della funzione di trasferimento è la seguente ed è utilizzata per il tracciamento dei grafici di risposta in frequenza dei filtri (detti diagrammi di bode)

$$H(s) = \frac{\prod_{k=1}^k (s + z_k)}{\prod_{n=1}^n (s + p_n)} \quad (7)$$

Semplificando il tutto e ricollegandoci all'argomento principale, è ne-

cessario comprendere che poli e zeri corrispondono alla frequenza di taglio del filtro che la funzione di trasferimento rappresenta.

2.3 TIPOLOGIE DI FILTRO

Come detto in precedenza, i filtri si distinguono per via della loro architettura alla quale consegue un diverso comportamento. Ecco alcune tipologie di filtro, tra le più comuni:

2.3.1 Low-Pass

Permette l'attenuazione delle frequenze superiori alla frequenza di taglio. La sua funzione di trasferimento è la seguente

$$H(s) = \frac{1}{1 + st} \quad (8)$$

dove con st indichiamo la frequenza di taglio.

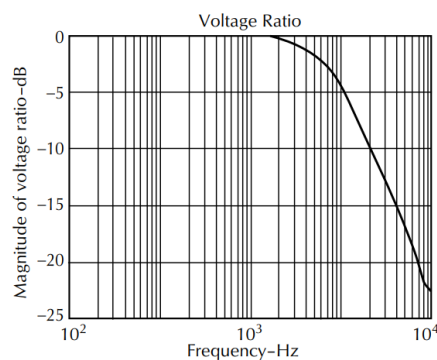


Figura 20: Diagramma di Bode di un filtro passa basso
da D. Davis - Sound System Engineering - 2013

2.3.2 High-Pass

Permette l'attenuazione delle frequenze inferiori alla frequenza di taglio. La sua funzione di trasferimento è in figura [21](#)

$$H(s) = \frac{st}{1 + st} \quad (9)$$

dove con st indichiamo sempre la frequenza di taglio. La risposta in frequenza ottenuta è la seguente

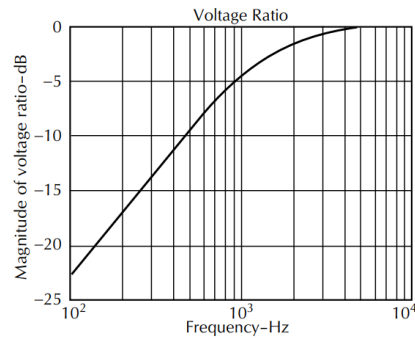


Figura 21: Diagramma di Bode di un filtro passa alto

2.3.3 Band-Pass

Permette il passaggio solo ad una determinata banda di frequenze. la sua funzione di trasferimento è la seguente

$$H(s) = \frac{(1 + st_1)(1 + st_4)}{(1 + st_2)(1 + st_3)} \quad (10)$$

Considerando che $t_1 > t_2 > t_3 > t_4$ e che il calcolo di poli e zeri risulta:
 $z_1 = 1/t_1, z_2 = 1/t_4, p_1 = 1/t_2, p_2 = 1/t_3 \dots$

La risposta in frequenza ottenuta è in figura [22](#)

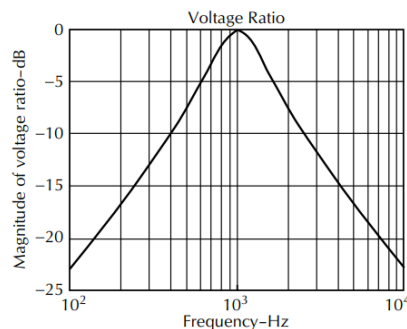


Figura 22: Diagramma di Bode di un filtro passa banda

2.4 FILTRI DIGITALI

Ovviamente tutto ciò che abbiamo visto fino a questo punto è puramente nel dominio continuo. Possiamo dunque procedere all'implementazione di tali modelli matematici in digitale. I filtri digitali utilizzano in larga scala algoritmi ricorsivi aventi al loro interno moltiplicazioni e addizioni, per i quali gli attuali strumenti informatici di cui disponiamo, sono ottimizzati. Definiamo 2 macro categorie di filtri digitali ovvero i cosiddetti filtri **FIR** e **IIR**.

- IIR: Infinite impulse response;

- FIR: Finite impulse response.

