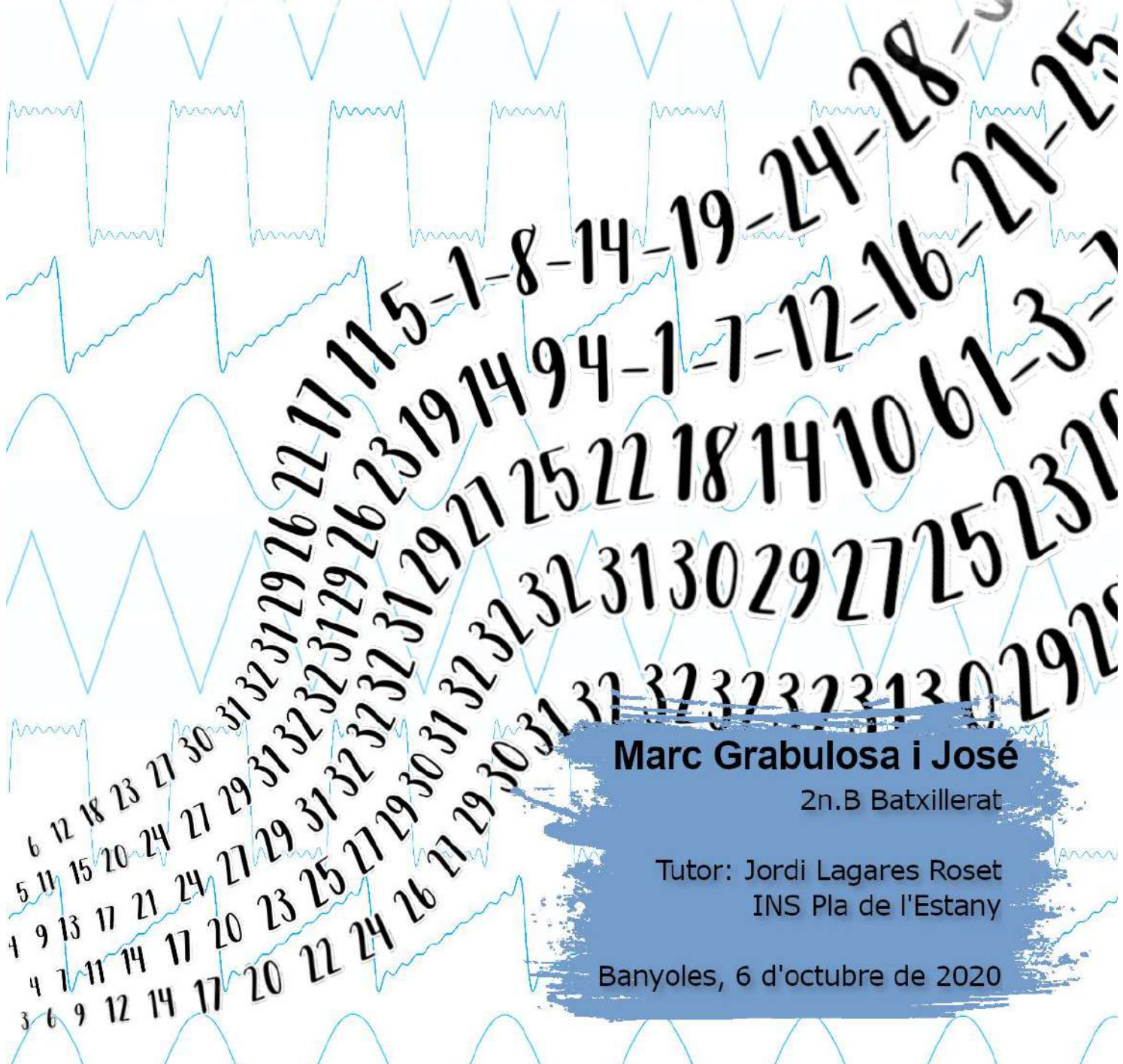


QUAN ELS NÚMERS SONEN

-Una visió física i matemàtica de la música-



Marc Grabulosa i José

2n.B Batxillerat

Tutor: Jordi Lagares Roset

INS Pla de l'Estany

Banyoles, 6 d'octubre de 2020

La música és quelcom que ens envolta al nostre dia a dia des que naixem. Les matemàtiques, en canvi, són d'aquelles assignatures que o bé t'agraden molt o no t'agraden, ja que sovint la desconexió de l'aplicació que pot tenir aquesta al teu dia a dia no et permet veure què hi ha més enllà dels nombres. Però alguna vegada ens hem preguntat si existeix algun tipus de relació entre aquestes dues matèries?

Aquest treball intenta explicar com es forma la música a través de conèixer les fórmules matemàtiques amb què es forma el so. Per fer-ho ens basarem en els conceptes bàsics de la física, el desenvolupament de les escales a partir de Pitàgores o les anàlisis de Fourier, entre d'altres.

La part pràctica del treball consisteix en aplicar tots aquests conceptes teòrics en el desenvolupament des de zero d'un sintetitzador digital, un programa informàtic que ens permet crear ones sonores a partir de fórmules matemàtiques.

Aquest treball demostra com des dels inicis dels temps, les matemàtiques tenen un paper fonamental en l'estudi i el desenvolupament de la música.

Music is something that surrounds our daily lives since we are born. At the same time, maths is one of those subjects that you either like a lot or totally dislike, often because of the lack of understanding of its real application, which does not allow you to see what is beyond the numbers. But, have you ever wondered if there is any kind of relationship between music and mathematics?

This research project tries to explain how music is formed by looking into its mathematical equations, which are used to make sounds. We will dive into basic concepts of physics, the development of scales from Pythagoras, and the Fourier analysis, among others.

The practical part of this research applies all these theoretical concepts to develop a digital synthesizer from scratch, in other words, software that allows us to create sound waves from mathematical formulas.

This work demonstrates how mathematics have a fundamental role in the study and development of music from the beginning of times.

ÍNDEX

1. Què és la música?

1.1.	Significat de la música	8
1.2.	Origen de la música	10
1.3.	Percepció humana de la música	12

2. Conceptes bàsics del so

2.1.	Què són les ones sonores?	15
2.1.1.	Amplitud (A)	16
2.1.2.	Frequència (f)	16
2.1.3.	Velocitat de propagació del so (C)	17
2.1.4.	Longitud d'ona (λ)	18
2.1.5.	Fase de l'ona	19
2.2.	Qualitats del so	20
2.2.1.	Altura	20
2.2.2.	Durada	21
2.2.3.	Intensitat	21
2.2.4.	Timbre	23
2.3.	Condicions acústiques	28
2.3.1.	Eco i reverberació	28

3. La música des d'un punt de vista matemàtic

3.1.	Pitàgores i la música	30
3.1.1.	Pensament Pitagòric	30
3.1.2.	Les matemàtiques i escales matemàtiques	31
3.1.3.	Experiment amb el monocordi	34
3.1.4.	Formació d'escales	34
3.2.	Euclides i el ritme	41
3.2.1.	Ritmes d'Euclides	42

3.3.	Fourier i la seva anàlisi tímbrica	44
------	--	----

4. La música des d'un punt de vista tecnològic

4.1.	Origen de l'enregistrament i reproducció sonora	52
4.2.	Manipulació d'ones sonores	54
4.2.1.	Freqüència de mostreig	55
4.3.	Què és un sintetitzador?	56
4.3.1.	Origen del sintetitzador	56
4.4.	Implantació de la intel·ligència artificial a la música	74
4.4.1.	Magenta	74
4.4.2.	Demucs	76

5. PART PRÀCTICA: Desenvolupament d'un sintetitzador digital

5.1.	Entorn Integrat de Desenvolupament (IDE)	77
5.2.	Procés de desenvolupament	78
5.2.1.	Versió 0	78
5.2.2.	Versió 1	80
5.2.3.	Versió 2	82
5.2.4.	Versió 3	85
5.2.5.	Versió 4	87
5.2.6.	Versió 5	90

6. CONCLUSIONS

92

7. Agraïments

95

8. Bibliografia

96

9. Annex

103

INTRODUCCIÓ

Des de fa uns anys pensava en tot de diversos temes que podia tractar al meu Treball de Recerca, fins i tot tenia una llista de diverses opcions que, tot i ser diferents, moltes d'elles tenien un denominador comú: la música. De fet, la música m'ha acompanyat des d'ençà que em van regalar una guitarra de ben petit, i es va anar convertint a poc a poc en l'afició més important que tinc avui dia. És per aquest motiu que tenia moltes ganes de fer un tema relacionat amb la música, tot i no tenir cap idea de cap a on havia d'enfocar-lo.

Ara farà un any, va passar un fet que em va fer decidir quin tema podia tractar. En arribar a classe el nostre professor de matemàtiques, en Jordi Lagares, ens havia preparat una “*performance*” -com sol dir ell- arran de la pregunta d'una alumna a la classe del dia anterior, que després d'aixecar el dit preguntà: “*Jordi, i això de què serveix?*”. Aquell dia, en Jordi ens va respondre la pregunta de la companya d'una forma experimental, fent-nos veure a tots que a partir d'una sèrie de fórmules relacionades amb la trigonometria, podíem obtenir una ona sonora similar a la que pot produir un instrument musical. Recordo sortir d'aquella classe molt pensatiu, però sobretot molt sorprès d'haver conegut l'existència d'una relació tan estreta entre les matemàtiques -una de les assignatures que des de ben petit més m'ha agradat- i la música -una afició que ha tingut i té un gran pes a la meva vida-.

Coincidint amb l'elecció del tema del Treball de Recerca vaig decidir buscar més informació al respecte i després de veure diferents vídeos de divulgació científica, em vaig adonar que cada vegada que acabava un vídeo, volia seguir i aprendre'n més. Va ser aquell el moment en què vaig veure clar que aquest havia de ser el meu tema del Treball de Recerca, el tema en el que volia aprofundir.

L'objectiu final d'aquest treball és intentar entendre i saber explicar com es forma la música a través de conèixer les fórmules matemàtiques amb les quals es forma el so. Per aconseguir-ho el que faré serà un viatge des dels conceptes

més bàsics de la música i les ones sonores que el formen fins a la seva aplicació tecnològica, equipant-nos de la física i les matemàtiques que ens ajudaran a entendre com sonen els números.

Al primer punt, he fet una breu introducció de la història de la música des dels seus orígens a les tribus prehistòriques, fins a l'actualitat; també veurem quines característiques ha de tenir un so perquè sigui agradable a l'oïda humana. A la segona parada he explicat els conceptes més bàsics d'una ona sonora des d'un punt de vista físic, perquè hem d'entendre la física com el millor vehicle per entendre la vida a partir de fórmules matemàtiques. Al punt 3 veurem com des de l'antiga Grècia les matemàtiques van servir com una eina per construir les escales musicals i com aquestes matemàtiques ens ajuden també a comprendre diverses característiques de la música. Finalment, a l'última parada, veurem com avui en dia tots aquests coneixements teòrics es fusionen amb els avenços tecnològics per tal de desenvolupar noves maneres d'estudiar i fer música.

Tenint clara la part teòrica volia fer una part pràctica a l'altura. Amb un tema com aquest les aplicacions podien ser molt diverses. Calia centrar-me en una. Va ser en aquest moment quan em vaig adonar, parlant amb el meu tutor i després d'haver tingut en compte les diverses opcions, que la proposta que més em motivava era crear un programa informàtic des de 0 que pogués sintetitzar sons de manera digital a partir d'unes fórmules matemàtiques preestablertes.

Aquesta pàgina és només la primera de moltes. Us presento un treball en què he intentat comprendre que al final, la música és molt més que notes i les matemàtiques són molt més que nombres.

1. Què és la música?

1.1. Significat de la música

La música ens envolta al nostre dia a dia: quan anem amb cotxe, al entrar a una botiga de roba, en obrir internet... Per tant, té gran incidència en les nostres vides, ja sigui des d'un punt de vista d'entreteniment (com podria ser un concert del teu grup preferit), didàctic (amb cançons que ens ajuden des de petits a entendre fàcilment conceptes de l'ensenyament) o fins i tot d'ajuda psicològica o fisiològica com podria ser el cas de la musicoteràpia- [1].

Si ens regim per la definició del diccionari*, la música és considerada "*L'art que s'expressa mitjançant la combinació de sons, d'acord amb les lleis de la melodia, l'harmonia i el ritme*". És per això que abans d'entendre el que realment és la música hem de saber què és el so. El so és la vibració que produeix un objecte en fregar-lo, percutir-lo, pulsar-lo, pinçar-lo... Ara bé, per tal que nosaltres puguem percebre aquest so, és necessari un medi que permeti que la vibració que ofereix l'objecte es transporti fins al nostre canal auditiu. L'exemple més usual és l'aire, el qual està compost en gran part de molècules de nitrogen i oxigen que xoquen entre si quan es produeix una vibració [2]. A més l'aire té una sèrie de característiques davant dels altres medis, com el fet de ser un medi homogeni (expansió en totes direccions), propagació lineal -les ones sonores no s'afecten entre si- o el fet de ser un medi no dispersiu -totes les ones es propaguen a la mateixa velocitat tot i tenir característiques diferents-. És per això que tot i que la velocitat de propagació del so sigui major com més dens sigui el medi (1440 m/s en aigua i 5000 m/s en acer), l'aire és el medi que permet una millor audició de les ones sonores [3] [4].

Realment què entenem per música? O més ben dit, quins paràmetres fan que considerem que el que sona a la ràdio és música i el que fan els cotxes en passar és soroll? La diferència principal entre la música i el soroll és, en gran part, la

falta d'harmonia en aquest últim. La música obeeix un patró distingible, mentre que el soroll esdevé una anomalia sonora sense un patró reconeixible .

Tot i això, és important distingir aquests dos mots del so. De fet, el so engloba qualsevol vibració que produeix una fluctuació en un medi elàstic. Des d'un punt de vista físic, aquesta és la semblança principal entre la música i el soroll, és a dir, que tant en un cas com a l'altre, el conjunt d'ones s'originen d'una fluctuació, es difonen per un medi elàstic i ocasionen variacions de pressió i densitat. Tot i això, les ones que conformen el soroll són irregulars i les seves freqüències no tenen concordança amb la seva freqüència fonamental, és a dir, que les vibracions que l'engloben no són múltiples amb la freqüència o vibració més pronunciada [5].

Tot i aquesta diferència evident, des d'un punt de vista científic, el contrast entre el soroll i el so també té un fort component subjectiu. En molts casos podem estar d'acord que, per exemple, el que fa un moble quan es mou és soroll. Però, en canvi, quan preguntem si el que fa la pluja quan cau és so o soroll podem veure discrepàncies. Segurament molta gent ho troba un so agradable i relaxant, mentre que d'altres ho trobaran un soroll molest que sovint els impedeix dormir.

Des d'un punt de vista fonètic també podem diferenciar quan les nostres cordes vocals vibren produint un so agradable o un soroll molest. Per exemple quan una persona canta o xerra el so produït és agradable, en canvi quan per exemple el que fa és una onomatopeia per imitar el soroll d'un animal pot ser molest i des d'un punt de vista físic es consideraria soroll [6].

1.2. Origen de la música

Les pintures rupestres són una font visual molt important per entendre la vida dels primers éssers humans que van habitar el nostre planeta. Gràcies a aquestes, podem saber com caçaven, com eren les seves cerimònies, les seves danses o, fins i tot, que ja comptaven amb els primers instruments musicals fets amb plantes i/o restes d'animals, com els que podem veure a la *Figura 1.1*. Ara bé, tot i conèixer com eren els primers instruments i quins sons produïen, el que no podem saber és com eren les cançons dels primers homínids i molt menys saber quin en va ser el seu origen [7].



Figura 1.1: Imatge de dos instruments perhistòrics: 1- Flauta aurinyaciana elaborada sobre os d'animal, jaciment de Geissenklösterle. 2- Recreacions de dos possibles versions de l'instrument més antic mai trobat -3000 aC-. (Font: Italy's Oldest instrument Hints at Sounds of Prehistoric Rome // New York Times).

Actualment és molt fàcil saber com sona una peça musical, perquè segurament en cerca-la a internet podràs aconseguir un arxiu d'àudio i fer-te'n una idea de la melodia. En el pitjor dels casos, trobaràs una partitura que amb uns estudis bàsics de llenguatge musical podràs tocar amb un instrument i fer-te així també una idea ràpida de com fa la melodia. Però això és relativament nou, de fet, la peça musical més antiga data de fa uns 4.000 anys i és procedent de Mesopotàmia *Figura 1.2*. Una troballa històricament parlant molt recent, si tenim en compte que el primer homínid que va començar a formar sons i a fer



Figura 1.2: Peça musical més antiga del món -S. XIV aC-, trobada a escrita a una tauleta d'argila en unes excavacions a Ugarit, Síria. A sota podem veure la seva melodia escrita en un pentagrama. (Font: Referència bibliogràfica [8]).

música, l'*Homo sapiens*, habita a la terra des de fa 350.000 anys [8]. Això fa que no puguem saber del cert quines melodies o músiques feien els primers *Homo sapiens* i només ens puguem basar en simples teories especulatives com explicaré a continuació.

Durant les últimes dècades, i després de diversos estudis, s'havia donat per acceptada la teoria que deia que la música tenia el seu origen en la imitació feta pels humans dels sons produïts per animals durant el seu aparellament. De fet, Charles Darwin, en el seu famós llibre *L'origen de l'home* (1871) [9], especulava sobre la idea que l'aparició de la música era prèvia a la del llenguatge parlat. Darwin posava l'exemple de l'aparellament de dos ocells. En aquest, trobem una melodia que pot arribar a establir diversos tons i canvis de ritme abundants. A més, les funcions d'aquesta melodia són diverses: per una banda, conquistar la femella i per l'altra, intimidar els altres mascles que també volen la mateixa femella. Però encara té una tercera funció que és la de marcar un territori, fet del qual molts historiadors també relacionen amb les cançons que les primeres tribus humanes cantaven per delimitar els territoris o conquerir-ne de nous. A més, es creu que aquestes cançons s'anaven heretant pels nous individus de la tribu de la mateixa manera que també s'heretava el territori [7].

Tot i això, en els últims anys han sortit noves teories referents a l'origen de la música. En aquestes es crea una relació directe entre la música i el llenguatge parlat. Aquesta teoria es basa en l'estudi de diverses llengües tonals de l'Àfrica i l'Àsia, on el fet de canviar la tonalitat no ofereix només informació paralingüística, sinó que el que fa és que el significat de la paraula o la frase canviï radicalment. Un exemple d'aquestes llengües tonals com podria ser el xinès, on compten amb 9 rangs d'entonació a la parla [10]. Aquest estudi doncs, va observar determinades traves musicals que s'usen en moltes llengües per tal d'expressar el sentit amb què dius una frase com un senyal de la relació existent entre la música i la parla. És per això que podríem arribar a la conclusió que la música i el llenguatge parlat van tenir un camí paral·lel en termes evolutius, ja que la primera complementava la segona [11].

Altres teories, molt relacionades amb aquesta darrera el que exposen és la idea que l'origen de la música té lloc durant l'intercanvi verbal entre un recent nascut

i la seva mare durant els primers mesos de vida. Això és degut al fet que el llenguatge amb què una mare parla amb el nadó no només es basa en la paraula, sinó també en l'èmfasi, el to, la intensitat o el volum.

Així doncs, al llarg de la història diverses teories han intentat explicar quin va ser l'origen de la música. Tot i haver-hi una gran diversitat, podem veure com totes tenen una estreta relació entre la parla i el llenguatge musical. El que sí que queda clar és que la música va néixer per la necessitat d'interacció entre la societat i el seu entorn, i la trobem present en totes les cultures conegudes. De fet, la música ens acompanya a la nostra vida en moments molt importants des de fa anys. Quan naixem amb les nanes, en les celebracions amb càntics propis de la zona, amb les marxes militars durant la guerra o durant les marxes fúnebres a la mort [12].



Figura 1.3: Representació d'un ritual pròpi de les tribus antigues, on la música hi tenia un paper molt important i es trobava estretament relacionada amb els mites i les creences de la tribu. (Font: The Snow-Shoe Dance // Catalin, George).

1.3. Percepció humana de la música

Un estudi fet per l'Institut d'Investigació Biomèdica de Bellvitge -IDIBELL- i la Universitat de Barcelona volia analitzar el perquè la música ens agrada als éssers humans. Van seleccionar diversos voluntaris que van escoltar música. Després d'analitzar els resultats de l'experiment, van poder observar que en escoltar música el nostre cos allibera una hormona anomenada dopamina, que actua al nostre cervell com un neurotransmissor ajudant a la comunicació entre neurones. La dopamina es secreta en quantitats importants a partir de diversos estímuls, com per exemple l'alimentació, el sexe o les drogues. L'alliberament de la dopamina és interpretat pel nostre cervell com una recompensa, la qual cosa fa que vulguem reproduir l'estímul inicial [13].

Però quines característiques ha de tenir aquest estímul inicial perquè s'alliberi dopamina al nostre interior? Per comprendre això hem de parlar primer de dos conceptes fonamentals al llarg d'aquest treball: l'harmonia i la inharmonia.

Tot i que més endavant aprofundirem aquests dos conceptes des d'un punt de vista matemàtic, és important tenir clara la distinció entre l'harmonia, que vindria a ser quan més de dues notes sonen alhora i de manera constant produint una sensació agradable; i la inharmonia, que es produeix quan aquestes dues o més notes sonen de manera dissonant, produint un so molest per l'oïda [14].

Una de les raons fonamentals que expliquen perquè la música és de les arts que tenim més interioritzades, és perquè ens arriba a través de l'oïda. L'oïda és l'òrgan que té un major desenvolupament intrauterí, fent que el sistema auditiu comenci a ser actiu en el nadó abans i tot que les orelles es desenvolupin per complet. Això ens dona ja una primera pista de per què el sistema auditiu resulta ser el sentit que la majoria tenim més desenvolupat. El nivell de desenvolupament del sistema auditiu ens permet, no només reaccionar a estímuls sonors externs, sinó també ens facilita la reproducció de sons internament amb una precisió més alta que la que ens permet fer altres sentits del cos. És fruit d'aquesta capacitat que, per exemple, no ens podem treure una cançó del cap i l'anem escoltant com si estigués sonant a l'exterior, quan realment el que passa és que l'impuls nerviós es propaga igualment al cervell i ens fa aquesta sensació [13].

Com podem veure, la música és molt més que un simple so aïllat. Molts estudis neurològics determinen que cada persona activa diverses àrees del seu cervell en escoltar una melodia concreta, fent així que la música es quedi moltes vegades com un record més que relacionem amb una experiència viscuda. Aquest fet propicia que pels éssers humans, una cançó sigui molt més que unes notes o uns acords amb un ritme concret, esdevenint una porta al record i a emocions diverses. Potser és el motiu pel qual la música ens ha acompanyat els éssers humans al llarg de tota la història [15].

Amb aquest coneixement neurològic de com la música ens afecta internament, actualment en el camp de la salut hi ha tractaments per a diverses necessitats: físiques, cognitives, psicològiques o socials. Aquestes utilitzen les activitats musicals com a remeis [16]. Aquesta disciplina anomenada musicoteràpia està agrupada dins la denominació d'arts creatives-teràpia, i el seu efecte es basa en l'ús de la música per canviar a les persones que l'escolten o la toquen. Podem trobar molts estudis que expliquen els beneficis de la musicoteràpia en àmbits diversos, com un estudi de la doctora Catherine Ulbricht Pharm.D. (2013) on exposava que "La teràpia d'àudio és una oportunitat emocionant i els hospitals han de considerar-la com una estratègia important per minimitzar el dolor en els nens que se sotmeten a una cirurgia major. Això és barat i no té cap efecte secundari " [17].



Figura 1.4: Fotografia d'una sessió de musicoteràpia on s'utilitza la música com a element de dinamització i cohesió entre joves amb discapacitats. Font: Referència bibliogràfica [15].

2. Conceptes bàsics del so

2.1. Què són les ones sonores?

Una ona sonora és qualsevol moviment de les partícules d'aire que es pot percebre per l'oïda humana. Les ones sonores es poden generar des de l'aparell fonador humà o d'altres animals, des d'instruments diversos fins a altaveus o aparells de reproducció passant per la vibració provocada per a qualsevol objecte quotidià. Aquestes ones generades es propaguen pel medi, el qual pot ser sòlid, líquid o gasós i, en funció d'aquest so aconseguim unes característiques concretes.

Quan aquest so és uniforme, el cataloguem com una vibració harmònica. De fet, quan té lloc una vibració harmònica, el que podem veure és com la partícula es mou des d'un extrem fins l'altre, passant pel punt d'equilibri dues vegades, aquest fenomen s'anomena oscil·lació.

Si agafem un diapasó com a font sonora, al colpejar-lo es produeix una oscil·lació que fa moure les partícules de l'aire comprimint-les, creant així una zona de compressió. Llavors aquestes partícules es separen, creant així una zona de refracció o dilatació -Figura 2.1- [18].

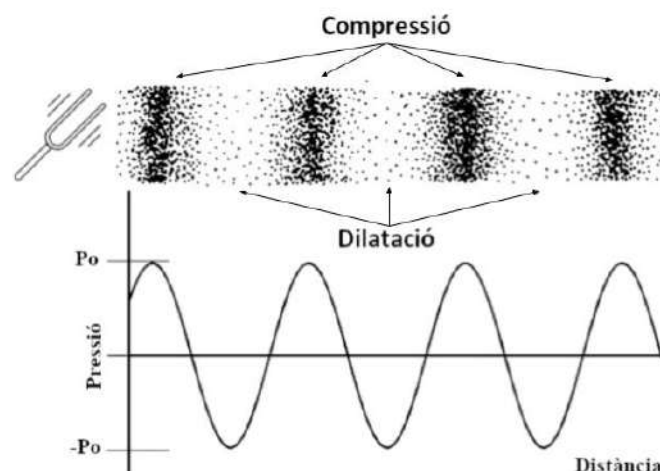


Figura 2.1: Il·lustració del moviment de les partícules quan un diapasó produeix un so, produint zones de compressió i dilatació. (Font pròpia).

2.1.1. Amplitud (A)

Si d'aquest so pur en féssim un gràfic el que obtindríem és el de la figura x, on observem una evolució de la pressió en funció del temps. La P_0 és la pressió atmosfèrica estàtica i se li suma la pressió relacionada amb l'ona sonora P . En la figura podem observar també l'existència de zones de compressió amb una pressió major a la P_0 i zones de dilatació amb una pressió menor a la P_0 [19].

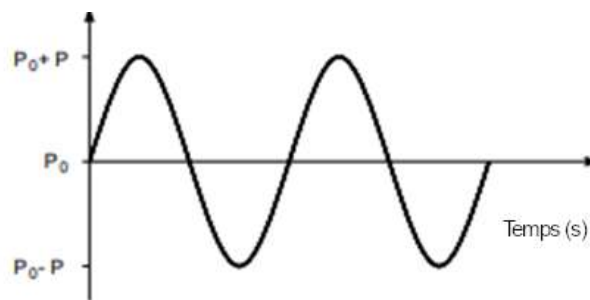


Figura 2.2: Gràfic d'una ona sonora. A l'eix d'abscisses hi trobem al temps i al d'ordenades la pressió. (Font pròpia).

El valor màxim de pressió en física se'l coneix amb el nom d'amplitud i és representat amb una lletra "A".

En aquest exemple -Figura 2.1-, al ser el so d'un diapasó, el que tenim és una ona sonora que es coneix com a sinusoidal pura [20].

2.1.2. Freqüència (f)

El nombre d'oscil·lacions d'una ona en un segon es coneix amb el nom de freqüència del so (f) i s'expressa actualment amb el terme Hertz (Hz). Lògicament, la freqüència de vibració d'una nota concreta, com per exemple el La4 = 440 Hz coincidirà amb la freqüència de l'ona sonora que es produirà [21].

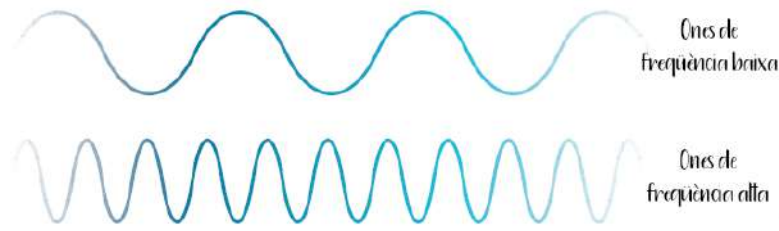


Figura 2.3: Comparativa entre dues ones de freqüència baixa i alta. (Font pròpia.)

Per tal de poder determinar fàcilment la freqüència d'una ona el que podem fer és aplicar la *Fórmula 2.1*. Com podem veure aquesta fórmula el que fa es dividir 1 entre el període (T), el qual és el temps que triga una ona a fer una oscil·lació completa. En el cas que una ona tingui un període de 0,0023 segons, al fer la fórmula veiem que la freqüència de la qual es tracta és de 440 Hz [20].

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

Fórmula 2.1: Fórmula del període respecte la freqüència

2.1.3. Velocitat de propagació del so (C)

Les ones sonores es poden transmetre per qualsevol medi elàstic i dens. De fet, com menys elàstic i més dens sigui aquest medi més ràpida és la velocitat de propagació. Per exemple en el cas de la fusta la velocitat de propagació de les ones sonores és de 3900 m/s i en el cas del metall és de 5100 m/s [18].

En el cas de l'aire, aquest gas en condicions normals, és a dir, amb una pressió d'1 atm i una temperatura de 25°C, la velocitat de propagació del so (C) és de 345 m/s.

2.1.4. Longitud d'ona (λ)

Un altre concepte bàsic important és el de la longitud d'ona (λ), que guarda una forta relació amb els conceptes de velocitat de propagació i freqüència del so. La longitud d'ona és la distància compresa entre dos pics, ja siguin mínims o màxims, de l'amplitud, tal i com es pot veure a la *Figura 2.4* [22].

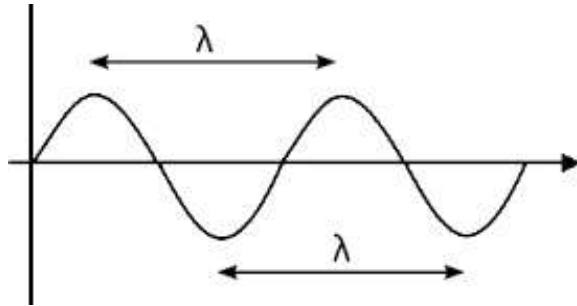


Figura 2.4: Gràfic on es pot veure què entenem com a longitud d'ona. Font pròpia.

Per calcular la longitud d'ona d'una ona sonora n'hi ha prou amb una fórmula matemàtica senzilla: *Fórmula 2.1*. El que podem veure a partir d'aquesta fórmula matemàtica és, per una banda, que la longitud d'ona és directament proporcional a la velocitat de propagació, és a dir, com més elevada sigui la velocitat de propagació, més elevada serà la longitud d'ona. En canvi, per altra banda veiem que la longitud d'ona és inversament proporcional a la freqüència de la ona sonora, per tant, com major sigui la freqüència, menor serà la longitud compresa entre dos màxims [23].

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

Fórmula 2.2: Fórmula de la longitud d'ona.

A la *Figura 2.5*, es pot veure la relació entre la freqüència d'un so i la seva longitud d'ona. Per exemple, la nota més aguda d'un piano, la qual té una freqüència de 4186 Hz, la seva longitud d'ona és de 8,24 cm. En canvi, la més greu, que té una freqüència de 27,5 Hz, té una longitud d'ona de 12,55 m.

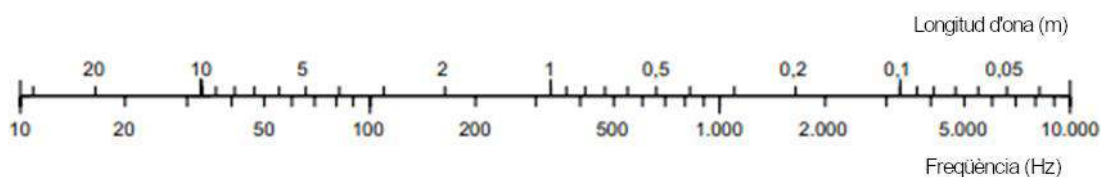


Figura 2.5: Relació entre la longitud d'ona i la freqüència que produeix. (Font: Referència bibliogràfica [19])

2.1.5. Fase de l'ona

L'últim aspecte que ens resta per tal d'entendre les característiques d'una ona sonora és la seva fase. La fase d'una ona sonora és la posició d'una ona respecte a una altra. Per entendre-ho d'una manera més senzilla, primer farem una ullada a la *Figura 2.6*. En aquesta primera figura veiem dues ones que tenen la mateixa amplitud i la mateixa freqüència, a

més, els seus ventres i nodes es troben en la mateixa posició, per tant, es troben en fase. Això vol dir que si aquestes dues ones sonores sonen alhora, l'amplitud resultant serà la suma de l'amplitud de la primera ona i la de la segona -interferència constructiva-.

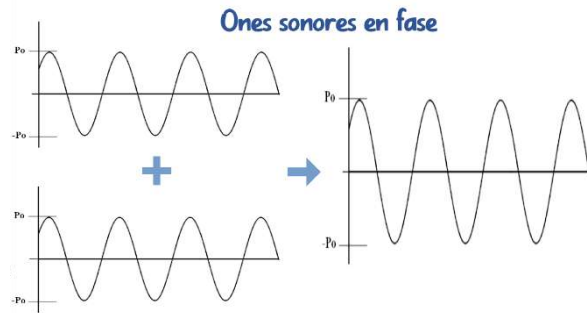


Figura 2.6: Il·lustració gràfica de dues ones sonores en fase; l'amplitud final creix. (Font pròpia).

Si ara ens fixem en la *Figura 2.7* el que veurem serà el contrari, dues ones sonores que segueixen tenint la

mateixa freqüència i amplitud, però en aquest cas no trobem els seus ventres i nodes en la mateixa posició. De fet podríem dir que la segona ona és el reflex de la primera. Això el que significa és que aquestes dues ones estan

desfasades i que el so que produiran serà inexistent (interferència destructiva) [18].

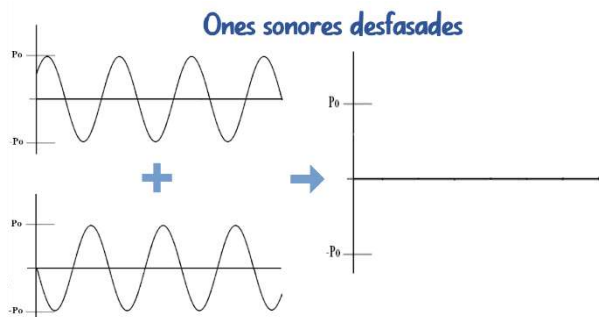


Figura 2.7: Il·lustració gràfica de dues ones sonores desfasades; l'amplitud final és nul·la. Font pròpia.

Aquest segon cas -*Figura 2.7*-, és el que fan servir molts auriculars d'última generació per tal d'obtenir una cancel·lació de soroll activa, per tal que et puguis aïllar del soroll del teu voltant i només estar pendent de la música que estàs escoltant. Aquests auricular intel·ligents interpreten l'ona sonora que reben de l'exterior i formen la seva ona desfasada. D'aquesta manera el so resultant és inexistent [24].

2.2. Qualitats del so

Qualsevol tipus de so el podem definir a partir de les seves qualitats o propietats: l'altura, la durada, la intensitat i el timbre.

2.2.1. Altura

Bàsicament el concepte d'altura ens defineix és si el so que escoltem és greu o agut, per tant està plenament relacionat amb la freqüència fonamental del so. Per exemple, si comparem una freqüència de 440 Hz i una de 800 Hz, podem veure clarament que la segona té una freqüència el doble de gran. En llenguatge musical el que es diria és que la segona nota és una octava més alta que la primera. De fet, en llenguatge musical el que dependrà si una nota és més greu o més aguda vindrà de la posició que ocupi a l'escala corresponent, ja sigui de fa, sol o do [25].

Biològicament, cada animal té una capacitat auditiva diferent que permet l'audició de sons diversos. En el cas dels humans la nostra capacitat auditiva va des dels 20 Hz fins als 20000 Hz.

Però, tot i aquesta àmplia capacitat auditiva, veiem que no aconseguim sentir ultrasons que sí que poden sentir altres animals com els gats, gossos o dofins. De fet aquest és el motiu pel qual alguns animals reaccionen a estímuls que nosaltres no som capaços de percebre [26].

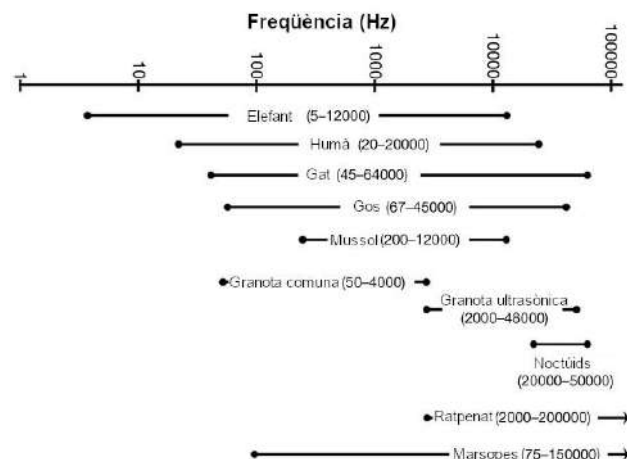


Figura 2.8: Gràfic de rang de freqüències audibles dependent de l'espècie animal. Font pròpia.

2.2.2. Durada

El concepte de durada ens expressa l'interval temporal que dura el so d'una nota. En música aquesta durada es representa amb una sèrie de figures en un pentagrama; per tal de fer-ho més visual [27].

Tot i això, en les partitures musicals trobem un paràmetre al costat esquerra del títol que ens marca el tempo de la cançó, és a dir, per exemple ens pot marcar que una negra val 100 bpm, per tant voldrà dir que en cada minut hi trobem 100 negres. Quan per exemple, toques un instrument i vols tocar una cançó concreta, has d'indicar en un aparell anomenat metrònom el tempo de la cançó i aquest marcarà amb un soroll de "clic" la pulsació de la cançó.

2.2.3. Intensitat

La tercera qualitat d'un so és la intensitat, aquesta depèn de la distància en què ens trobem de la font de so. És a dir, les ones que sorgeixen de la font es van expandint com en un estany s'expandeixen les ones aquàtiques després de llençar-hi una pedra. Per tant, com més lluny ens trobem del centre, més dèbil serà la intensitat que rebem. La fórmula de la intensitat, va determinada per la potencia de la font sonora partida entre el producte de l'àrea de la circumferència i la distància de la que ens trobem de la font elevada al quadrat [28].

$$I = \frac{P}{4\pi d^2}$$

Fórmula 2.3: Fórmula de la intensitat

La intensitat més petita que la nostra oïda pot percebre és la de $10^{-12} \frac{W}{m^2}$. La intensitat més alta segons els experts, es trobaria entre l'1 i els $100 \frac{W}{m^2}$, per tant tenim un rang molt ampli de sorolls que som capaços de percebre.

Tot i que la unitat d'intensitat del Sistema Internacional és el $\frac{w}{m^2}$, la més coneguda és el decibel. Per fer el canvi, hem de tenir en compte la següent fórmula:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{10^{-12}} \right)$$

Fórmula 2.4: Fórmula per convertir la intensitat sonora en decibels.

A la *taula 2.1* es pot veure la quantitat de decibels que emeten una sèrie de tasques que podem rebre durant el nostre dia a dia [29].

Font sonora	Nivell de pressió sonora (dB)	Valoració subjectiva
Explosió d'un volcà	180	Possibles lesions auditives greus
Llindar del dolor - 140 dB		
Enlairament d'un avió	130	Molt elevat
Motor d'avió	120	
Edifici en construcció	110	
Martell pneumàtic	100	
Camió (15m)	90	Elevat
Carrer d'una ciutat	80	
Interior automòbil	70	
Conversació normal	60	Moderat
Oficina, aula	50	
Sala d'estar	40	
Dormitori (nit)	30	Baix
Estudi de gravació	20	

Taula 2.1: Comparativa entre diverses situacions del dia a dia i la intensitat sonora. Font pròpia.

2.2.4. Timbre

El timbre és la qualitat del so que fa referència a la font sonora de la qual prové. Per entendre-ho d'una manera més senzilla, el timbre d'un instrument seria com la nostra empremta digital. En el cas dels instruments el timbre respon a dues característiques concretes: en primer lloc de quin instrument es tracta, ja que una mateixa nota tocada per una guitarra o una trompeta és molt diferent; i en segon lloc, de quina manera aquest instrument produeix so, ja que podem percutir una corda, fregar-la amb un arquet o, fins i tot, golpejar l'instrument amb un objecte.

És a partir de la modificació del timbre que podem fer que una nota soni d'una manera o d'una altra mantenint la mateixa freqüència. Si volguéssim fer un exemple, en el món de la cuina, amb llet, farina i ous es poden fer infinitat de receptes i en funció de la quantitat de cada ingredient i del tractament que els hi fem podem obtenir una cosa o una altra, però el que no canvia són els ingredients amb què comencem. Doncs aquí ens passa el mateix, depenent de com modifiquem l'amplitud d'aquests harmònics o la ressonància, el so final que arriba al nostre canal auditiu és d'una manera o altra [30].

a) Harmònics

Tot i que les ones sinusoïdals són la base que ens permet entendre la música i el so des d'un vessant matemàtic, l'ona sonora que sentim en escoltar una nota d'un instrument és la suma de diverses ones sonores simples formant una ona sonora complexa i enriquint la nota [31].

Si mirem la taula podrem observar 3 termes diferents per denominar els components sinusoïdals de la freqüència d'un so periòdic, el més utilitzat dels quals és l'harmònic [20].

Frequència	Harmònics	Sobretò (nº de nodes)	Parcial
f_0	Fonamental	Fonamental	1r parcial
$2f_0$	2n harmònic	1r sobretò	2n parcial
$3f_0$	3r harmònic	2n sobretò	3r parcial
$4f_0$	4rt harmònic	3r sobretò	4rt parcial

Taula 2.2: Diferents formes de denominar les components sinusoidals de la freqüència d'un so periòdic. Font pròpia.