Possiamo definire i filtri IIR come caratterizzati da una risposta all'impulso unitario non limitata (parlando di numero di campioni) e un'ampiezza tendente a zero. Questo rende i filtri IIR molto simili alla loro controparte analogica (esistente nel tempo continuo). Per quanto riguarda la loro composizione strutturale, notiamo generalmente una funzione di trasferimento costituita da un rapporto polinomiale, con poli e zeri. È esclusa una situazione in cui siano presenti soli zeri. Inoltre la costruzione di questi filtri prevede l'utilizzo di sistemi di feedback, e per questo, è risaputo che queste strutture hanno un comportamento instabile.

Parlando di filtri FIR, invece, possiamo affermare che la loro risposta all'impulso unitario è composta da un numero finito di campioni e per questo non associabili a nessun modello analogico. A differenza dei filtri IIR, i filtri FIR, presentano una funzione di trasferimento a soli zeri. Possedere una risposta all'impulso unitario limitata comporta, inoltre, una stabilità nell'implementazione, ma di conseguenza una necessità di maggiore potenza di calcolo. (Lindoro del Duca - Musica Digitale - pag 85)

2.5 DELAY E UTILIZZO

Il *Delay* è il ritardo temporale imposto ad un evento sonoro. Il *Delay* può essere percepito soltanto se messo in relazione ad un altro segnale, ovvero, il suono stesso ma non ritardato. Questo fenomeno si manifesta in due situazioni: quando, in un ambiente riverberante il suono diretto raggiunge l'ascoltatore prima delle sue riflessioni, oppure quando, un delay elettrico, è volontariamente inserito per pareggiare due sorgenti sonore e simulare un' unica provenienza.

Il delay è inoltre un componente chiave nella costruzione dei filtri digitali. Nel dominio digitale, infatti, i singoli campioni di una sequenza vengono sottoposti a numerose operazioni (implicando un processo di quantizzazione) producendo una seconda sequenza di risultati che comporranno il segnale filtrato. Le operazioni utilizzate sono: Somma, Prodotto e Delay (di un campione). L'espressione che determina il comportamento del filtro è detta equazione differenza e, in base al numero di elementi di ritardo presenti, possiamo indicare l'ordine dell'equazione.

L'equazione differenza del primo ordine generale è definita secondo la seguente equazione:

$$Y(z) = A_0 * x(z) + A_1 * z^{-1} * x(z) + B_1 * z^{-1} * y(z) \quad (11)$$

L'equazione è scritta nel dominio z , con z detta frequenza complessa. I valori di z che rendono rispettivamente nullo numeratore e denominatore vengono detti zeri e poli della funzione.

Tutte le equazioni differenza del primo ordine sono determinate dai coefficienti A_0, A_1, B_1 . Bisogna sempre considerare che un'equazione del primo ordine può descrivere solo un filtro passa basso o passa alto avente un'attenuazione di massimo 6 dB/ottava.

Partendo dall'equazione differenza, infine, possiamo ricavare la funzione di trasferimento $H(z)$ avente la seguente forma:

$$H(z) = \frac{(A_0 + A_1 * z^{-1})}{(1 - B_1 * z^{-1})} \quad (12)$$

In questo capitolo sarà presente l'analisi degli algoritmi che compongono il sistema riverberante creato. Gli algoritmi sono stati scritti nel linguaggio Faust sulla base delle ricerche svolte da Schroeder e Moorer e presentano le dovute modifiche che rispecchiano l'idea iniziale, vale a dire utilizzando parametri quali temperatura, pressione e tipologia del gas per variare la risposta del riverbero.

2.6 ALGORITMI DI SCHROEDER

I primi algoritmi sono stati creati partendo dalle soluzioni ottenute da Schroeder e utilizzati a scopo di test. L'obiettivo è stato quello di ricreare passo dopo passo le unità descritte nell'articolo Natural Sounding Artificial Reverberation.

2.6.1 Algoritmi fondamentali

Partendo quindi dagli elementi fondamentali, abbiamo, come primo sistema il filtro Comb descritto in 7.

```
dfld(t, g) = ( + : de.delay(ma.SR,t-1))~*(g) : mem; //delay feed loop
process = os.impulse : dfld(1000,.707);
```

Il codice presenta le variabili t e g che rappresentano rispettivamente il numero di campioni di ritardo e il moltiplicatore del feedback. La funzione `de.delay` è utilizzata per il ritardo di un determinato numero di campioni. Il simbolo `~` permette l'utilizzo di una recursione, ovvero divide il segnale inviando una sua copia all'entrata

del processo, creando *feedback* Il diagramma di questo codice è in figura 23.

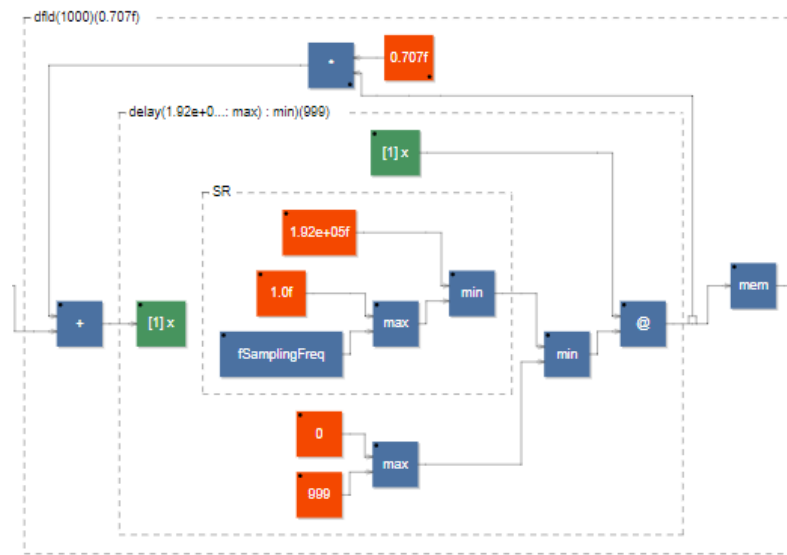


Figura 23: delay feedback loop

Il secondo algoritmo derivato permette di realizzare un filtro All Pass, come quello descritto in figura 10

```
apf(t,g) = _ <: *(-g) + (dfld(t,g)*(1-g^2));
process = os.impulse : apf(1,.71);
```

Il comportamento All Pass è dato dalla somma del segnale ritardato moltiplicato per $(1 - g^2)$ e il segnale diretto moltiplicato per $-g$ Il diagramma di questo codice è in figura 24.

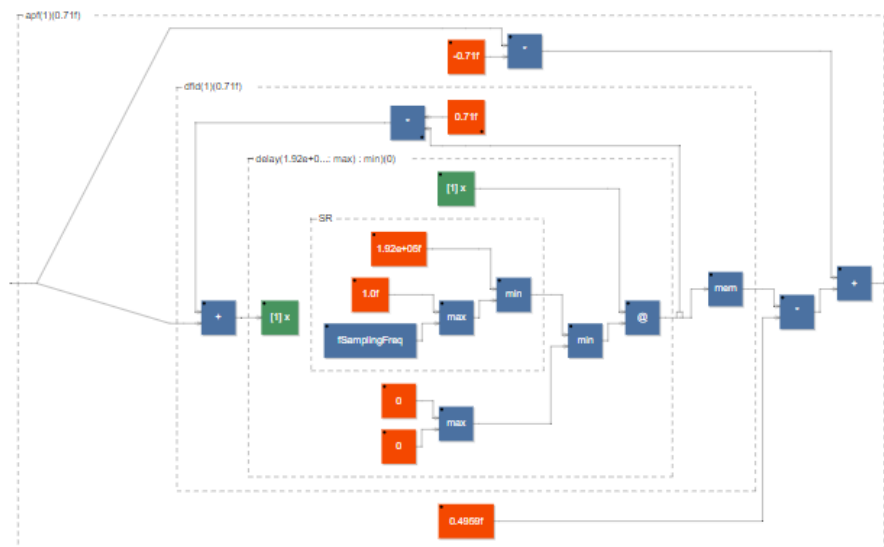


Figura 24: All Pass

2.6.2 Algoritmi derivati

I prossimi algoritmi sono i successivi descritti da Schroeder. Presentano una serie di miglioramenti che auspicano ad una maggior naturalezza nella risposta del filtro. Come abbiamo visto in figura 12, creiamo un All Pass contenente un secondo All Pass e un delay al suo interno, per simulare il ritardo che intercorre tra il suono diretto e il suono riverberato.

il nuovo All Pass è dunque:

```
dflda(t,g) = (+ : de.delay(ma.SR,t-1) : apf(t,g))~ *(g) : mem;
```

Il suo diagramma lo troviamo in figura 25

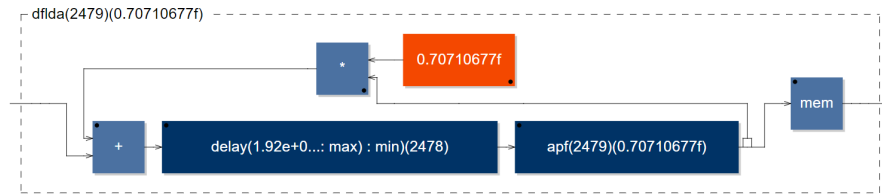


Figura 25: Nuovo All Pass

Dato che abbiamo la necessità di missare il risultato del precedente filtro con il segnale diretto, creiamo un secondo oggetto che ci permette di farlo.

```
apfn(t,g) = _ <: *(-g) + dflda(t,g) * (1-g^2);
```