Matemàticament parlant, els harmònics d'un so els obtenim a partir de multiplicar la freqüència fonamental de la nota per un nombre enter $-x_1, x_2, x_3 \dots$ per formar una sèrie. Per exemple, si la nostra freqüència fonamental és de 440 Hz $-La_3$, té harmònics a 440 Hz $-$ primer harmònic $= 440 \text{ Hz} \cdot 1$ -, 880Hz $-$ segon harmònic $= 440 \text{ Hz} \cdot 2$ -, 1320 Hz $-$ tercer harmònic $= 440 \text{ Hz} \cdot 3$ -, 1760Hz $-$ quart harmònic $= 440 \text{ Hz} \cdot 3 \dots$

Aquests harmònics en el cas de cordes el que formen són nodes a partir del primer harmònic, aquests nodes són punts on la corda no oscil·la. Com major és el nombre de l'harmònic, també és major el nombre de nodes [20]. De fet, en una guitarra, per exemple podem provocar el primer harmònic de la corda, per fer-ho hem de col·locar el dit a la meitat de la corda per tal que es formi el node.

A partir d'una corda i una màquina que la faci vibrar a un ritme constant, podem veure tots els modes de vibració que una corda pot tenir. Un extrem de la corda es reté a un extrem immòbil i l'altra s'uneix a un extrem mòbil [32]. El fet d'augmentar la freqüència en què oscil·la la màquina, es creen els diversos modes de vibració de la corda, fent que cada vegada la corda consti d'un node més, tal com es pot veure a la *Figura 2.9*.

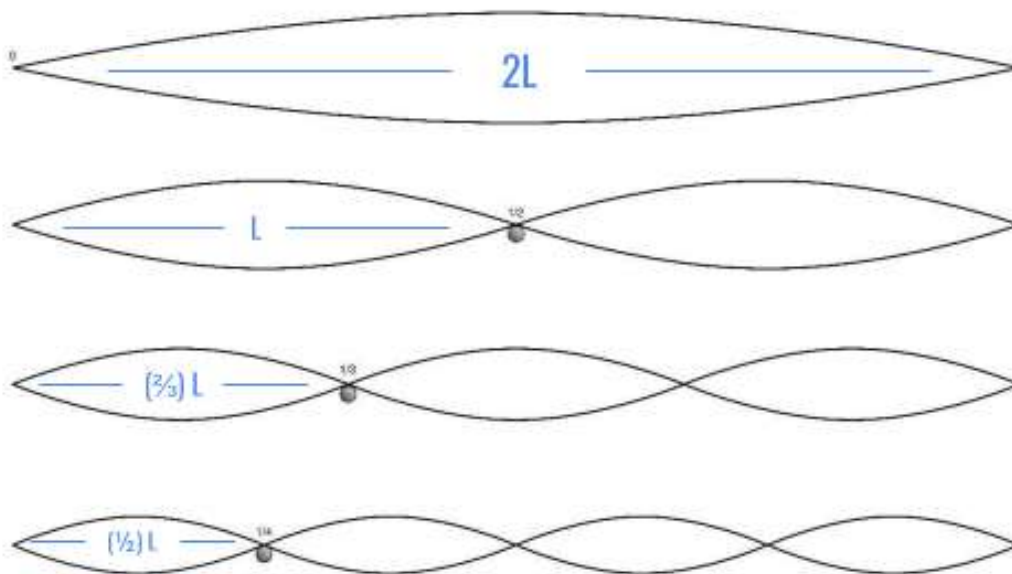


Figura 2.9: Il·lustració dels quatre primers modes de vibració d'una corda. Font pròpia.

Tot i això, no tots els instruments segueixen aquest patró, ja que en la majoria d'instruments de percussió, els sons consten de freqüències no harmòniques, que fan que, per exemple, dels sons produïts per una bateria no se'n pugui diferenciar la nota que produeix i per tant només produeixen ritmes.

Existeixen pocs instruments percutius que generin sons basats en parcials harmònics. El motiu és que alguns d'aquests parcials no harmònics d'un instrument on el so es produeix a través d'un cos bidimensional, es troben molt propers als parcials harmònics d'un instrument com una guitarra [33]. Per tant, el que es fa és atenuar els parcials harmònics no desitjats i deixar només els que permeten que aquell instrument pugui fer un so harmònic. Alguns exemples poden ser un xilòfon, un metal·lòfon, uns timbals o una campana [34].

Igual que hem fet amb la corda, en el cas de les notes formades de manera bidimensional, podem veure els nodes que produeix una membrana al vibrar. Aquest instrument s'anomena placa de Chladni i consta d'una placa connectada a un generador que el que fa es oscil·lar. En vessar sorra sobre la seva superfície i augmentar la vibració, podem veure tot de modes diferents on els nodes fan canviar la posició de la sorra [35]. De



Figura 2.10: Diversos modes de vibració d'una placa de Chladni quadrada. (Font: Chladni Plate // Pensar.com)

fet, no cal un instrument tan sofisticat per adonar-nos d'aquest fet, ja que si fem vibrar un got d'aigua d'una manera determinada podem veure el primer mode de vibració d'una membrana circular.

b) Ressonància

Per analitzar sons ho podem fer a través d'un concepte anomenat ressonància. Algunes estructures físiques responen intensament a una component sinusoidal de la freqüència definida. Per exemple, segur que us heu trobat alguna vegada que si toqueu un instrument, un moble o un objecte del vostre voltant, aquest comença a vibrar en algun moment concret, de fet perquè estàs tocant la seva freqüència de ressonància [20].

Per entendre com funciona la ressonància, un exemple molt clar és imaginar-nos que ens estem gronxant. Si volem arribar al més amunt possible haurem de fer força endavant amb les cames estirades i un cop arribem al final doblegar les cames i tirar el cos enrere per tornar. Si aquest procés l'anem repetint aconseguirem arribar al punt més alt possible. Ara bé, si al mig del procés girem les accions anirem perdent velocitat fins a aturar-nos. Això és el mateix que quan anteriorment parlàvem de les ones destructives i constructives, mentre amb les

primeres la suma de les ones desfasades perdien altura amb les segones en guanyaven.

La majoria d'instruments tenen una caixa de ressonància. El so que produeix l'instrument fa vibrar una part determinada d'aquesta caixa de ressonància i el so surt amplificat. De fet, és per aquest motiu que en els instruments acústics és tan important el material amb què es construeix, sobretot en el cas dels instruments de fusta, ja que un tipus de fusta o altre, la manera de construcció o inclús la cola amb la que s'uneixen les parts, afecten la manera com ressonarà la fusta i, per tant, afectarà notablement el timbre que es produirà l'instrument. Amb la veu passa el mateix, els sons més aguts ressonen amb els ossos del crani, mentre que els més greus ressonen a la caixa toràcica [36].

En el cas de objectes rígids, fer-los vibrar a la seva freqüència de ressonància durant un temps determinat i a una intensitat concreta fa que aquests finalment es trenquin. Aquest fet també es té en compte en arquitectura per tal que les estructures no es derroquin. L'any 1831 a Broughton (Anglaterra) un pont d'aquesta localitat es va esfondrar quan un esquadró militar va creuar-lo amb marxa militar. Aquesta marxa militar es trobava casualment a la freqüència de ressonància del pont, provocant-ne així el col·lapse. És per això que des de llavors totes les tropes del món han de trencar la marxa militar quan travessen un pont [37].



Figura 2.11: Pont de Broughton abans d'enfonsar-se a causa de la ressonància. (Font: Puente de Broughton // Historias de un científico).

Un altre exemple molt típic quan parlem de ressonància és el de trencar una copa amb la veu, en aquest cas el que necessitem saber és la freqüència de ressonància de la copa i reproduir-la a una intensitat alta i constant fins a provocar el trencament del vidre [36].

2.3. Condicions acústiques

A la pràctica, a totes les característiques explicades que fan que un so el sentim tal i com és, hem de sumar-hi el fet de l'espai on és reproduït o tocat. En primer lloc, i com és evident, les ones no són periòdicament infinits, sinó que sofreixen una atenuació fins que arriben a ser inaudibles i s'acaben.

A continuació el que faré serà explicar dues característiques que són presents al nostre dia a dia i que el que fan és alterar les característiques físiques de l'ona.

2.3.1. Eco i reverberació

Per entendre els conceptes d'eco i reverberació, hem de saber que les ones sonores quan xoquen amb una superfície rígida com una paret, l'ona sonora rebota i canvia el seu sentit. Tot i això, quan aquestes ones xoquen amb una superfície, aquesta n'absorbeix una part i fa disminuir la seva amplitud, és a dir, ens torna amb una menor intensitat.

Per una banda, en el cas de l'eco, l'ona sonora xoca amb una superfície sòlida i retorna a un observador a una distància determinada. La diferència entre la intensitat té lloc a causa de la distància. Tenint en compte que l'increment de temps mínim en el qual una persona pot distingir dues síl·labes és de 0,1 segons i sabent que la velocitat del so és de 340 m/s, podem operar i saber quina és la mínima distància perquè succeeixi l'eco [18].

$$d = \frac{0,1 \cdot 340}{2} = 17 \text{ metres}$$

Fórmula 2.5: Fórmula que determina la distància mínima necessària perquè tingui lloc l'eco.

La reverberació és el fenomen que té lloc quan una ona pateix successives reflexions en diferents superfícies, és a dir, quan rebota de manera espontània per diversos punts d'una habitació. Un tipus de reverberació és la que es dona,

per exemple, quan ens trobem a una habitació relativament gran sense la presència de gaires objectes que puguin amortir el so; Si hi produïm un so a l'interior, rebota a les parets i, com que els objectes no el fan amortir, persisteix durant un temps determinat (temps de reverberació) [38]. És evident doncs que en espais com auditoris o estudis de gravació la reverberació haurà d'estar molt ben cuidada a partir de l'arquitectura, per tal que no interfereixi en la música. Però també en espais com fàbriques o tallers, ja que un temps de reverberació de més de 3 segons pots arribar a provocar molèsties auditives i danys irreparables a l'oïda [20].

3. La música des d'un punt de vista matemàtic

3.1. Pitàgores i la música

Per entendre el perquè l'escala musical que coneixem té set notes -dotze comptant-hi sostinguts i bemolls-, ens hem de remuntar a la Grècia antiga on trobem un personatge molt important per les matemàtiques i pel món musical: Pitàgores de Samos [39].



Figura 3.1: Imatge de Pitàgores. (Font: J. Augustus Knapp)

Pitàgores fou una extraordinària figura en el món de l'antiga Grècia, i el seu personatge ha estat rodejat d'un halo misteriós, fins s'ha afirmat que realment Pitàgores no va existir i que el seu origen podria estar lligat a un mite grec [40].

3.1.1. Pensament Pitagòric

Pitàgores es basava constantment en l'observació del cosmos i les lleis que el formaven. Des d'un punt de vista filosòfic, creia que l'*arkhé* - entès com el principi fonamental de la filosofia grega a partir del qual es basava l'origen i la causa de totes les coses de la realitat- era les matemàtiques i, per tant, el cosmos estava regit per unes lleis cognoscibles que segons Pitàgores, havien de regir sobre l'home amb la finalitat d'aconseguir harmonia amb un mateix i amb la societat. Amb aquest pretext, Pitàgores funda una comunitat on es barreja l'aspecte científic amb el místic [41].

3.1.2. Les matemàtiques i escales matemàtiques

L'escola Pitagòrica es va basar, en gran part, en la ciència dels intervals musicals, és a dir, entre la distància i la relació entre parelles de notes. Estudiaven els sons a través del monocordi, un instrument de corda pinçada format d'una sola corda unida a dos extrems, la utilitat del qual era servir com a camp de proves pel matemàtic Pitàgores per estudiar els intervals i les matemàtiques que s'amaguen darrere la música [42].



Figura 3.2: Representació d'un monocordi. (Font: Athanasius Kircher).

Actualment sabem, gràcies a treballs com el de Pitàgores, que l'interval entre dues notes es basa en el quocient de dividir les freqüències que formen aquestes notes.

$$\text{Interval} = \frac{f_1}{f_2}$$

Fórmula 3.1: Formació dels intervals.

Pitàgores també és conegut per una basant de caire més mística, a partir de la seva creença en l'ànima. Va començar a utilitzar la música amb una finalitat que actualment és cada vegada més utilitzada arreu del món: la musicoteràpia. Pitàgores componia melodies amb el fi d'erradicar una malaltia o un problema concret.

Pitàgores va ser segurament la primera persona en la història a estudiar l'acústica del so, les seves característiques i l'estudi dels sons consonàntics -aquells que resulten agradables per l'oïda- [43]. Amb el seu treball Pitàgores va posar de manifest dos fets:

- La longitud d'una corda és la que determina la nota que s'esdevindrà quan es premi.

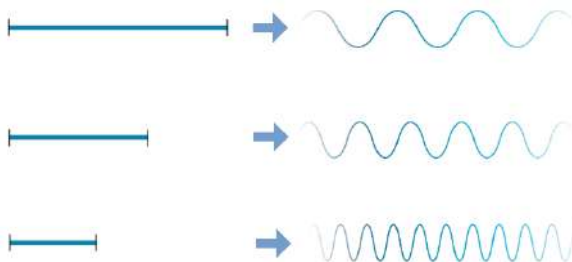


Figura 3.3: Representació gràfica de la relació entre la distància d'una corda i la freqüència que aquest produeix. (Font pròpia).

- La relació entre dues notes que formen un so harmònic, depèn de l'interval que formen entre elles.

Tot i que hi ha moltes llegendes entorn la figura de Pitàgores, la tradició explica que el matemàtic es va parar davant d'una ferreteria on uns ferrers colpejaven amb el martell el ferro que es trobava sobre l'enclusa. Diuen que Pitàgores es va passar una estona escoltant el so i s'adonà que 3 dels 4 ferrers que hi havia produïen sons harmònics al picar, per tant, sonaven bé en escoltar-los. Per altra banda, hi havia un quart ferrer que produïa un so que no era harmònic amb els altres tres. Sorprès d'aquesta observació va demanar als ferrers si li podien deixar prestats els martells per tal de repetir l'experiència. Aquesta vegada però, Pitàgores va posar els martells lligats a unes cordes de la mateixa longitud i les va penjar totes quatre. D'aquesta manera, les quatre cordes van quedar tensades per acció del pes dels martells però, al ser quatre pesos diferents, les notes que produïen eren diferents. De fet, produïen les mateixes notes que quan colpejaven l'enclusa. Llavors, Pitàgores va unir un tros de fang al martell que produïa un so inharmònic i, d'aquesta manera, en afegir-hi més pes, el so va ser harmònic amb els altres tres.



Figura 3.4: Il·lustració referent a la llegenda de Pitàgores i els ferrers. (Font: Theorica musicale // Franchino Gaffurio).

Al conèixer els pesos dels martells, els quals eren proporcionals a: 12Kg, 9Kg, 8Kg i 6Kg, Pitàgores va establir que la corda del pes de 6Kg marcava el to o nota fonamental, la del pes 8Kg era la quarta, la corda amb el pes de 9Kg la cinquena i el pes de 12Kg era l'octava. Pitàgores va substituir el 6 per 1 i es va adonar que les raons entre 6, 8, 9 i 12 eren les mateixes que entre $1, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, i \frac{1}{2}$, i que eren formades a partir dels nombres que formaven *tetraktys* (1,2,3,4) -Un figura triangular formada a partir de 4 files de un, dos tres i quatre punts que simbolitzava el nombre deu i que era considerada gairebé divina pels Pitagòrics, ja que la consideraven la “font de la saviesa eterna” [44] [45].

A partir d'aquest descobriment, podem trobar una llei molt important en el món de la música: quan establim una nota com a to fonamental, si multipliquem la seva freqüència per $\frac{4}{3}$, trobarem la seva quarta; si ho fem per $\frac{3}{2}$, trobarem la seva cinquena, i si multipliquem la seva freqüència per 2, trobem la seva octava. Pitàgores, de fet, el que va descobrir a partir d'aquest experiment va ser la naturalesa de l'escala musical que coneixem actualment i que més endavant diversos musicòlegs van acabar de completar.

Quarta	$f_o \cdot \frac{4}{3}$
Cinquena	$f_o \cdot \frac{3}{2}$
Octava	$f_o \cdot 2$

El descobriment de Pitàgores va anar molt més enllà de la música posant de manifest que la disposició caòtica del so venia regida pels nombres. I tot això gràcies a un experiment, obligà a la natura a respondre al perquè d'un fet, cosa que va donar peu al que actualment es coneix com a mètode experimental. Pitàgores va quedar fascinat amb la idea que “el nombre governava sobre el to musical”. En aquella època ningú es podia imaginar que els números eren la clau que tenim per conèixer la immensitat del cosmos; d'aquí una de les seves frases més famoses: “El nombre és l'essència de totes les coses” [46].

3.1.3. Experiment amb el monocordi

Com ja hem explicat abans, coneixem que Pitàgores va realitzar experiments amb un instrument anomenat monocordi. Aquest instrument li permetia trobar les raons matemàtiques que es trobaven darrere el so.

Tal com hem comentat en apartats anteriors, sabem que el gruix d'una corda, la seva longitud o la seva tensió són tres de les variables que modifiquen al so que se n'obté un cop ha estat pulsada. Pitàgores, a més, va comprovar que en dividir la corda del monocordi en certes parts iguals resultaven una sèrie de sons que eren agradables per l'oïda. Aquest experiment va corroborar la teoria de Pitàgores que acabava de comprovar que la bellesa del so es podia explicar a través de nombres matemàtics senzills.

Pitàgores a partir del monocordi, va anomenar tres intervals consonants: el diapasó, el *diapente* i el *diatessaron*. Aquests tres intervals actualment els coneixem com: l'octava, la cinquena i la quarta [47].

3.1.4. Formació d'escapes

a) Escala pitagòrica o diatònica

L'escala pitagòrica o diatònica fou sistematitzada per Pitàgores després de diverses experiències. Consta de 7 notes i esdevé un encadenament de cinquenes, octaves i quartes -els intervals que Pitàgores havia pogut deduir prèviament a l'experiment de l'enclusa-. Per tant Pitàgores, en un inici, ja sabia 3 de les 7 notes de l'escala -l'octava no es compta mai a les escapes musicals-.

A partir de les 3 notes que ja sabia, Pitàgores va anar encadenant cinquenes fins a aconseguir les 4 notes restants. Tot i no saber les freqüències, va fer que la multiplicació de les fraccions no fos superior a 2 i, d'aquesta manera, totes les notes resultants pertanyien a la mateixa octava. La mostra com és aquest procés -*Taula 3.1*- i com l'escala resultant és una escala de 7 notes [48].

Nota	Formació
DO	f_{do}
RE	$\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{do}$
MI	$\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{do}$
FA	$\frac{4}{3} f_{do}$
SOL	$\frac{3}{2} f_{do}$
LA	$\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{do}$
SI	$\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{do}$

Taula 3.1: Formació de l'escala pitagòrica

Si volem veure com són els intervals entre les notes de l'escala, hem de dividir les freqüències de les notes. Un cop fet això, podem veure que n'hi ha de dos tipus:

Trobem un interval major (to major "T" = 9/8) i un interval menor (hemitò "h" = 256/243) [49]. Per tant, a l'escala Pitagòrica finalment obtenim una estructura del tipus:

DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO'
9/8 - T	9/8 - T	256/243 - h	9/8 - T	9/8 - T	9/8 - T	256/243 - h	

Taula 3.2: Intervals entre les notes de l'escala diatònica

b) Escala natural o pura

A causa de l'evolució de la música i de les seves melodies sorgeix la necessitat de combinar sons que sonin alhora. En cas de veus d'una mateixa tessitura, no hi ha problema, ja que tots canten a l'uníson amb les mateixes freqüències. Però

si, en canvi, les veus de diverses persones amb diferències fisiològiques que fa que cantin en octaves diferents. Aquest interval va ser el primer que es va utilitzar perquè homes i dones poguessin cantar una melodia. Després, amb l'estudi de Pitàgores es van poder utilitzar altres intervals com la cinquena i la quarta. Tot i això, la creació de la polifonia, un nou tipus de composició musical sorgida a finals del segle XII basada en la juxtaposició de diverses línies musicals on diferents intervals tenen lloc alhora, va sorgir la necessitat d'utilitzar més intervals que resultessin agradables a l'oïda humana. De fet, tot i que com hem vist hi ha un fort vessant matemàtic en la formació de les escales, l'última paraula sempre la tenia la consonància en funció de si el que havien descobert era o no un so agradable.

Amb l'aparició de la 3a major i menor i la 6a major i menor, es va confeccionar la *Taula 3.3*, on podem veure quin és l'interval pel qual s'ha de multiplicar una nota per obtenir-ne la seva 3a o 6a.

Interval	3 ^{ra} major	3 ^{ra} menor	4 ^{ta}	5 ^a	6 ^a major	6 ^a menor	8 ^a
$\frac{f2}{f1}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{8}{5}$	2

3.3. Tipus d'intervals utilitzats en la formació d'escales.

Com hem mencionat, a les composicions polifòniques és previsible la freqüent aparició de cadascun dels anteriors intervals. Per tant, és important que sonin de manera consonant. A l'escala Pitagòrica, les octaves, sisenes i quartes són acústicament perfectes, però no les terceres i sisena. És per això que si agafem l'interval entre un Do i un Mi de l'escala Pitagòrica realitzats a la *Taula 3.2*, no resulta equivalent a una tercera major acústicament perfecta que es basa en una relació de 5/4 -que equivaldria a 80/64-, mentre que pel mètode Pitagòric el que obtenim és 81/64. En aquest cas, tot i ser un interval de $\frac{81}{80} = 1,0125$, és una diferència clarament perceptible i no produeix una consonància tan perfecta com l'interval acústicament exacta [50].

L'escala que es va plantejar, a diferència de la Pitagòrica, no tenia un encadenament de 6 quintes, sinó que només n'utilitzava 3, amb les quals van aconseguir 4 notes. Les 3 notes restants es van aconseguir obtenint terceres majors perfectes sobre les primeres 3 notes.