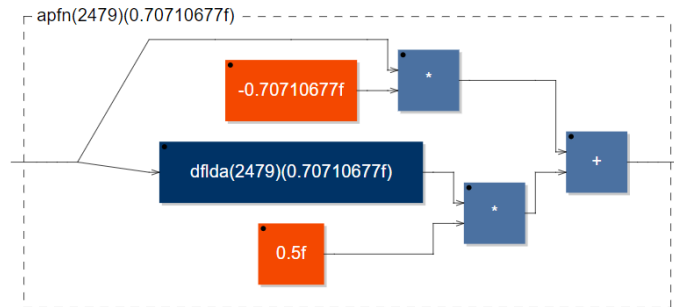


Figura 26: Nuovo All Pass con mix segnale diretto

Il valore di `g`, inoltre, permette di decidere la quantità di segnale riverberato che vogliamo, come se fosse un pomello "Dry/Wet".

2.6.3 Algoritmi Combinati

Come già visto nel Capitolo 3, queste unità riverberanti non risultano particolarmente efficienti dal punto di vista della densità, se prese singolarmente, quindi il prossimo passo, come suggerito da

Schroeder, è quello di creare delle reti di riverberatori combinando queste unità fondamentali.

Le due tipologie proposte consistono in una serie di All Pass connessi (figura 11), per la prima e, una serie di Comb connessi in cascata seguiti da 2 All Pass in serie, per la seconda. Durante questa fase sono stati utilizzati numeri primi come valori dei ritardi in modo da evitare errori dovuti al campionamento.

L'algoritmo per la configurazione in serie risulta essere

```
apfseq = seq(i, 5, apf(ba.take(i+1, primet10),.7));
```

La lista "primet10" è stata caricata con i valori dei vari t. Come suggerito dall'autore, si è cercato di utilizzare numeri primi che mantenessero una relazione di 1/3 l'uno dall'altro. Il diagramma risultante è in figura 27.



Figura 27: Sequenza di All Pass

Il secondo algoritmo, per la configurazione "Comb-All Pass" vista in figura 13, è descritto nel seguente algoritmo

```
reva((t,g,t1,g1),g2) = _<:_+(
    par(i,6, dflda(ba.take(i+1, t),G*ba.take(i+1,g))) :>
    seq(i, 2, apfn(ba.take(4-i, t1),G*ba.take(i+1,g1)))*(g2);
process = _ : reva((primetc1,combg1,primetc2,combg2),G);
```

"par" e "rev" sono rispettivamente, composizione parallela e composizione sequenziale e ci permettono di creare una cascata di 6 Comb seguita da una sequenza di 2 All Pass.

Il risultato è in figura 28.

Quest'algoritmo risulta essere il più efficiente ad ora e permette la riproduzione di oltre 1000 echi al secondo, un buon risultato considerando le stime effettuate da Schroeder, ma che non corrisponde ad una riverberazione realistica e gradevole.

2.7 ALGORITMI DI MOORER

In seguito alla fase di test, il passo successivo è stato quello di implementare gli algoritmi di Moorer, in quanto risultano più efficienti dei precedenti. In questa sezione verranno inoltre inseriti i parametri ambientali ed utilizzati come controllo delle caratteristiche del riverbe-