Si partim del Fa el que buscarem serà la seva cinquena ($3/2$) i obtindrem Do; llavors si busquem la cinquena de Do, obtindrem Sol; i amb la cinquena de Sol obtindrem Re. Finalment partirem del Fa una altra vegada i buscarem la seva tercera ($5/4$) i obtindrem La, si busquem la tercera de Do, trobarem el Mi; i finalment amb la tercera de Sol obtindrem el Si. Aquí acabem, ja que si féssim la tercera de Re tornariem al Fa d'una octava superior. El que fem aquí, igual que feia Pitàgores és modificar les freqüències pujant o baixant octaves per tal que totes es trobin dins d'aquesta. Aquesta escala la coneixem com escala natural o de Ptolomeu [51].

Nota	Formació
DO	f_{do}
RE	$\frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{do}$
MI	$\frac{5}{4} f_{do}$
FA	$\frac{5}{4} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{do}$
SOL	$\frac{3}{2} f_{do}$
LA	$\frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{do}$
SI	$\frac{5}{4} \cdot \frac{3}{2} f_{do}$

Taula 3.4: Formació de l'escala natural.

A la Taula 3.4 podem veure les freqüències respecte de la freqüència del Do i les relacions de freqüència entre els sons de l'escala natural. Podem veure que té un punt més de complexitat que el que tenia l'escala Pitagòrica, ja que trobem

un interval major (to major “T” = 9/8), un intermedi (to menor “t” = 10/9) i un interval més petit (semitò “s” = 16/15) [52].

DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO'
9/8 - T	10/9 - t	16/15 - s	9/8 - T	10/9 - t	9/8 - T	16/15 - s	

Taula 3.5: Intervalls entre les notes de l'escala natural.

c) Problema del canvi d'escala

Tant l'escala pitagòrica com la natural contenien 7 notes a cada octava. Això no era suficient per l'evolució musical i va ser necessària la inserció de més notes que al seu moment es van considerar falses o fictícies.

La principal raó d'agregar més notes a l'escala va ser, per una banda, la necessitat de transposició de les peces musicals, és a dir, apujar o abaixar el to de la melodia per tal d'adaptar-lo a una tessitura de veu concreta o a un instrument determinat. Per altra banda, també era necessari el fet de realitzar modulacions, és a dir, que al mig d'una peça musical la tonalitat canviés i, en conseqüència, l'escala [53].

Si a partir de l'última nota de l'escala pitagòrica, seguim fent les cinquenes, és a dir, fem la cinquena de si, obtenim el Fa#. Si seguim fent aquest procés de formació de cinquena el que veiem és que si el repetim 12 vegades, el resultat és molt aproximat al que obtenim al fer 7 octaves.

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} = 129,746 \qquad 2^7 = 128$$

Fórmula 3.2: Fórmula d'encadenament de 12 quintes i de 7 octaves.

El que significa això és que si per exemple partim d'un si, després de 12 quintes hauríem d'obtenir un so aproximadament igual a si li fem 7 octaves. L'error, tot i

poder semblar que és poc (1,746), significa l'1,36% i es troba sobre el llindar en què es nota la diferència entre dues freqüències, que és de 0,3%.

Per tal de solucionar aquest problema, hauríem de trobar dos nombres enters (n i m) que complissin:

$$\left(\frac{3}{2}\right)^n = 2^m$$
$$3^n = 2^{m+n}$$

Fórmula 3.3: Igualtat entre la cinquena i l'octava

En aquest cas, no obtindrem cap combinació de n i m que faci que la igualtat sigui certa, la que la potència d'un nombre senar com el 3 és sempre senar i un nombre parell és sempre parell. Tot i això, el fet que la igualtat no sigui certa, el que s'havia d'intentar almenys era fer baixar el tant per cent d'error per sota el llindar de la diferència [54].

d) Escales temperades

Amb la finalitat de resoldre el problema del punt anterior, el que es va intentar va ser distribuir l'error entre les 12 cinquenes. D'aquesta manera les cinquenes no serien perfectes i la x passaria a ser la relació de la nova cinquena aproximada.

$$x^{12} = 2^7$$
$$x = \left({}^{12}\sqrt{2^7}\right) = 1,498$$

Fórmula 3.4: Desenvolupament d'una "nova" cinquena.

Si en aquest cas calculem el percentatge d'error el que obtenim és un error del 0,113%, per tant, molt inferior al llindar de percepció de la diferència. A partir

d'això, el que podem fer és calcular cada una de les freqüències de les 12 notes de l'escala [55].

Nota	Formació
DO	f_{do}
DO# / REb	$\sqrt[12]{2} \cdot f_{do}$
RE	$\sqrt[12]{2^2} \cdot f_{do}$
RE# / MIb	$\sqrt[12]{2^3} \cdot f_{do}$
MI	$\sqrt[12]{2^4} \cdot f_{do}$
FA	$\sqrt[12]{2^5} \cdot f_{do}$
FA# / SOLb	$\sqrt[12]{2^6} \cdot f_{do}$
SOL	$\sqrt[12]{2^7} \cdot f_{do}$
Sol# / LAB	$\sqrt[12]{2^8} \cdot f_{do}$
LA	$\sqrt[12]{2^9} \cdot f_{do}$
LA# / Sib	$\sqrt[12]{2^{10}} \cdot f_{do}$
SI	$\sqrt[12]{2^{11}} \cdot f_{do}$
DO'	$\sqrt[12]{2^{12}} \cdot f_{do} = 2 \cdot f_{do}$

Taula 3.6: Formació de les notes de l'escala temperada.

L'escala que obtenim és similar a la Pitagòrica, però canviant hemitò per semitò (s). És per això que el resultat final és el que podem veure a la Taula 3.7, on trobem un interval major (To = $\sqrt[12]{2^2}$) i un interval menor (semitò = $\sqrt[12]{2}$) [56].

DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO'
$\sqrt[12]{2^2} - T$	$\sqrt[12]{2^2} - T$	$\sqrt[12]{2} - s$	$\sqrt[12]{2^2} - T$	$\sqrt[12]{2^2} - T$	$\sqrt[12]{2^2} - T$	$\sqrt[12]{2} - s$	

Taula 3.7: Intervals entre les notes de l'escala temperada.

Tot i aquest millora en el percentatge d'error gràcies al repartiment, en haver-nos basat en l'escala Pitagòrica, trobem que el tant per cent d'error en el cas de la 3ra major és de 0,8% i, per tant, major a 0,3%. Aquesta diferència doncs és

suficientment important com per ser audible, tot i això, ha estat suficientment baixa com per haver-se utilitzat des de la seva invenció fa més de 200 anys [54].

De fet, posteriorment trobem més tipus d'escala que matemàticament i harmònicament parlant són més exactes, però tot i això, actualment ens sonen estranyes ja que estem acostumats a les imperfeccions de l'escala temperada actual.

3.2. Euclides i el ritme

En la música moderna, però sobretot en música tribal, trobem un patró constituït per polsos d'una mateixa duració. Cada ritme està compost de notes (x), per silencis, representats amb (·), o amb notes que es consideren més febles que les altres. Per exemple, el ritme de les palmes d'una sevillana l'entendem com [x·x·x·x·x·]. De fet, aquest és el ritme de moltes músiques tradicionals del món - especialment a les músiques no occidentals, on és molt freqüent que hi trobem un ritme que es repeteix sovint o clau, que esdevé una marca d'identitat per cada tipus de música [57].

Euclides fou un matemàtic grec nascut l'any 300 aC, fundador de l'escola de matemàtiques de la ciutat d'Alexandria i considerat pare de la geometria pel seu famós treball "Els elements", on es dedueixen les propietats dels objectes geomètrics i dels nombres naturals. Mencionem Euclides pel seu algorisme d'aquest mateix llibre, que va formular amb la intenció de facilitar la tasca de trobar el màxim comú divisor entre dos nombres [58].

L'algorisme d'Euclides per determinar el màxim comú divisor (m.c.d.) consisteix a fer divisions successives entre els dos nombres. Per trobar el mcd entre a i b, primer dividim a/b, on $a > b$. El que obtenim de la divisió és un quocient (q) i un residu (r). Euclides va veure que el mcd de a i b resulta el mateix que el de b i r, per tant, podem repetir el procés fins a trobar l'mcd [59].

Per exemple, si el que volem calcular és el màxim comú divisor entre 17 i 7. Com que el residu de dividir 17 entre 7 és 3, llavors podem dir que el mcd de (17,7)

és el mateix que el de (7,3). Altrament, sabent això també podem dir que el mcd de (7,3) és el mateix que el de (3,1). Com podem veure el mcd de (3,1) és 1, per tant el màxim comú divisor de 17 i 7 també és 1.

3.2.1. Ritmes d'Euclides

Per entendre com es relaciona el mètode de conèixer el màxim comú divisor d'Euclides amb la formació de ritmes diversos, seguirem els passos fets a la *Figura 3.5*. L'ús de l'algorisme d'Euclides per tal de repartir diverses pulsacions en un determinat període de temps el van determinar els matemàtics del treball *The Distance Geometry of Music* al 2009. Imaginem que tenim 7 notes i les hem de distribuir regularment entre 17 pulsacions [60].

- (1) Primer separarem per una banda les notes, que les representarem amb 1, i a l'altra, els silencis, que els representarem amb 0.
- (2) Seguidament, col·locarem els 0 sota cada un dels 1 de manera equilibrada i veurem que ens en queden tres de residu.
- (3) En el tercer pas col·locarem els tres 0 restants sota els tres primers 1.
- (4) Després separarem per una banda, les columnes de 3 dígit i, a l'altra, les columnes de dos dígit.
- (5) Finalment, l'últim pas serà col·locar tres columnes de dos dígit seguint les de tres dígit. Com veiem, ens queda a una banda una sèrie de 3 columnes, i a l'altra, una altra columna sola, fet equivalent a efectuar la divisió de 7 entre 3.
- (6) Ara que ja tenim el nostre ritme fet, el que hauríem de fer és llegir cada columna d'esquerra a dreta i obtindríem l'agrupació del pas (6).

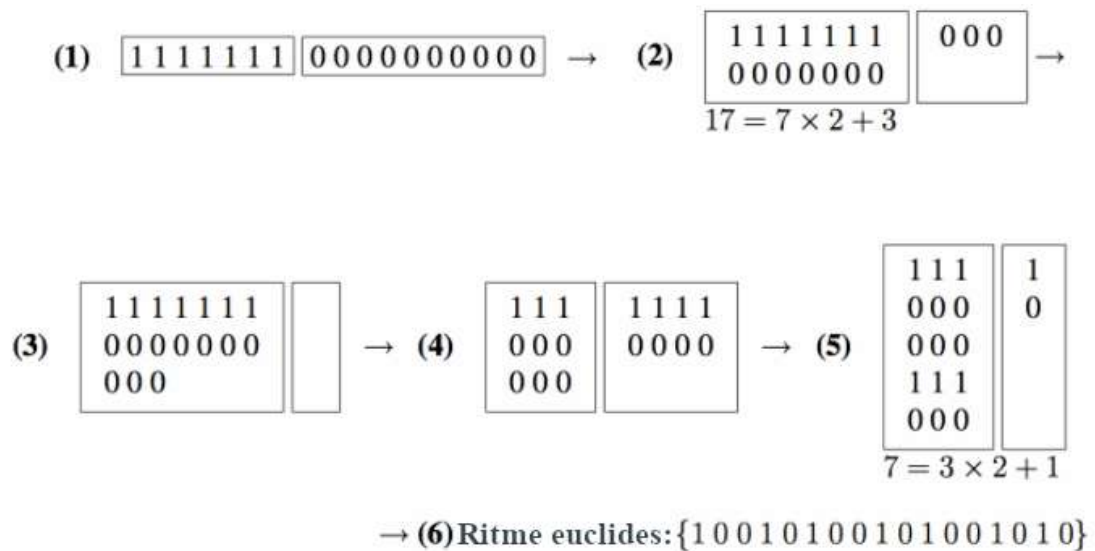


Figura 3.5: Esquema del procés de creació d'un ritme a partir del mètode d'Euclides per conèixer el màxim comú divisor entre dos nombres (Font: referència bibliogràfica [50]).

En aquest cas, com hem dit abans, cada 1 representa una nota (X) i cada 0 representa un silenci (.). Tenint en compte aquesta notació, el nostre ritme s'escriuria com a [x·x·x·x·x·x·x·x]. Altres formes de designar aquests ritmes euclidians, si tenim k (nombres de notes) i n (nombres de pulsacions), seria: E(k,n).

Com es pot veure, amb aquest mètode aconseguim una gran varietat de ritmes a partir d'una fórmula matemàtica simple que utilitzem des de petits: saber el màxim comú divisor de dos nombres. Seguidament podem veure una petita mostra d'alguns ritmes Euclidians que es troben com a clau de moltes músiques tradicionals del món.

- $E(5,8) = [x \cdot xx \cdot xx \cdot]$: Aquest ritme és la clau del "cinquillo" de Cuba, el mafuf d'Egipte o el ritme coreà mong P'yón.
- $E(4,8) = [x \cdot \cdot x \cdot \cdot x \cdot \cdot x \cdot \cdot]$: Aquest ritme és el ritme típic de la sevillana Espanyola.
- $E(5,12) = [x \cdot \cdot x \cdot \cdot x \cdot \cdot x \cdot]$: Ritme molt comú a l'Àfrica central, utilitzat per diverses tribus i poblats de la zona.
- $E(8,3) = [x \cdot \cdot x \cdot \cdot x \cdot]$: Ritme molt utilitzat en diversos estils de música moderna, com el rock, el pop o el reggaeton, essent un ritme clau per les músiques d'aquest últim.

De fet, es creu que hi ha prop de 200 ritmes de música** del món documentats que són generats per l'algorisme d'Euclides. Altrament l'algorisme d'Euclides també s'utilitza amb altres finalitats. A l'Spallation Neutron Source, un institut de recerca americà basat en un accelerador de neutrons, utilitzen un sistema de temporització dissenyat per Bjorklund l'any 2003 que es basava en aquest algorisme d'Euclides [59].

3.3. Fourier i la seva anàlisi tímbrica

El matemàtic francès Jean-Baptiste-Joseph Fourier va desenvolupar una fórmula matemàtica l'any 1822 en el seu treball "*Théorie analytique de la chaleur*" anomenada la transformada de Fourier. Aquesta Transformada, tot i tenir una forta importància en el fet d'entendre tímbricament un so, en un inici...

En termes musicals, la Transformada de Fourier ens diu que qualsevol ona periòdica complexa pot ser vista com la suma d'ones sinusoidals i el que ens permet és descriure'n l'amplitud de cada ona que la forma. És a dir, la Transformada de Fourier ens permet saber les instruccions de com s'ha fet una ona complexa qualsevol. A través de la Transformada de Fourier inversa podrem refer aquesta ona amb la fórmula matemàtica [61] [62] [63].

Per tal de fer una explicació una mica més matemàtica, el primer que farem serà inventar-nos una ona sonora complexa, resultant de sumar una sèrie d'ones sonores simples. Per exemple, suposem que tenim la funció que marca la freqüència fonamental $f_0(x) = 1 \cdot \sin(x)$ amb una amplitud d'1 (*Figura 3.6*).

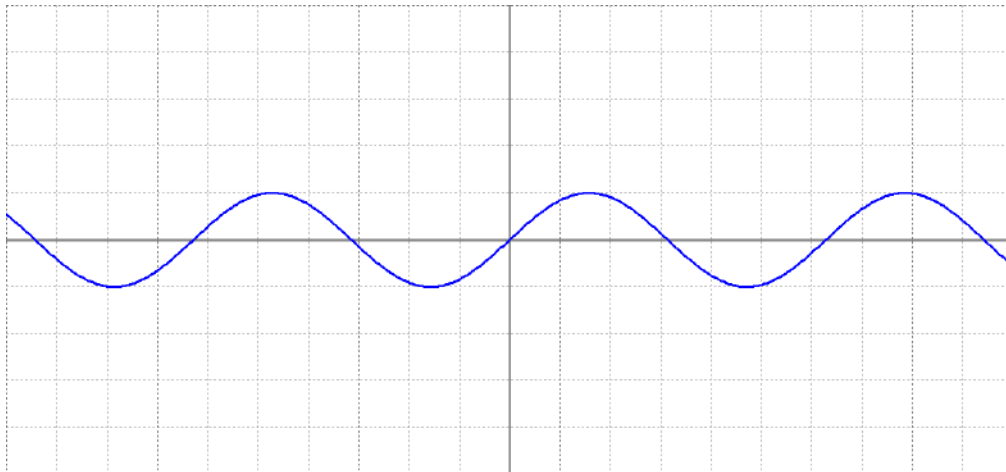


Figura 3.6: Representació gràfica de la funció $f_1(x) = 1 \cdot \sin(x)$. (Font pròpia).

El primer harmònic és la $f_1(x) = 3 \cdot \sin(2x)$ on la freqüència és el doble i l'amplitud és 3 (Figura 3.7).

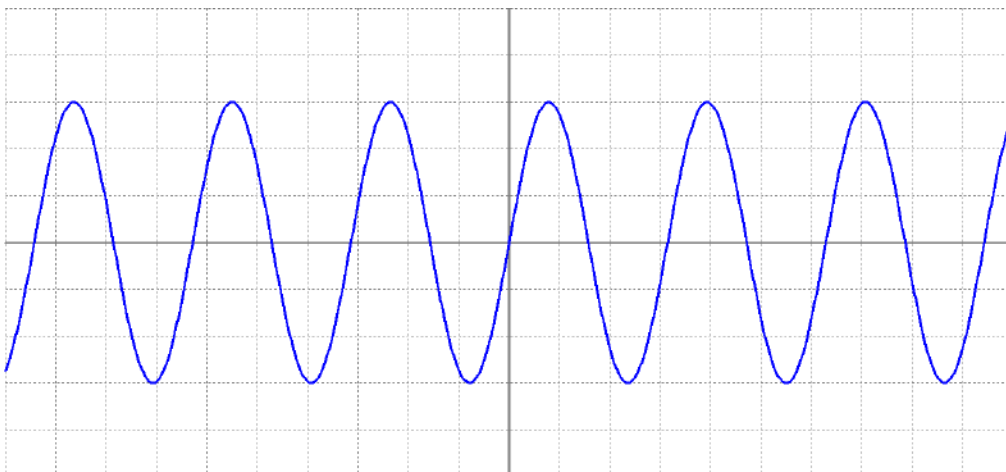


Figura 3.7: Representació gràfica de la funció $f_2(x) = 3 \cdot \sin(2x)$. (Font pròpia).

El segon harmònic és la $f_2(x) = 1,5 \cdot \sin(3x)$ amb una amplitud d'1,5 (Figura 3.8).

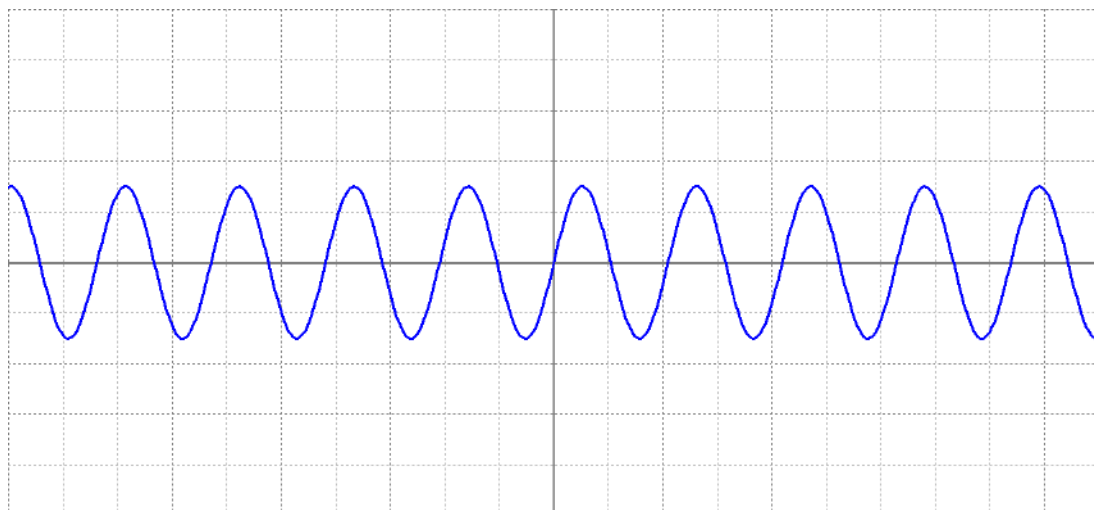


Figura 3.8: Representació gràfica de la funció $f_3(x) = 1,5 \cdot \sin(3x)$. (Font pròpia).

L'últim harmònic que incorporarem en aquesta ona sonora complexa serà la funció $f_3(x) = 2 \cdot \sin(4x)$ amb una amplitud de 2 (Figura 3.9).

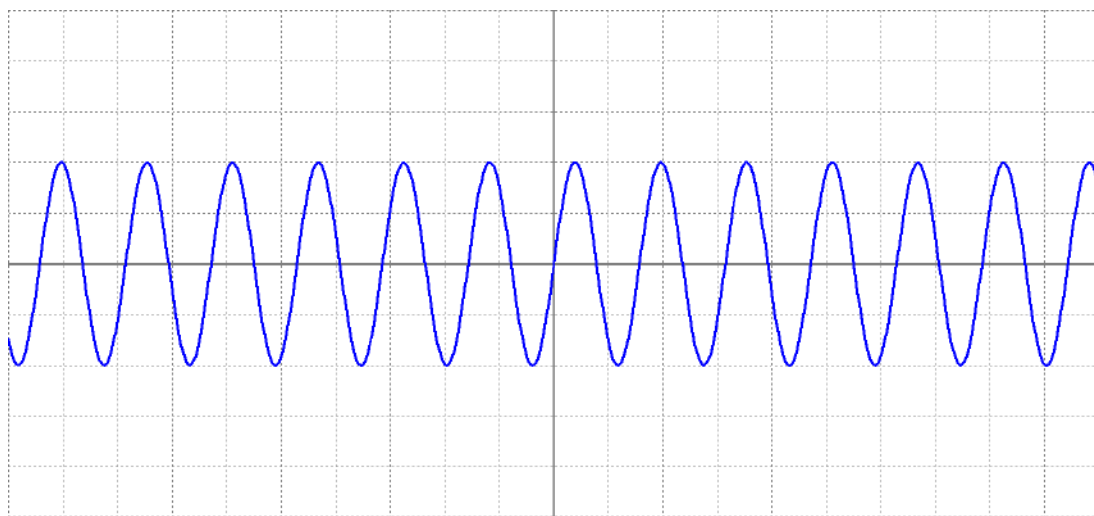


Figura 3.9: Representació gràfica de la funció $f_3(x) = 2 \cdot \sin(4x)$. (Font pròpia).

Un cop tenim les funcions dels primers 4 parcials, podem veure a una banda (Figura 3.10) cada una de les funcions, pintades d'un color diferent. A l'altre costat el que veiem és la forma que té la funció que resulta de la suma de cada una d'elles (Figura 3.11).

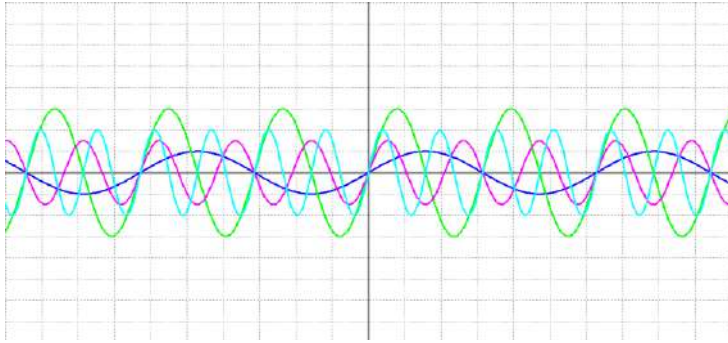


Figura 3.10: Il·lustració gràfica on hi trobem representades totes les funcions anteriors. (Font pròpia).

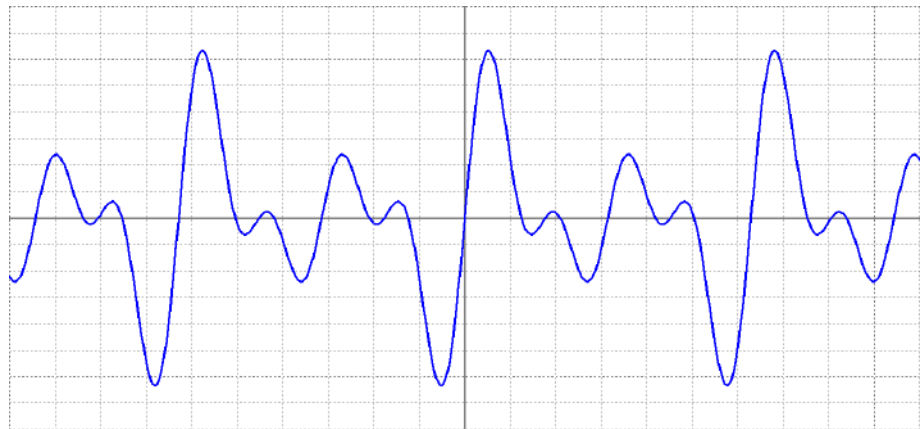


Figura 3.11: Il·lustració gràfica de la funció resultant de la suma de totes les funcions de la Figura 3.10. (Font pròpia).

Llavors, un cop tenim la forma de l'ona complexa el que hem de fer és multiplicar aquesta funció $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(x)$ i ens queda una forma com la de la *Figura 3.12*.

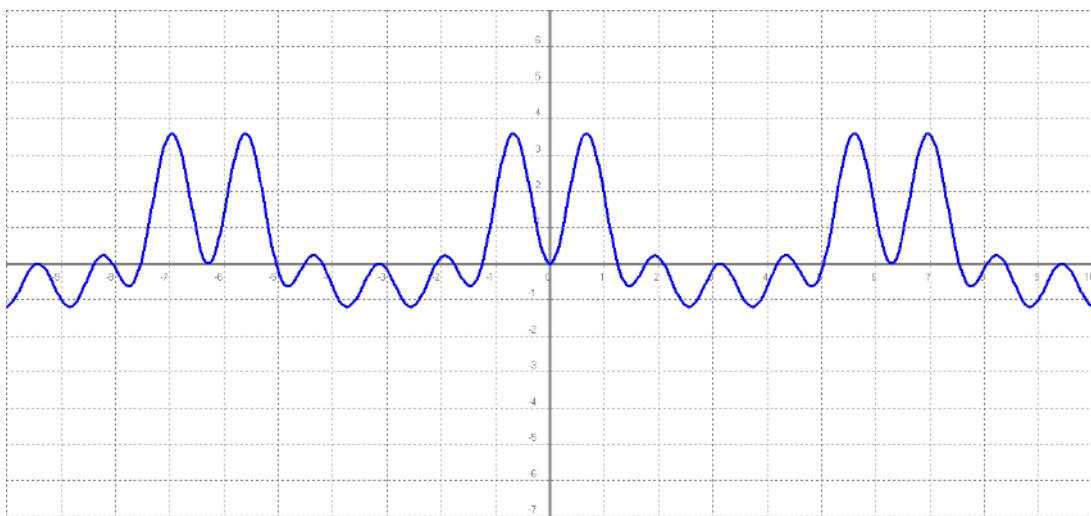


Figura 3.12: Il·lustració gràfica de la funció $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(x)$. (Font pròpia).

Lavors hem de calcular la integral definida entre un període complet, és a dir, quan l'ona ja ha realitzat una oscil·lació completa (2π). Tot i això podríem representar-ho també des de $-\pi$ fins a π . Lavors el resultat que obtenim el dividim per $(\pi/\pi=1)$. Veiem que l'amplitud de la $f(x)$ per tant és 1.

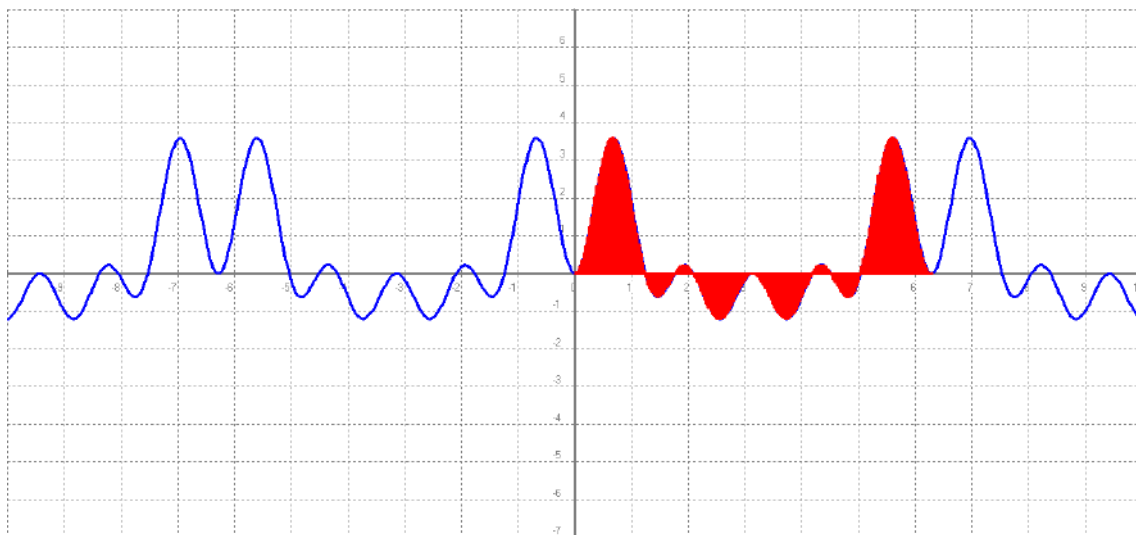


Figura 3.13: Il·lustració gràfica del càlcul de la integral definida de la funció $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(x)$. (Font pròpia).

Ara el que hem de fer és repetir el procés multiplicant la funció de la *Figura 3.11* per cada un dels sinus de les seves freqüències.

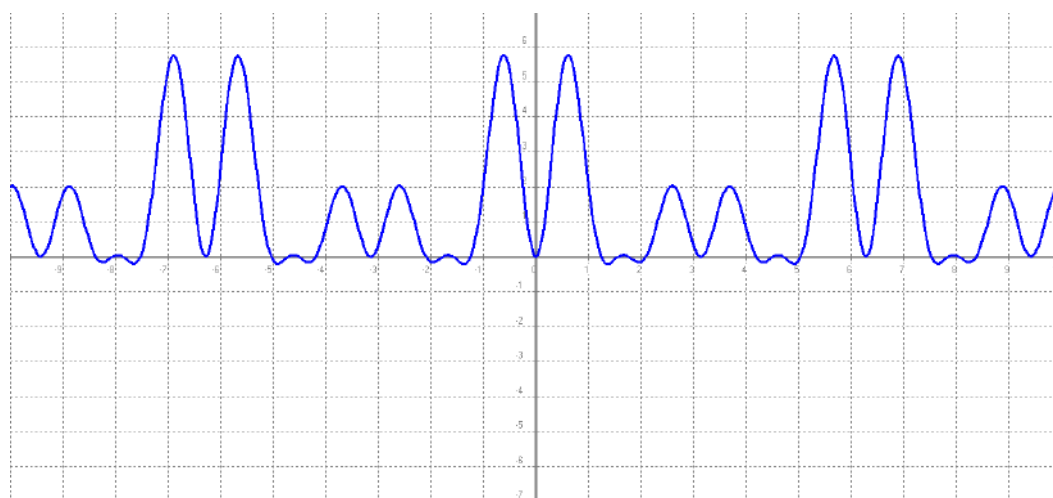


Figura 3.14: Il·lustració gràfica del càlcul de la funció $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(2x)$. (Font pròpia).

Per tant, ara farem $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(2x)$. Repetim el procés i veiem que la seva integral definida és 9,42, per tant si ho dividim per pi $9,42/\pi = 3$ ens surt que el resultat del coeficient del segon terme és 3.

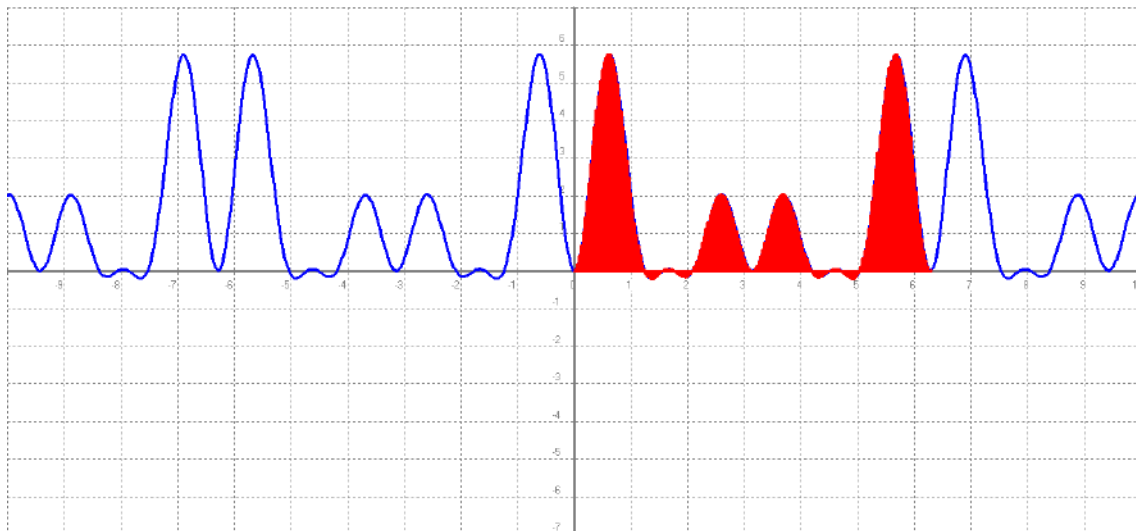


Figura 3.15: Il·lustració gràfica del càlcul de la integral definida de la funció $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(2x)$. (Font pròpia).

Si ara ho multipliquem per $\sin(3x)$, $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(3x)$ i calculem la integral definida tal com hem fet abans el que obtenim és un resultat de 4,71. Per tant, $4,71/\pi = 1,5$.

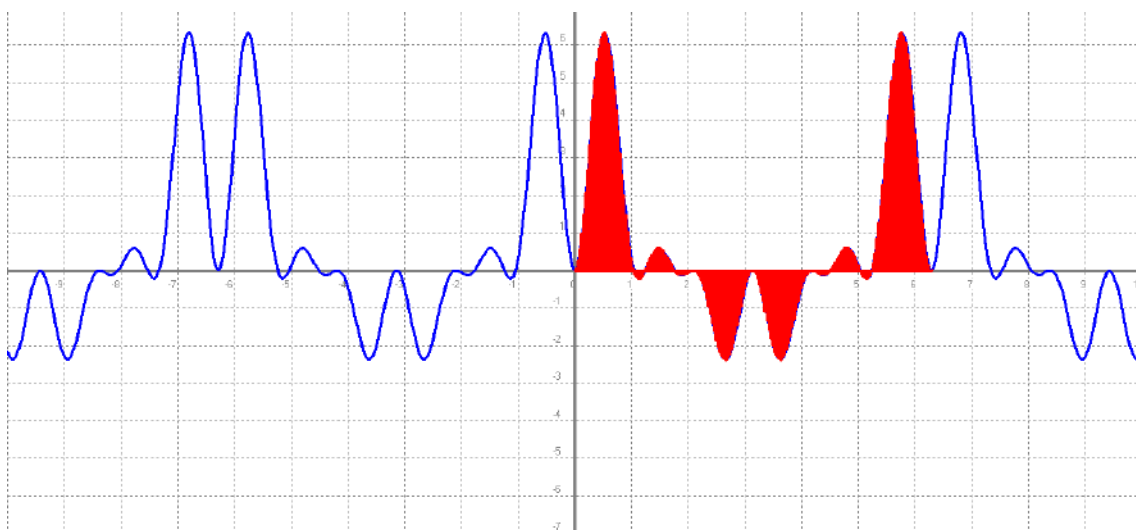


Figura 3.16: Il·lustració gràfica del càlcul de la integral definida de la funció $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(3x)$. (Font pròpia).

En últim lloc tocarà repetir el procés i multiplicar-ho per $\sin(4x)$. Calculem la integral definida i obtenim un resultat de 6,28 i ho dividim pel famós nombre pi $6,28/\pi = 2$.

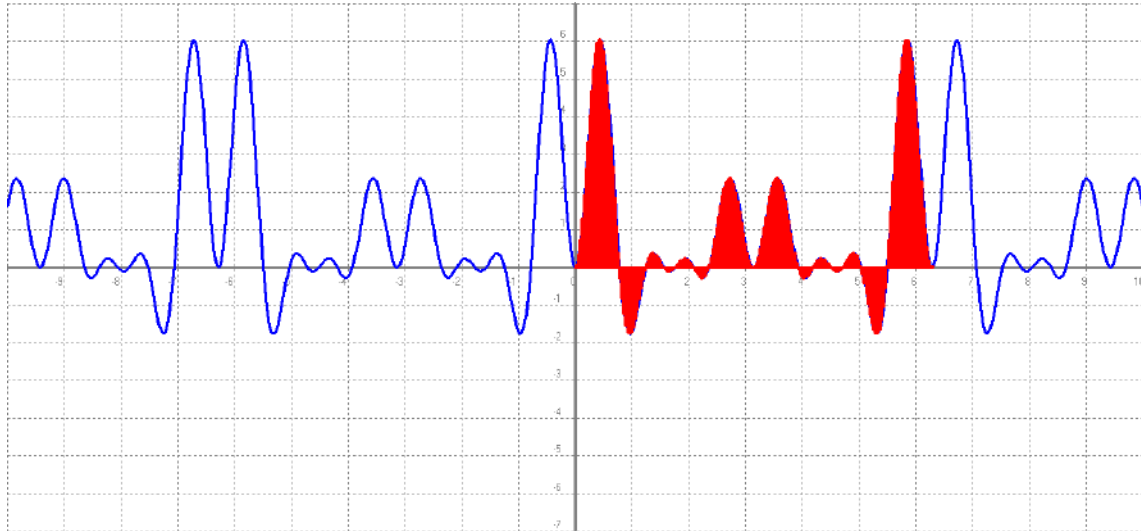


Figura 3.17: Il·lustració gràfica del càlcul de la integral definida de la funció $(f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)) \cdot \sin(4x)$. (Font pròpia).

Tot i aquest ser un cas senzill, hem pogut comprovar com la transformada de Fourier funciona i el que obtenim són les amplituds tant de la seva freqüència fonamental com la dels seus harmònics diversos. En el nostre cas podem veure com, si anem sumant cada un dels seus parcials amb el resultat de la transformada de Fourier, obtindrem òbviament la gràfica inicial.

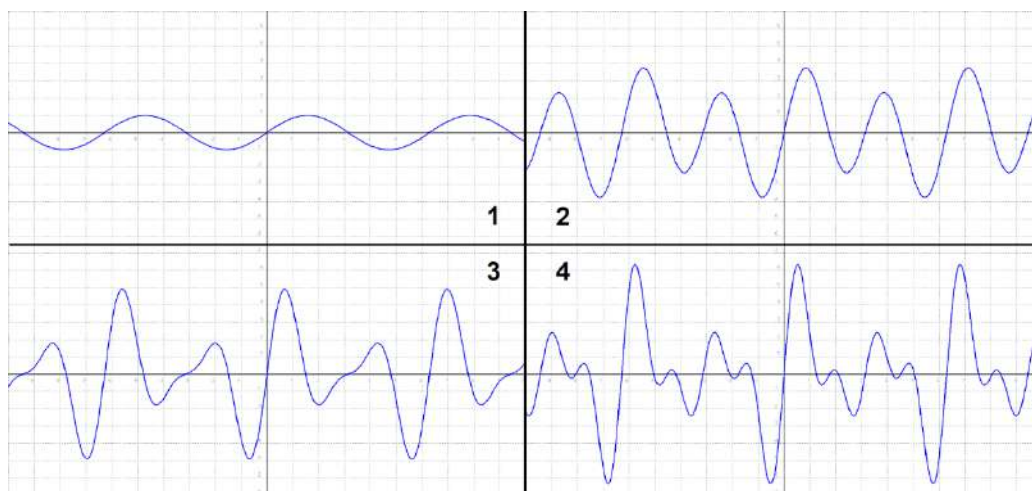


Figura 3.14: Il·lustració gràfica de la suma de cada una de les ones que formen aquesta ona sonora $f_0(x) + f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)$. (Font pròpia).

Seguidament, podem veure un exemple de com es forma una ona concreta a partir d'aplicar la Transformada de Fourier a un so qualsevol.

$$1 \sin(x) + 3 \sin(2x) + 1,5 \sin(3x) + 2 \sin(4x)$$

Fórmula 3.5: Funció final de l'ona sonora obtinguda a partir de la Transformada de Fourier.

4. La música des d'un punt de vista tecnològic.

4.1. Origen de l'enregistrament i reproducció sonora

Des de la revolució industrial la humanitat ha patit tot un seguit de canvis que van desencadenar un segle XIX de grans avenços en el món de la tecnologia com la invenció del telèfon d'Antonio Meucci, el cinematògraf dels germans Lumière o el fonògraf d'Edison [64]. De fet, aquest últim va causar una gran revolució l'any 1877 que portarà un canvi immens en el món de crear i experimentar la música. Tot i això aquest no era el propòsit d'Edison, ja que ell el que volia era idear una màquina pel dictat, audiollibres per cecs, gravacions de records... El fonògraf utilitzava un sistema de gravació analògica. Les ones sonores es traduïen en vibracions mecàniques que un estilet o punxó transformava a una sèrie de marques sobre el cilindre del fonògraf. Llavors aquest cilindre era com un CD que en fer el procés contrari es podia utilitzar com a altaveu per amplificar les vibracions que produïen les marques del cilindre del fonògraf. L'any 1887 va aparèixer el gramòfon de la mà d'Emilie Berliner, un dispositiu que va ser molt exitós, que es diferenciava del fonògraf en el fet que les incursions o marques es feien sobre un disc pla [65].

Aquesta revolució va seguir avançant. Cada vegada les gravacions eren més nítides, cosa que va transformar el consum de la cultura musical. Aleshores ja no era necessari anar a veure un concert per poder escoltar música. Això també va ajudar a la preservació de diverses cultures indígenes, a la creació de més gèneres musicals i a l'arribada del so al cinema.