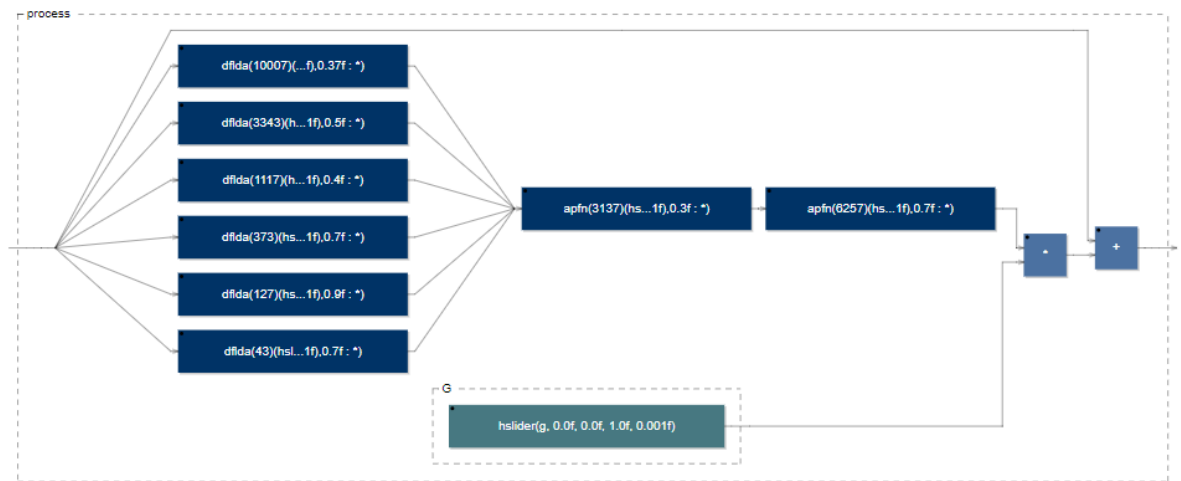


Figura 28: Algoritmo Comb-All Pass

ro. Le formule utilizzate per il calcolo dei parametri sono le medesime viste nel capitolo ?? ma con le dovute approssimazioni.

Il codice seguente descrive il filtro All Pass secondo le indicazioni di Moorer (visto in figura 15) e come già detto, senellisce i calcoli riducendo il numero delle moltiplicazioni ad 1.

```
apfm(t, g) = _<: ((+ : _*(g)), _<:_, !, _+ : _, zm(t) : ro.cross(2))~(0
  -_) : +
with{
  zm(t) = de.delay(ma.SR,t);
};
```

Il grafico risultante è in figura 29

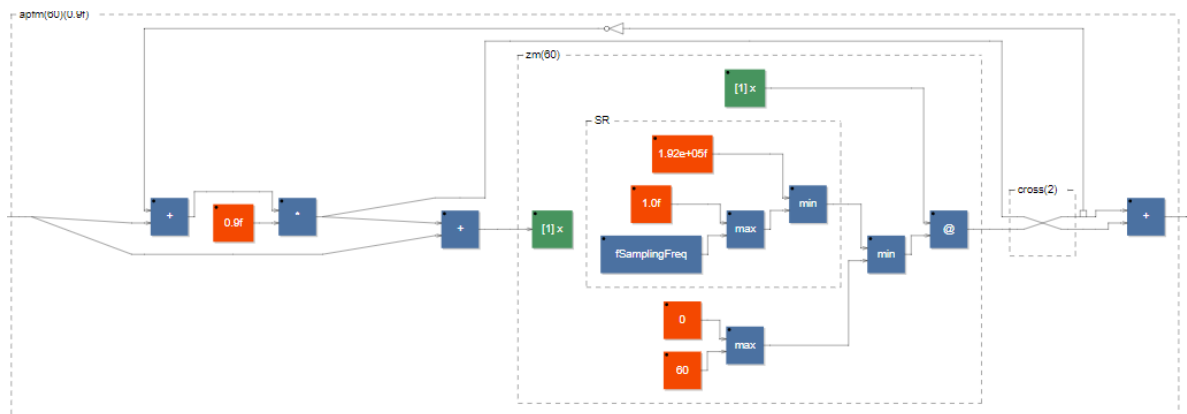


Figura 29: All Pass descritto da Moorer

3 | CONCLUSIONI

INDICE DEI NOMI

Sabine, Wallace Clement, 5–8

Schroeder, Manfred Robert, 5

BIBLIOGRAFIA

Bringhurst, Robert

- 1992 *The Elements of Typographic Style*, Hartley & Marks, Point Roberts, Washington, USA.

Miede, André

- 2016 *A Classic Thesis style*, <http://www.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/classicthesis/ClassicThesis.pdf>.

Pantieri, Lorenzo

- 2017a *LaTeXpedia*, http://www.lorenzopantieri.net/LaTeX_files/LaTeXpedia.pdf.
2017b *LaTeX per l'impaziente*, http://www.lorenzopantieri.net/LaTeX_files/LaTeXimpaziente.pdf.

Pantieri, Lorenzo e Tommaso Gordini

- 2017 *L'arte di scrivere con LaTeX*, http://www.lorenzopantieri.net/LaTeX_files/ArteLaTeX.pdf.

Sabine, Wallace Clement

- 1921 *Collected papers on acoustics*.

Schroeder, Manfred Robert

- 1962 "Natural Sounding Artificial Reverberation", *Journal of the Audio Engineering Society*.
1964 "New Method of Measuring Reverberation Time", *Acoustical Society of America*.