L'any 1925, la gravació musical va fer un pas més enllà i es deixa enrere l'era acústica per entrar a l'elèctrica. Invents recents d'inicis del segle XX com els micròfons, els altaveus o la taula de mescla van propiciar, amb l'ajuda d'Edwin

Armstrong, un enregistrament de so d'alta fidelitat que va permetre el negoci de les primeres discogràfiques. Paral·lelament, va ser també durant als inicis del segle XX quan va començar la ràdio [66].

Els discs van anar evolucionant i canviant els seus materials i velocitats de reproducció fins a l'aparició de la cinta magnètica (1928) de la mà de Fritz Pfleumer i del magnetòfon (1934). Després de la Segona Guerra Mundial (1939 - 1945) els Estats Units s'adonaren de les innovacions en captura i reproducció d'Alemanya i es van iniciar en el mercat. L'any 1963 la companyia neerlandesa PHILIPS llançà el primer cassette i, anys més tard, Japó en va reduir la mida unint el casset i la ràdio en un mateix aparell portàtil. L'any 1979 la japonesa SONY llançà al mercat el walkman, tot canviant la manera amb la qual la gent escoltava música ja que és un aparell que permet escoltar música de manera portàtil. Les millores de la qualitat del so van fer arribar al mercat el disc compacte -un disc òptic que guarda de manera digital tot tipus d'arxius diversos- l'any 1982 i el "discman" dos anys més tard [67].

A finals del segle XX, amb l'arribada de l'ordinador, el mercat va canviar radicalment les regles del joc. Al món de la música va tenir lloc l'aparició de l'mp3 l'any 1995, que va esdevenir un nou model de reproducció musical que va explotar a inicis del segle XXI, quan en un dispositiu tan petit com un mp3 hi podíem trobar fins a 1000 cançons .

Al segle XXI, amb l'arribada massiva d'internet i les noves plataformes de distribució com *iTunes*, *Spotify*, *YouTube* o *Deezer*, es va permetre el consum de música de forma més fàcil, ràpida i diversa arribant a tots els públics de forma gairebé immediata [68].



Figura 4.1: Línia del temps de l'evolució dels equips de reproducció musical. (Font pròpia).

4.2. Manipulació d'ones sonores

El terme manipulació es refereix a influir d'alguna manera en un element provocant un canvi. De fet, si ens haguéssim de regir per aquesta definició, qualsevol canvi que produeixi un efecte sobre una ona sonora en seria una manipulació, com l'acondicionament acústic d'un espai per tal d'eliminar-ne la reverberació. Tot i això ens volem centrar en la manipulació digital, que fa que un cop registrat el so el puguem modular per tal d'aconseguir unes característiques determinades.

La innovació dels darrers anys ha fet que moltes eines que abans només eren utilitzades en grans estudis de gravació, ara amb l'arribada de l'internet les puguem trobar en programes que podem descarregar gratuïtament i que ens ofereixen un software d'àudio molt potent. A més de gravar, podem masteritzar - inserir efectes a la pista d'àudio i editar-la- la nostra peça musical afegint-hi efectes diversos com ara un *equalitzador*, que serveix per pujar o baixar la intensitat d'unes freqüències concretes; *reverberació*, per tal d'oferir a la veu un efecte d'amplitud com si estigués en un espai més gran; *delay*, fent que un tros de la pista gravada es vagi repetint com si fos causat per un eco; o l'*autotune*, que permet modificar nota per nota la pista d'àudio per tal d'encaixar-la en la melodia que vols sense desafinar. De fet, hi ha molts més efectes que s'utilitzen en postproducció a l'hora de gravar una cançó i és per això que. Cada vegada

més la tecnologia es fa servir a l'hora de produir una cançó. A diferència de mitjans del segle XX, a l'estudi no es grava el grup cantant la cançó en directe, sinó que el que es fa és gravar cada músic per separat i després el tècnic de so treballa per empastar-ho tot bé per aconseguir un bon resultat final [69].



Figura 4.2: Captura de pantalla del software musical "Cubase", molt utilitzat en estudis de gravació professional. (Font: Cubase)

La influència de la tecnologia a la música fa que aquesta soni d'una manera que seria impossible que sonés a la vida real. Ens provoca uns sentiments molt més forts que no pas una cançó que no ha estat retocada digitalment [70]. Aquest fenomen s'anomena estímuls supernormals i es basa en el fet de sentir-nos atrets per aspectes de la nostra vida quotidiana que, gràcies als avenços tecnològics, han fet que es converteixin en realitat. El futur de la música i de molts altres aspectes del nostre dia a dia passen pel desenvolupament tecnològic, i aquest marcarà com serà la música del futur [71].

4.2.1. Freqüència de mostreig

En la gravació d'una pista d'àudio, la freqüència de mostreig juga un paper molt important, ja que és la quantitat de mostres que es prenen per segon. Com més mostres es prenen, més bona qualitat tindrà el so. Com podem veure en la *Figura 4.3*, en l'ona sonora A, en tenir una freqüència de mostreig més baixa té lloc un efecte conegut com a *aliasing*, on l'ona resultant es troba molt distorsionada de l'original [72] [73]. A la *Figura 4.3*, en canvi, no es produeix aquest fenomen. De fet, com totes les freqüències, la freqüència de mostreig es mesura en Hertz (Hz) o KiloHertz (KHz), la més habitual d'utilitzar per tal d'obtenir una bona qualitat sonora és la de 44100 Hz, és a dir, 44100 mostres per segon [74].

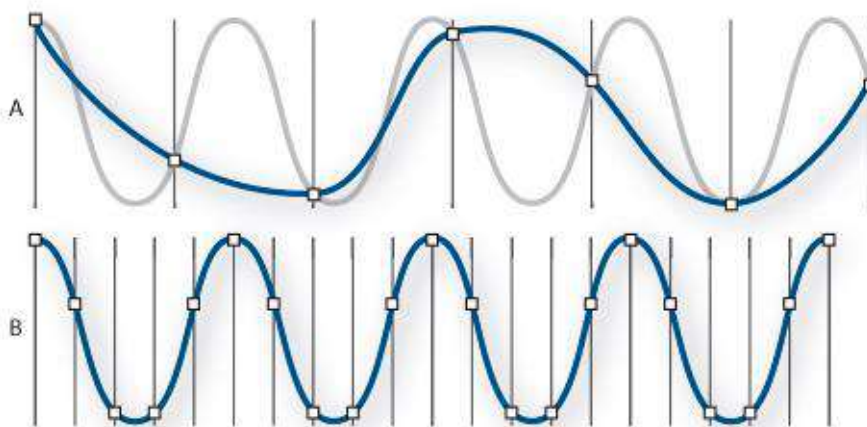


Figura 4.3: Comparativa entre l'ona sonora A, on la freqüència de mostreig baixa fa que l'ona resultant sigui diferent a l'original, i la B, on la freqüència de mostreig és l'adequada. (Font: Referència bibliogràfica [73]).

4.3. Què és un sintetitzador?

Un sintetitzador és un instrument musical electrònic que funciona a partir de generar senyals elèctrics posteriorment convertits en sons reproduïbles des d'una font sonora, com pot ser un altaveu. La característica principal del sintetitzador, que el diferencia d'altres instruments, és que els seus sons es poden crear des de zero i ser modificats, variant així també el seu timbre. La majoria dels sintetitzadors es controlen a través d'un piano i, com molts altres aparells tecnològics, han anat reduint la seva mida i eficiència a mesura que han anat passant els anys.

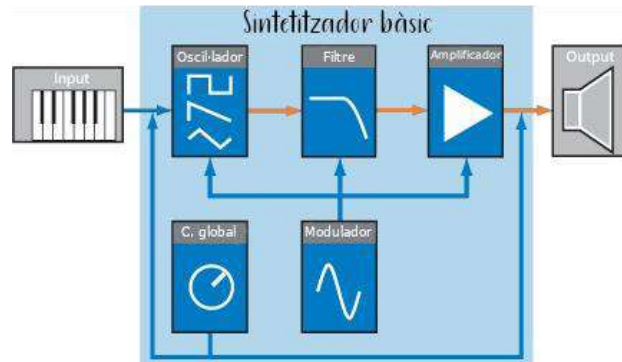


Figura 4.4: Esquema del funcionament d'un sintetitzador bàsic. (Font pròpia)

4.3.1. Origen del sintetitzador

Els primers experiments que van unir so i electricitat va tenir lloc l'any 1895 de la mà d'Alfred Graham, tot i que no va ser fins al 1899 quan William Du Bois Duddell es va adonar, arreglant l'enllumenat de Londres, que canviant el voltatge de les bombetes podia controlar la freqüència del so que produïen. D'una forma tan senzilla va néixer el que es considera el primer sintetitzador conegut de la història, el *Singing Arc*, on el voltatge augmentava o disminuïa utilitzant un volt per octava.



Figura 4.5: Imatge del Singing Arc: el primer instrument capaç de sintetitzar so a partir de variar el voltatge, inventat per William Du Bois Duddell. (Font: Britannica).

Tal com comentàvem al principi d'aquest mateix punt, a inicis del segle XX, una sèrie d'invents en el món tecnològic i sonor van propiciar el camp d'experimentació per a la creació de noves formes de fer música. Per exemple l'enginyer estatunidenc Lee De Forest, va crear al 1906 el què es coneix com el primer bulb amplificador o altaveu. En aquest cas, la invenció de l'altaveu també va comportar la invenció dels primers instruments musicals elèctrics que n'utilitzaven, com per exemple:

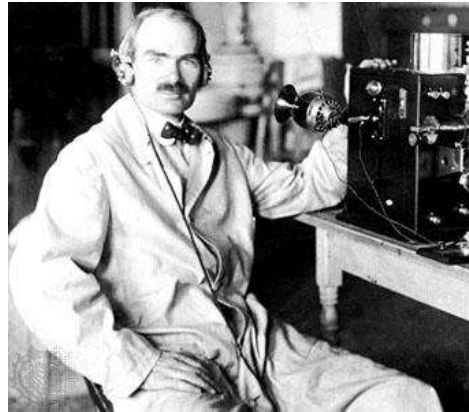


Figura 4.6: Imatge de l'enginyer Lee De Forest amb el que es considera el primer altaveu de l'història (Font: Britannica).

- Audió piano, creat l'any 1915 pel mateix Lee De Forest.
- Theremin, creat l'any 1920 per Léon Theremin.
- Ones Martenot, creat l'any 1928 per Maurice Martenot.
- Trautonium, creat l'any 1929 per Friedrich Trautwein.



Figura 4.7: Comparativa de 4 instruments musicals elèctrics que es van inventar a inicis del segle XX. (Fonts diverses).

Aquests primers instruments ja sintetitzaven sons complexos amb més d'una ona sonora i, sobretot, en el cas de les Ones Martenot i el Trautonium el seu desenvolupament i millores van fer que acabessin amb qualitats molt similars als sintetitzadors posteriors.

L'any 1957, els enginyers Herbert Belar i Harry Olson van inventar el RCA Mark II, considerat el primer sistema de producció de so electrònic on les ordres eren introduïdes en aquest gegant sintetitzador -ocupava tota una habitació- a través d'un paper foradat.



Figura 4.8: Imatge on es pot veure el primer sistema de producció de so electrònic. (Font: encyclotronic).

Tot i això, l'invent del transistor va ser un ingredient fonamental, no només en el procés de miniaturització d'aquests primers sintetitzadors gegants, sinó també en el fet de facilitar les dinàmiques de control de voltatge que permetia la síntesi de tots els paràmetres d'un sintetitzador (timbre, freqüència, forma d'ona i intensitat). Tenint aquest fenomen en ment, Robert A. Moog va presentar l'any 1964 els seus mòduls musicals, els que es basaven en el control del voltatge a través d'un circuit de cables complex. De fet, a causa de la gran popularització que van tenir aquests primers productes, sovint es considera Moog com el creador del sintetitzador, tot i que com hem pogut veure no és així [75].



Figura 4.9: Imatge de Robert Moog a l'esquerra del seu primer sintetitzador i a darrere del seu sintetitzador "portàtil". (Font: Keyboards.de).

Després d'aquest pas endavant per part de Robert Moog, tothom veia important la necessitat de fer que els sintetitzadors fossin més eficaços i més petits. Per això va començar una carrera tecnològica per fer els sintetitzadors més eficients. Alguns d'aquests participants en aquesta cursa van ser: Donald Buchla a Estats units, Paolo Ketoff a Itàlia, Peter Zinovieff a Anglaterra o el mateix Robert Moog [76].

Durant els anys setanta moltes novetats del món de la tecnologia i control del voltatge van reduir dràsticament la mida dels sintetitzadors. Es van crear els primers teclats que es podien portar fàcilment, propiciant un augment notable d'aquest cada vegada més famós i utilitzat instrument. Això portà al fet que a

finals dels anys setanta, però sobretot durant l'època dels 80, el sintetitzador fos un instrument molt explorat i molt utilitzat per molts artistes. De fet, va crear un estil concret, anomenat synth-pop, que va donar peu a melodies tan famoses com les de Mecano, Pink Floyd, Queen, Europe o David Bowie [77].

Aquest augment per l'interès cap al sintetitzador també va ser causat per l'arribada al mercat dels nous sintetitzadors japonesos de marques tan famoses com Korg, Casio o Roland. Van canviar completament el mercat, no només per la seva reduïda mida, sinó pel descens dràstic de preus que va suposar la fabricació d'aquests sintetitzadors amb materials més econòmics com el plàstic.



Figura 4.10: Imatge del primer i famós sintetitzador de la marca Casio: "Casiotone 201" de l'any 1980. (Font: Reverb).

A partir de llavors, cada vegada els sintetitzadors físics van ser més i més petits. Ara poden ser del mida d'un bloc de notes amb un minimalisme, uns acabats i un ventall de possibilitats que fan que cada vegada siguin més protagonistes en les gravacions de cançons de l'actualitat, deixant en un segon pla instruments presents en gairebé totes les cançons des de l'època dels 50, com la guitarra elèctrica o el baix [76].



Figura 4.11: Imatge del sintetitzador "Teenage Engineering" de 20cm de llargada. (Font: Thomann).

Tot i això, actualment la majoria de sintetitzadors són digitals i el teclat es connecta a aquest software per tal de determinar les notes desitjades, fent que el seu límit de produir sons sigui només dins la teva imaginació.

a) Tipus d'ones

Amb els sintetitzadors, podem modificar el tipus d'ona que volem, per tal que amb una tria d'amplituds concretes el so que aconseguim tingui la forma desitjada. A continuació veurem quines són les possibilitats:

I. Sinusoidals

Les ones sinusoidals, com ja hem vist en apartats anteriors, es basen en una ona sonora simple amb només la seva freqüència fonamental. Per tant, en el cas del sintetitzador, l'ona de la nota que volem és només la de la seva freqüència fonamental, com si fos un diapasó.

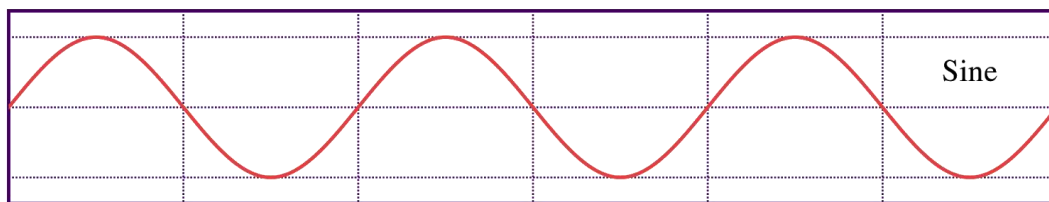


Figura 4.13: Representació gràfica d'una ona sinusoidal. (Font: Viquipèdia).

Tenint en compte totes les propietats físiques de les ones sonores que hem vist al segon punt d'aquest treball, podem entendre la fórmula amb la qual es pot definir qualsevol ona sonora simple o so sinusoidal pur [78].

Si ens fixem en la *Fórmula 4.1*, podem veure que en primer lloc calculem el quocient entre el producte de 2π i la freqüència del so que volem aconseguir i la freqüència de mostreig escollida (11025 Hz, 22050 Hz o 44100 Hz) – que marca el nombre de mostres que es prenen per segon-. Llavors aquest quocient el multipliquem pel nombre de mostra que estem calculant en aquell moment. De

tota aquesta operació, en calculem el sinus i llavors aquest el multipliquem per l'amplitud escollida. A més amplitud, més intensitat.

$$\text{Amplitud} \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot f}{f.\text{mostreig}} \cdot n^{\circ} \text{ mostres} \right)$$

Fórmula 4.1: Fórmula utilitzada per sintetitzar ones sonores sinusoidals.

Per altra banda el nombre de mostres ens marca, de fet, la quantitat de vegades que haurem de dur a terme la fórmula de l'ona i, per tant, la duració que tindrà l'ona sonora.

En música les duracions de les notes venen regides en primer lloc pel tempo de la cançó i, en segon, pel tipus de nota que és (blanca, negra, corxera...). Per tal de conèixer el nombre de mostres concretes que volem, hem de tenir en compte la fórmula matemàtica de la *Fórmula 4.2*. En aquesta fórmula primerament dividim els 60 segons entre el tempo de la cançó per saber quant dura una negra (si comptem que el tempo està en negres). Aleshores multipliquem el resultat per la freqüència de mostreig i la durada de la nota. Llavors, si volem passar la durada de la nota de notació musical a matemàtica, hem de seguir la taula de la dreta.

NOTA	DURADA
semifusa	0,0625
fusa	0,125
semicorxera	0,25
corxera	0,5
negra	1
blanca	2
rodona	4

$$n^{\circ} \text{ mostres} = \frac{60 \text{ s}}{\text{tempo (bpm)}} \cdot \text{freq. mostreig} \cdot \text{durada nota}$$

Fórmula 4.2: Fórmula per calcular el nombre de notes.

Amb el sinus fet, el que ens resta fer és multiplicar-ho per l'amplitud de l'ona -com més gran sigui, més forta sonarà-.

Aquesta funció l'haurem d'anar repetint durant tot el seu domini: des de 0 fins al nombre màxim de mostres.

II. Dent de serra

L'ona de dent de serra és un tipus d'ona no sinusoidal molt utilitzada en la història del sintetitzador. De fet, juntament amb les ones quadrades, serien les més famoses i té un so característic en el qual es basen molts videojocs de finals del segle XX. El seu nom, com pot ser fàcilment deduïble, es deu a la seva forma característica, similar a la d'una serra de fusteria [79].

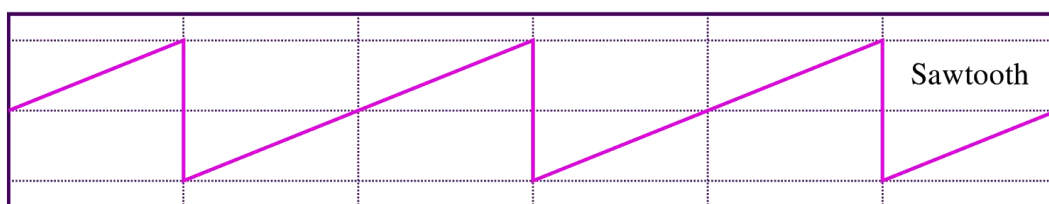


Figura 4.14: Representació gràfica d'una ona de dent de serra. (Font: Viquipèdia).

Per entendre millor aquest tipus d'ona, el que farem serà fer la transformada de Fourier. En primer lloc, com ja hem vist en el punt 2.2.4, qualsevol so el podem veure com a la suma de diverses funcions sinusoidals.

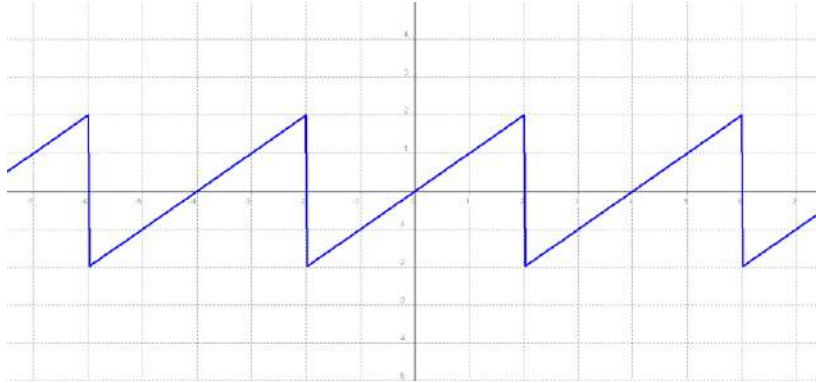


Figura 4.15: Representació gràfica d'una ona de dent de serra feta a partir del programa funcions. (Font pròpia).

En aquest cas podem veure les propietats físiques d'una dent de serra ja formada com la de la *Figura 4.15*, que s'ha format a partir de la *Taula 4.1*.

X	Y
-6	2
-5,9999	-2
-2	2
-1,9999	-2
2	2
2,0001	-2
6	2
6,0001	-2

Taula 4.1: Taula dels punts que formen la funció de la figura 4.15.

El període d'aquesta funció (T) -el que triga a fer una oscil·lació completa- va des de -2 (-l) fins a 2 (l), per tant val 4. En aquest espai, la funció que determina el recorregut és $f(x) = x$.

- (1) Per conèixer la primera amplitud hem de calcular la funció $g_1(x) = x \sin \frac{\pi \cdot x}{2}$ i calcular-ne la seva integral definida entre -l i l.

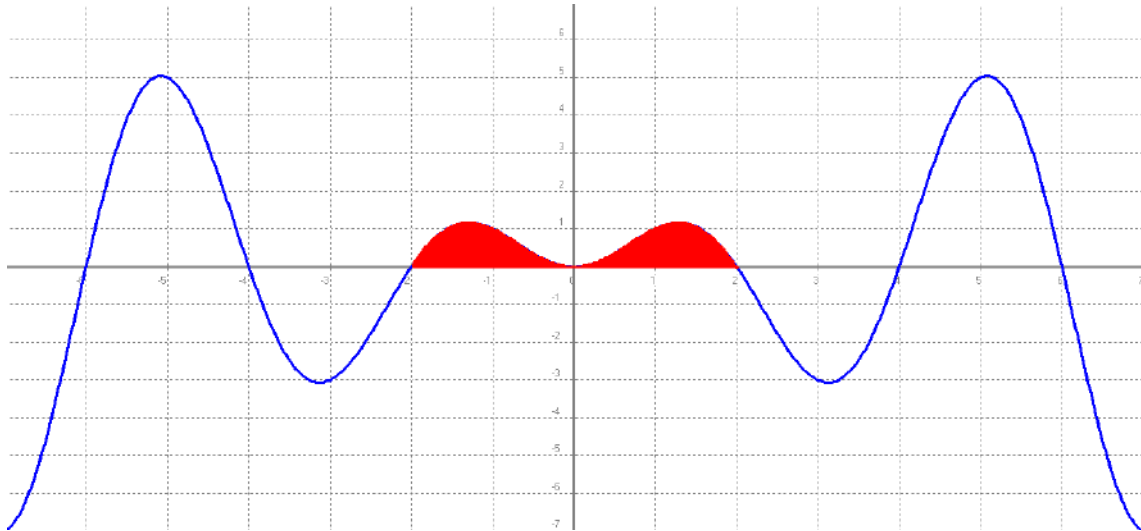


Figura 4.16: representació i càlcul de l'integral definida de la funció $g_1(x) = x \sin \frac{\pi \cdot x}{2}$ a partir del programa funcions. (Font pròpia).

El resultat de la integral definida el dividim per l: $\frac{2,545691}{2} = 1,272846$, i d'aquesta manera obtenim el primer terme.

- (2) Repetim el procés, aquesta vegada calculant la funció $g_2(x) = x \sin \frac{2\pi \cdot x}{2}$ i en calculem la seva integral definida.

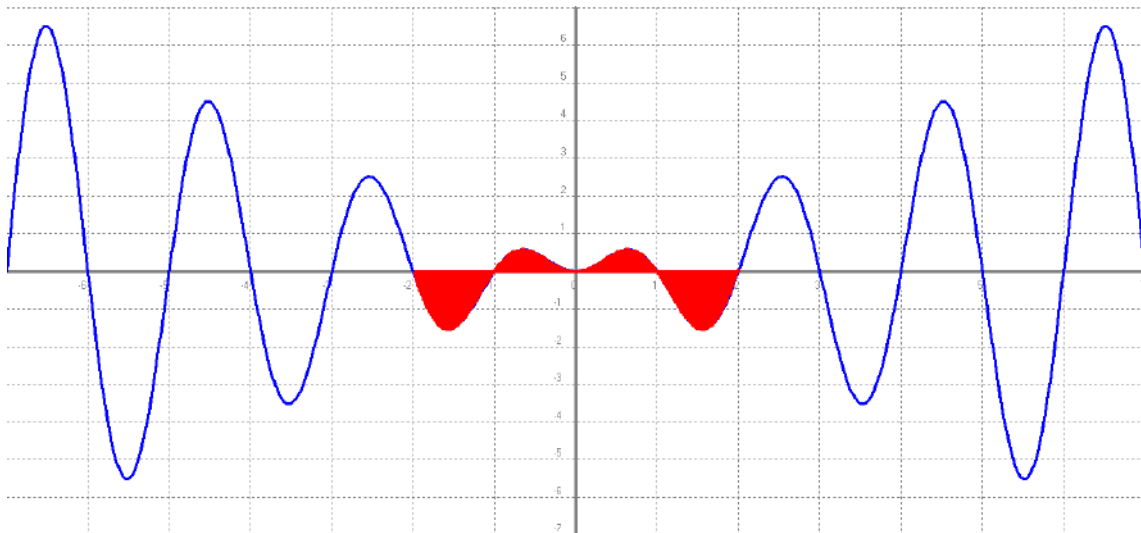


Figura 4.17: representació i càlcul de l'integral definida de la funció $g_2(x) = x \sin \frac{2\pi \cdot x}{2}$ a partir del programa funcions. (Font pròpia).

El resultat, novament el dividim per $l: \frac{-1,271665}{2} = 0,620833$ i obtenim l'amplitud del segon parcial.

Aquest procés l'hem de repetir canviant la freqüència en cada cas. La *Taula 4.2*, ens relaciona la freqüència fonamental i els primers nou harmònics, és a dir, els deu primers parcials, amb la seva respectiva amplitud, aconseguida repetint el procés que acabem d'explicar.

Nº de parcial	Integral definida de $g_n(x)$	Amplitud (integral definida de $g_n(x) / l$)
1r parcial	2,545691	1,272846
2n parcial	-1,271665	-0,620833
3r parcial	0,846446	0,423223
4rt parcial	-0,633474	-0,316737
5è parcial	0,505368	0,252684
6è parcial	-0,419704	-0,209852
7è parcial	0,358296	0,179148
8è parcial	-0,312048	-0,156024
9è parcial	0,275910	0,137955
10è parcial	0,246848	-0,123424

Taula 4.2. Taula que relaciona el parcial amb la seva amplitud en el cas de l'ona de dent de serra.

Ara podem veure com la suma de totes aquestes funcions sinusoidals, amb les seves amplituds concretes, dóna com a resultat la funció de dent de serra. Com podem veure a la *Figura 4.18*, la suma de les funcions sinusoidals és exactament

l'ona de la dent de serra. Per tant, podem demostrar com la transformada de Fourier té la seva aplicació pràctica en sintetitzar ones sonores complexes [79].

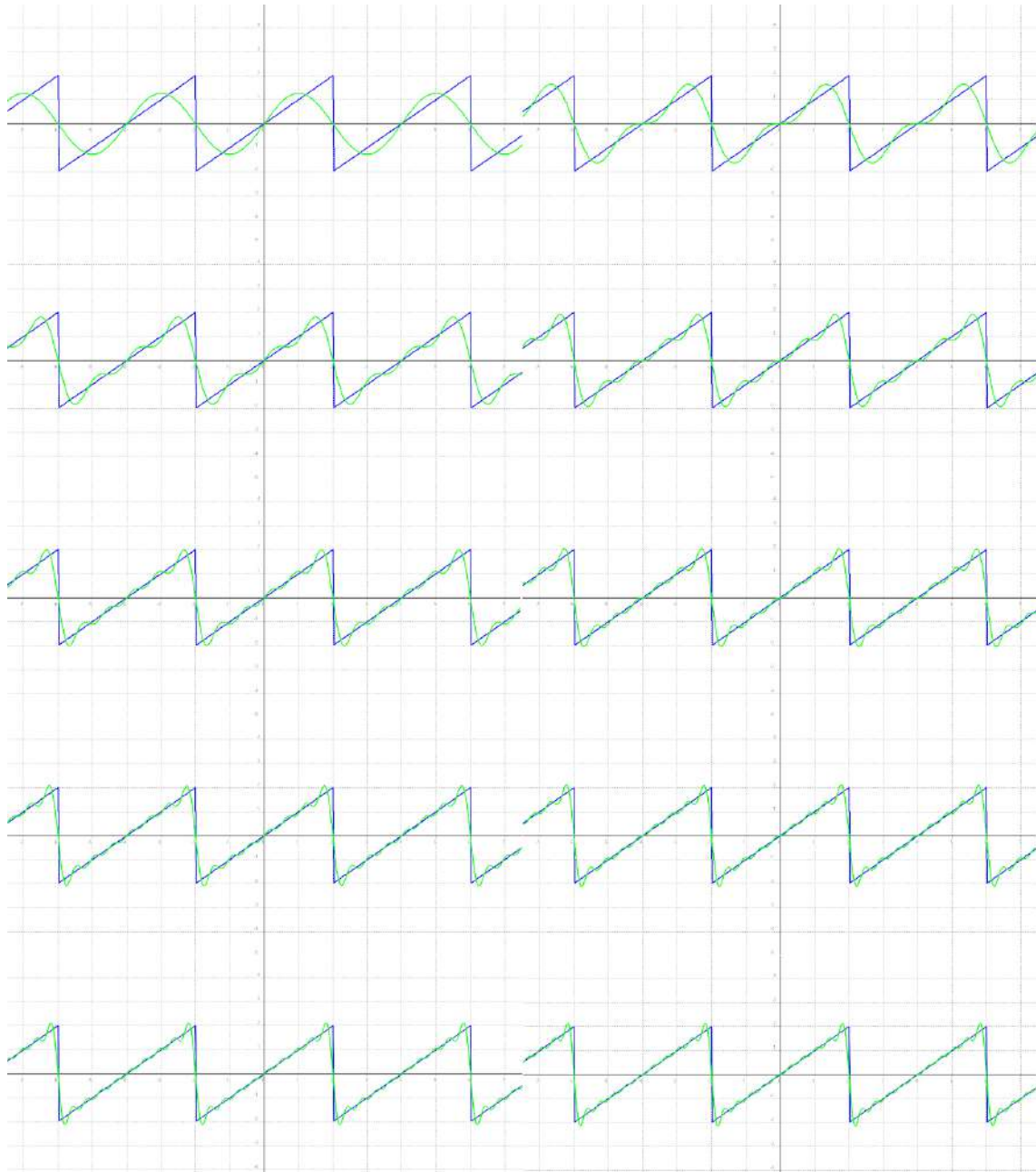


Figura 4.18: Procés de formació de l'ona dent de serra a partir de la suma de les seves ones sonores sinusoidals. (Font pròpia).

III. Ona quadrada

Les ones quadrades són un tipus d'ones sonores no sinusoidals que passen d'un estat a l'altre de tensió en intervals regulars en un temps molt reduït. Aquestes ones són molt utilitzades en objectes tecnològics com ara rellotges, temporitzadors, ràdio o ordinadors. A més, aquest tipus d'ones sonores també es formen de manera natural en instruments que consten de tubs cilíndrics tancats, com per exemple el sikus, l'orgue o el clarinet en els seus registres menors [80].

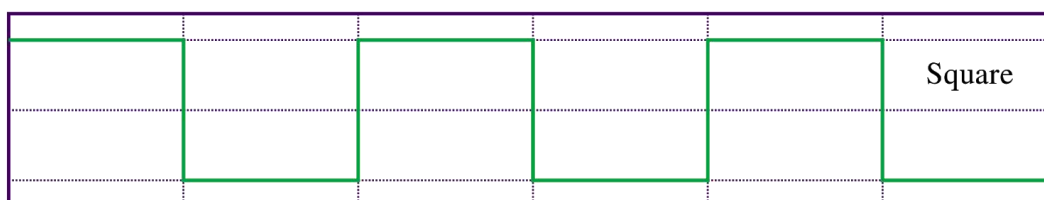


Figura 4.19: Representació gràfica d'una ona quadrada. (Font: Viquipèdia).

Des d'un punt de vista matemàtic, aquest tipus d'ona només té harmònics imparells, per tant, l'amplitud dels harmònics parells és igual a 0. De fet, l'amplitud dels harmònics imparells és inversament proporcional al nombre del parcial, com podem veure en els primers vint parcials de la *Taula 4.3* [81].

Nº de parcial	L'amplitud ($A = \frac{1}{n}$)
1r parcial	1
2n parcial	0
3r parcial	1/3
4rt parcial	0
5è parcial	1/5

6è parcial	0
7è parcial	1/7
8è parcial	0
9è parcial	1/9
10è parcial	0
11è parcial	1/11
12è parcial	0
13è parcial	1/13
14è parcial	0
15è parcial	1/15
16è parcial	0
17è parcial	1/17
18è parcial	0
19è parcial	1/19
20è parcial	0

Taula 4.2. Taula que relaciona el parcial amb la seva amplitud, en el cas de l'ona quadrada.

Si ara representem l'ona gràficament, obtenim la suma de cadascuna de les ones sonores, mostrat a la *Figura 4.20*.



Figura 4.20: Procés de formació de l'ona quadrada a partir de la suma de les seves ones sonores sinusoidals. (Font pròpia).

IV. Ona triangular

L'ona triangular és l'última de les ones no sinusoidals. Aquest tipus d'ona es caracteritza, igual que la quadrada, per només tenir parcials imparells. Aquest fet fa que, tot i ser una ona molt similar a la de dent de serra, tingui menys riquesa harmònica [82].

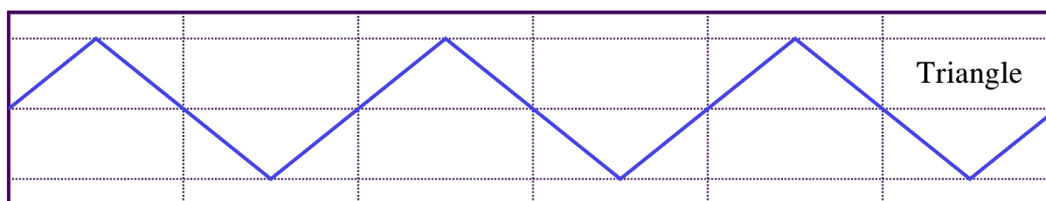


Figura 4.21: Representació gràfica d'una ona triangular. (Font: Viquipèdia).

Si ho mirem des d'un punt de vista matemàtic, podem veure que la seva amplitud decreix a mesura que el nombre del parcial augmenta, ja que l'amplitud de cada parcial és en relació a la fórmula $A = \frac{1}{n^2}$ [83]. Llavors, multipliquem l'amplitud pel sinus corresponent. La *Taula 4.3* mostra cada una de les seves amplituds en relació amb el nombre del parcial.

Nº de parcial	Amplitud ($A= 1/n^2$).
1r parcial	1
2n parcial	0
3r parcial	1/9
4rt parcial	0
5è parcial	1/25
6è parcial	0
7è parcial	1/49
8è parcial	0
9è parcial	1/81
10è parcial	0

11è parcial	1/121
12è parcial	0
13è parcial	1/169
14è parcial	0
15è parcial	1/225
16è parcial	0
17è parcial	1/289
18è parcial	0
19è parcial	1/361
20è parcial	0

Taula 4.3. Taula que relaciona el parcial amb la seva amplitud, en el cas de l'ona triangular.

La Figura 4.20 mostra l'ona de la funció resultant dels 20 primers parcials.

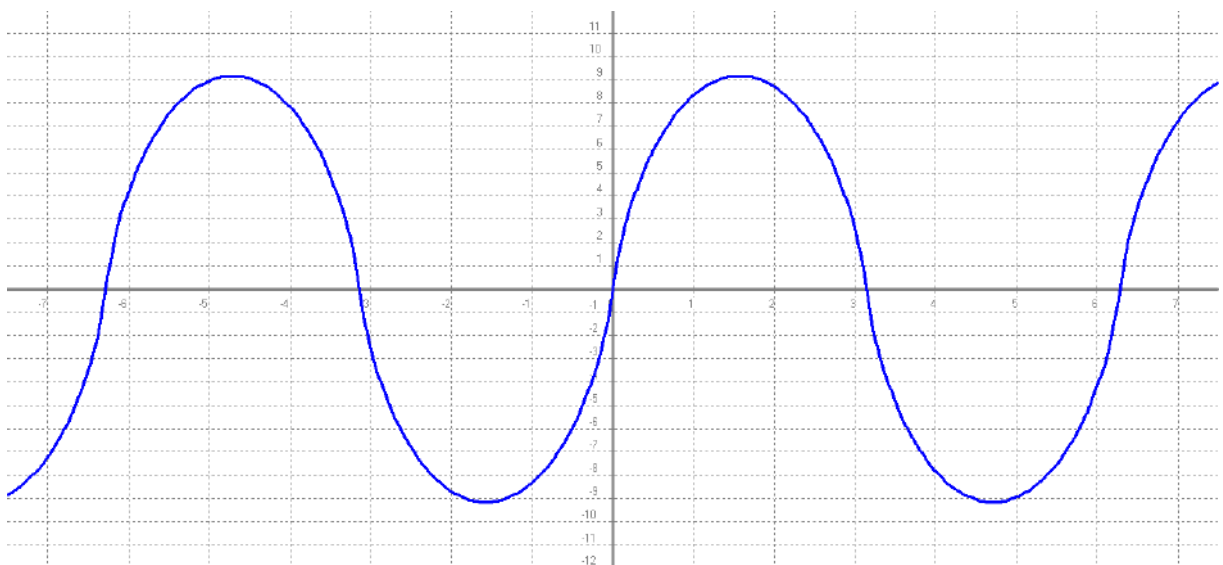


Figura 4.20: Representació final d'una ona triangular a partir de la suma de les seves ones sonores sinusoidals. (Font pròpia).

b) Envoltent ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release)

Com és evident, el so que produeix un instrument musical acústic no es manté indefinidament en el temps sinó que el volum i el contingut espectral canvia a través del temps [84]. Els dos paràmetres més importants per aquest fenomen són l'atac i el decaïment que tenen un gran efecte sobre les qualitats acústiques de l'instrument. És per això és molt important que els sintetitzadors tinguin un bon envoltent ADSR regit per quatre paràmetres:

1. *Temps d'atac (A)*: temps que triga el so d'anar des del valor inicial (quan es prem la tecla) fins al pic màxim.
2. *Temps de decaïment (D)*: temps intermedi entre el pic màxim i un nivell d'intensitat mitjà o de sosteniment.
3. *Temps de sosteniment (S)*: temps en què la seqüència del so es manté durant un període de temps concret. El temps de sosteniment dura fins al moment que es deixa de prémer.
4. *Temps d'alliberació (R)*: és el temps des que deixes de pressionar una tecla fins que el so queda esmorteït.

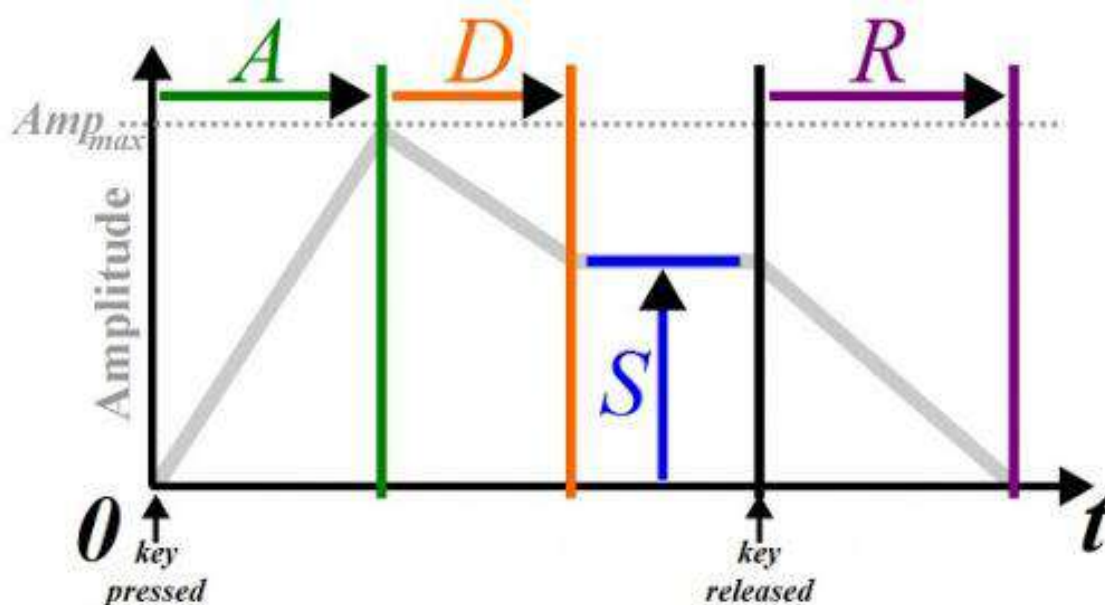


Figura 4.21: Representació gràfica de l'envoltent ADSR d'una nota (Font: referència bibliogràfica [68]).

c) Vocoder

Un vocoder és un instrument musical desenvolupat a la dècada dels trenta amb la finalitat de codificar la veu per a les comunicacions. El vocoder analitza i sintetitza la veu en el pla d'un altre instrument musical [85]. És important el fet de no confondre un vocoder amb l'*autotune*, ja que tot i ser d'efectes similars, tenen un procés molt diferent. En el primer cas el vocoder recull unes ones sonores - com podria ser una veu- en un micròfon i llavors aquestes ones són modificades de tal manera que produeixin exactament la freqüència que ha estat tocada. L'*autotune*, en canvi, és un quadre de diàleg on, un cop has gravat una veu apareix de tal manera que et pots fer una idea de la posició i el recorregut de la pista d'àudio gravada. Et dona l'opció de moure pistes i, per tant, crear notes que no hi havia, augmentar el vibrato o fer que la pista soni més robòtica, donant aquesta característica típica d'un nivell d'*autotune* exagerat que molts artistes dels 80 van establir com a estil.

Els vocoders físics es basen en un teclat en què es toquen les notes desitjades i un micròfon que recull la veu. Normalment els vocoders físics van molt relacionats amb els sintetitzadors, fent que aquests tinguin un vocoder incorporat [86].



Figura 4.22: Sintetitzador Korg MS2000B amb un vocoder incorporat. (Font: Korg).

Actualment el vocoder és molt utilitzat en la producció musical per tal de gravar les segones veus o veus de suport, ja que d'aquesta manera es graven concretament a les notes que se li demanen, fent que la melodia de suport sigui impecablement afinada i la veu principal aconsegueixi un so molt més envolvent i amb més força. Aquesta forta utilització del vocoder ha esdevingut en programes digitals.

Altrament, també trobem vocoders que consten d'un pedal analògic, com el "talkbox", amb un tub en el qual es registra la veu. Aquests pedals són molt utilitzats com a pedal complementari sobretot de guitarra elèctrica.



Figura 4.23: Pedal analògic "talkbox". (Font: Thomann).

Avui en dia, realment, es fan servir xarxes neuronals, ja sigui per música, per TTS -Text To Speech-... que fan els vocoders més reals i amb menys artefactes que els vocoders digitals més antics [87].

Com hem vist doncs, el vocoder ha estat un efecte molt utilitzat per tal de modular la veu. És un recurs molt utilitzat per molts artistes de ressò fan servir com Daft Punk, Giorgio Moroder o Will.i.am.

4.4. Implantació de la intel·ligència artificial a la música

L'augment del coneixement i les evolucions tecnològiques semblen no tenir límits i això ens porta a pensar en l'implementació d'algorismes de "deep learning" en el món de la música.

A continuació veurem diverses aplicacions reals en aquest sentit:

4.4.1. Magenta

Magenta és un projecte de Google on investigadors busquen noves maneres de crear música. Durant els últims anys Google s'ha centrat a desenvolupar nous

algoritmes per generar diversos efectes sonors, utilitzant els últims avenços en “deep learning”.

Una de les característiques principals de la intel·ligència artificial, relacionades amb el “deep learning”, és el continuat aprenentatge d'entendre patrons respecte dades d'entrenament per aconseguir un resultat final molt semblant al de l'ésser humà. Aquest és un dels projectes ambiciosos de Google amb el qual les possibilitats són infinites i molt diverses. És una prova de la direcció en què avança la tecnologia i que porta un ritme d'evolució imparabile [88].

Magenta porta actiu des d'inicis del 2016 i, des de llavors fins el dia d'avui, tota una sèrie de projectes molt interessants hi han estat publicats. Projectes com el *Differentiable Digital Signal Processing* (DDSP), un model que ha estat entrenat per tal de poder modificar qualsevol ona sonora, convertint-la en un instrument concret de les opcions que pots triar. Cada instrument correspon a un model concret i a més tens l'opció d'entrenar un model amb l'arquitectura de google per tal de crear-ne un de nou que, per exemple, aconseguixi el so d'un trombó de vares.

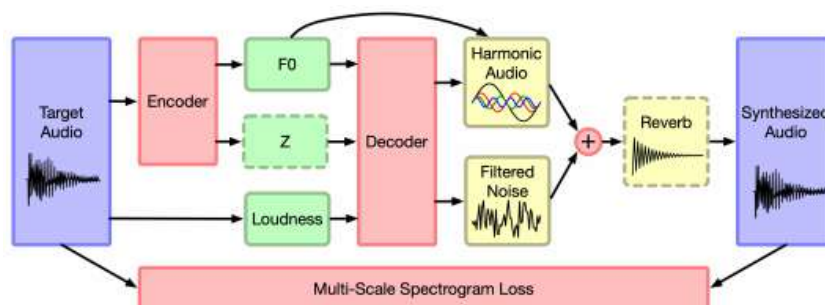


Figura 4.24: Esquema del funcionament del projecte “Differentiable Digital Signal Processing” de Magenta.

Altres projectes serien el *Music VAE*, que estudia l'estructura de la música o el *Music Transformer* que genera música a partir d'uns patrons que la intel·ligència artificial determina i els “còpia” per aconseguir una peça més llarga [89].

Aquests són només la punta de l'iceberg d'un nou món que, de ben segur, canviarà la música dels pròxims anys fent, fins i tot, que no puguem determinar si la cançó que escoltem l'ha escrit o interpretat un humà o una intel·ligència artificial.

4.4.2. Demucs

Demucs és una intel·ligència artificial creada per Alexandre Défossez l'any 2019. És a l'abast de tothom i es basa en la separació per pistes d'una cançó qualsevol.

El problema que vol resoldre *Demucs* és un que el nostre cervell ja aconsegueix resoldre. Com quan ens trobem en una habitació amb molta gent xerrant entre ells ens podem centrar només en una conversa concreta, també ho podem fer quan escoltem una cançó i ens volem concentrar a escoltar només un dels instruments per tal de conèixer la melodia o el ritme. Aquest procés és el que utilitza la intel·ligència *demucs* per tal de separar les pistes. Es coneix com a *Music Source Separation*.

La xarxa neuronal que utilitza *Demucs* per tal que funcioni el procés de separació s'anomena U-NET. Aquest tipus de xarxes funcionen de forma que a l'introduir una cançó, la comprimeix i la codifica per tal que després es pugui fer el procés contrari i descodificar-la de la forma desitjada. El fet de subministrar a la intel·ligència artificial moltes cançons a l'entrada i a la sortida crea una mena d'entrenament que fa que la xarxa U-NET conegui quins són els patrons per separar la cançó en les 4 pistes finals: bateria, baix, veu i altres. De fet, aquest tipus de xarxes neuronals són utilitzades en imatges, per exemple en cotxes automàtics, per tal de separar els diversos elements que hi apareixen. La diferència entre aquest tipus de xarxes i les que es basen en la separació de les pistes d'àudio és en la importància que té el temps, fet que va fer que Défossez adherços a l'arquitectura de la xarxa neuronal un nou mòdul especialitzat en dades temporals [90].

Aquesta intel·ligència artificial permet iniciar un nou camí en la tecnologia musical per satisfer tot de funcions diverses que passen des de conèixer les melodies d'instruments que queden en un segon pla un cop fet la mescla o, per exemple, poder extreure la bateria d'una cançó per tal de practicar-hi a sobre.

5. PART PRÀCTICA:

Desenvolupament d'un sintetitzador digital

La part pràctica del meu treball de Recerca consisteix en el desenvolupament d'un sintetitzador digital que es basés en una sèrie de funcions sinusoidals. Per tant, per poder realitzar tot aquest treball necessitava dos pilars fonamentals: per una banda tenir una bona base teòrica per entendre les característiques de les ones i, per l'altra tenir un mínim coneixement en desenvolupament de programes informàtics per tal de poder crear-ne un.

El primer pilar ja el tenia força consolidat, ja que l'havia pogut adquirir gràcies a l'aprenentatge al llarg de la part teòrica. Per tenir el segon pilar va ser molt important la tasca del meu tutor d'aquest treball, en Jordi Lagares, que em va ajudar des del primer moment explicant-me les eines bàsiques que em calia conèixer per a poder realitzar un programa informàtic. Els seus anys d'experiència en el tema i la seva bona manera d'ensenyar em van permetre, tot i no haver realitzat cap mena de programa informàtic abans, poder-ne crear un des de zero gràcies a una IDE com Lazarus.

5.1. Entorn Integrat de Desenvolupament (IDE)

Primer de tot, abans d'explicar el treball que vaig realitzar i els seus resultats, cal que expliqui les eines que vaig utilitzar, com és el cas de la *IDE (Entorn Integrat de Desenvolupament)*. Un entorn integrat de desenvolupament és una aplicació informàtica que ofereix un entorn amb serveis integrats que ajuden a facilitar la feina de desenvolupar un aplicatiu informàtic. És per això que normalment una IDE és simplement el punt de partida per anar construint el programa desitjat a través d'eines concretes -objectes ja predefinits-, un compilador -per crear l'executable- i un depurador -per veure els errors-. L'existència d'aplicacions com aquesta ha permès fer un gran pas endavant en el món de la programació, creant

un procés més intuïtiu que ha propiciat que més gent pugui realitzar el seu programa sense necessitat de tenir grans coneixements en el món de la informàtica [91].

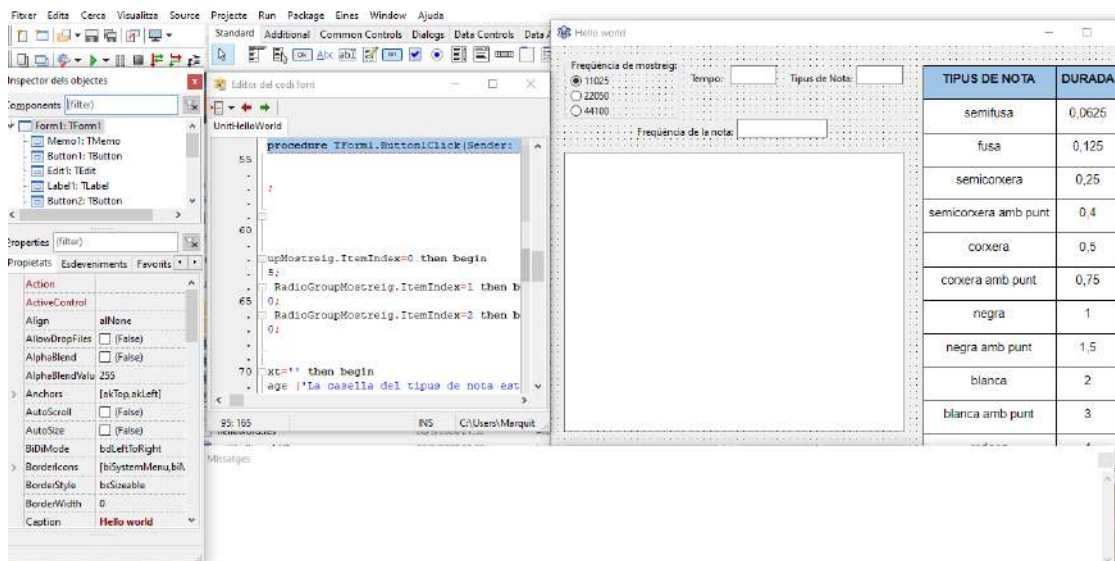


Figura 5.1: Pàgina principal de desenvolupament del programa "Lazarus". (Font pròpia).

5.2. Procés de desenvolupament

Tal com he comentat a la introducció d'aquest treball, el procés creatiu per realitzar la part pràctica va sorgir del programa "Música, Física y Matemáticas" (MFM) que et permet, entre altres coses, crear una ona sonora audible a partir d'una partitura textual on cada nombre representa la posició en què l'ona es troba en un moment determinat. A partir d'aquí la meua idea va ser anar jugant amb el so i desenvolupar un sintetitzador amb el qual poder generar so, amb l'ajuda del programa esmentat.

5.2.1. Versió 0

La versió 0 de la meua part pràctica de fet no va tenir lloc ni en un programa que havia creat jo, sinó que va ser en un altre segurament molt quotidià per a tots, tot i que sempre l'hem fet servir per moltes altres tasques diferents a les de sintetitzar música: Un full de càlcul. En aquest cas vaig fer servir el programa

“Excel” de Microsoft, ja que és el que més utilitzo, però realment ho hagués pogut fer amb qualsevol altre full de càlcul.

Tal com he explicat en el punta 4.3.1, l’amplitud d’una ona sonora ve definida per la seva fórmula. De fet, aquesta és la que vaig introduir a l’Excel per tal de determinar cada una de les imatges de la funció dependent del número de mostra.

Per tant, com es pot veure a la captura del procés de la *Figura 5.2*, vaig fer que la columna 1 fos el nombre de mostres desitjades. Com més mostres, més durava la nota. A la segona columna duia a terme l’operació i em beneficiava d’una propietat que et permet fer el full de càlcul per tal de repetir aquesta mateixa operació fins a la fila on demanis. Així les mostres es podien calcular molt més ràpidament que no pas mostra per mostra.

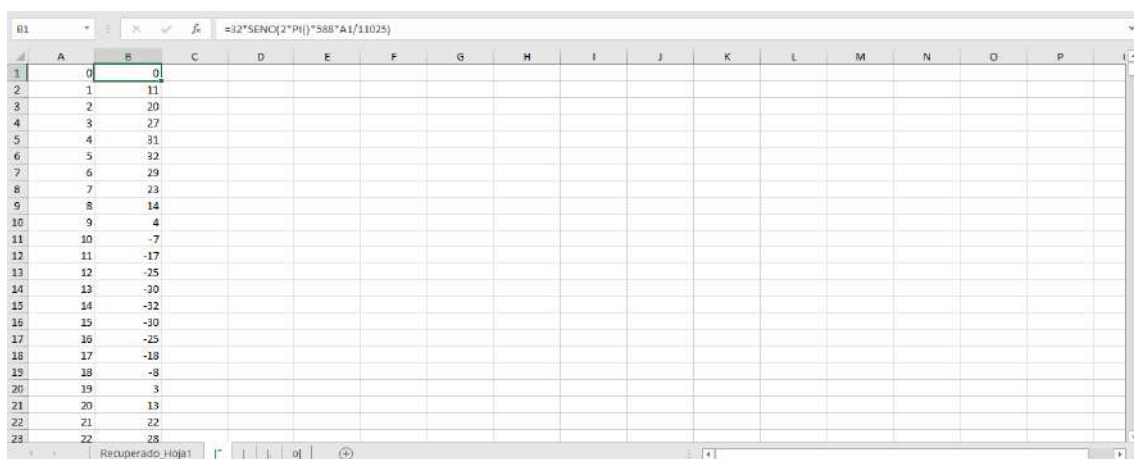


Figura 5.2: Captura de pantalla de la versió 0 que permet sintetitzar un so a partir de l’Excel. (Font pròpia).

Un cop vaig veure que aquest procés funcionava i que el programa MFM reproduïa la nota amb la freqüència que havia posat a la fórmula de l’Excel, vaig decidir fer un pas més. Vaig buscar una cançó amb una melodia bàsica i curta que em permetés poder-la crear a partir de les fórmules del full de càlcul. La cançó que vaig decidir triar va ser el mundialment conegut “Aniversari feliç”. Un cop triada la cançó vaig cercar a internet la partitura per tal de saber la durada, el tipus de notes i la freqüència de cada una. El problema amb el que em vaig trobar va ser que en aquell moment no sabia quina quantitat de mostres havia de fer per tal que, per exemple, el resultat fos una blanca. És per això que en

aquell moment vaig establir que una negra fossin 5000 mostres, ja que en provar-ho, havia vist que era una durada similar a una negra d'un tempo mitjà (≈ 90 bps). Per tant, si una negra eren 5000 mostres, una blanca era el doble i si volia fer una corxera era la meitat. Tenint tot això en compte vaig sintetitzar nota per nota tota la cançó amb la seva durada concreta i guardar cada una en un arxiu d'àudio .wav. Finalment a partir d'un software senzill d'àudio com "Reaper" que et serveix per editar pistes d'àudio i mesclar cançons, vaig unir totes les notes en el seu ordre concret, tenint en compte el que deia la partitura -Figura 5.3-.

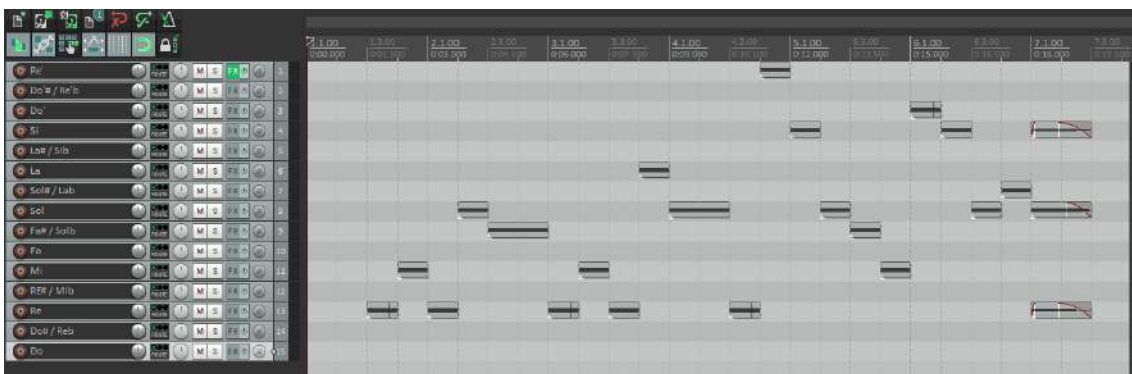


Figura 5.3: Captura de pantalla durant el procés de sintetització de la cançó "aniversari feliç" gràcies al software d'àudio "Reaper". (Font pròpia).

El resultat final d'aquesta prova va ser la primera cançó que vaig sintetitzar a partir d'una funció matemàtica tal com es pot veure al CD -annex- on podeu escoltar el resultat dins de la Carpeta "Happy Birthday Versió 0" a l'arxiu "Happybirthday-versió0.wav".

5.2.2. Versió 1

Tot i el bon resultat obtingut de la versió 0 del meu sintetitzador, hi havia un problema molt important que havia de solucionar d'alguna manera: el temps. En el cas de la versió 0 primer havia de fer un arxiu .wav per cada freqüència i cada durada i llavors havia d'ajuntar-ho molt fidelment a la partitura utilitzant un altre programa. Havia de buscar una manera de reduir el temps que trigava i com que no hi havia cap programa que fes exactament el que jo volia, vaig decidir crear el meu propi.

Amb tota aquesta teoria en ment i amb curiositat per aprendre més sobre el món de la informàtica, vaig començar a dissenyar un programa a partir de *Lazarus*, un entorn de desenvolupament (IDE). El punt a favor que em va fer decidir per aquest programa és que es basa en el llenguatge Pascal, un llenguatge de programació que, tot i que actualment es troba en desús funciona bé en un inici per aprendre. Tot i això, en Jordi Lagres em va ajudar de bon començament a entendre com fer anar un entorn de desenvolupament com el *Lazarus* i ensenyar-me els fonaments per tal de poder crear el meu propi programa des de zero i que aquest acabés en un sintetitzador digital.

El que vaig començar fent va ser un programa molt senzill i una mica arcaic que es basava en un botó i un marc de text i que només va ser un impàs per arribar a la primera versió. El programa sintetitza una nota de 440 heartz. Al pulsar el botó apareixen una sèrie de números al quadre de text i un cop el procés acaba, la sèrie de números resultants s'han de copiar al programa MFM per tal de poder escoltar com sona l'ona sonora, en aquest cas la de la 4a octava.

Seguidament, el que vaig fer va ser inserir un quadre de text que permetés decidir quina freqüència es vol sintetitzar. Aquesta primera variable em va obrir un munt de possibilitats amb les que podia realitzar tot de versions diverses més completes. Per altra banda em va fer adonar d'un aspecte que ha de tenir molt en compte un programador que desenvolupa un programa informàtic: la detecció i correcció d'errors. En termes generals, la detecció i correcció d'errors recopila totes les possibles coses que pot fer un usuari en utilitzar el programa i informar-lo amb una notificació en cas que algun dels passos no es faci bé. En aquest cas havia de vigilar que la casella de la freqüència no fos buida. D'aquesta manera, en cas d'haver-te despistat el programa t'informava de que hi havia la casella de freqüència buida.

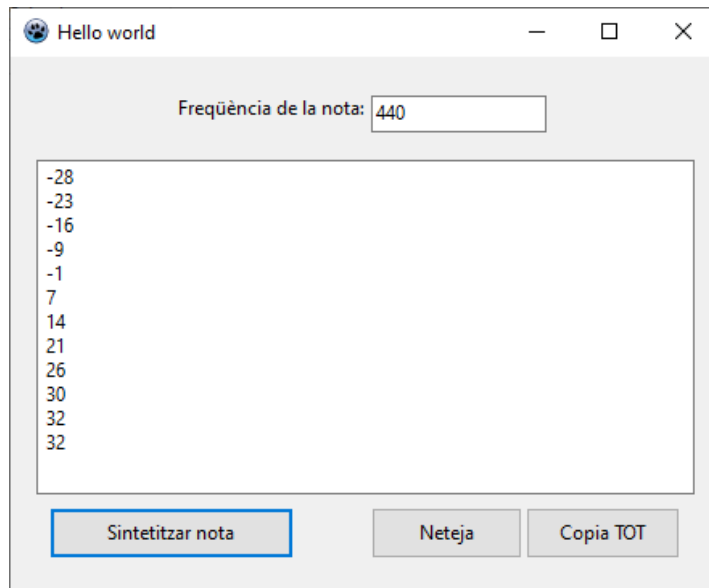


Figura 5.4: Captura de pantalla de la versió 1 que permet sintetitzar una ona d'una freqüència de durada constant. (Font pròpia).

Per tant en la versió 1 final, tal com podeu obrir en el CD (versió 1.0), veureu que a més d'aquesta casella hi ha 3 botons a la part inferior. El primer botó és el que s'ha de prémer un cop escollida la freqüència i és el que dona l'acció de sintetitzar l'ona. El botó central es pot utilitzar en cas que el programa ja hagi sintetitzat una ona per tal de netejar el quadre de text gran i així poder-ne sintetitzar una altre. Per últim, el botó de més a la dreta permet que un cop el programa hagi escrit tots els nombres de la funció que hem calculat al quadre de text gran, els copiï tots al porta-retalls. Per últim, com a la versió 0, hem d'enganxar totes les imatges de la funció al programa “*Música, Física y Matemáticas*” i així podrem escoltar l'ona calculada.

5.2.3. Versió 2

En aquesta versió el que vaig intentar millorar de la primera va ser que hi hagués més possibilitat de modulació i que amb el mateix programa es poguessin crear notes de durades diverses estudiant la durada d'una nota sintetitzada, és a dir el nombre de mostres que vols per tal de poder formar una blanca, una negra o una

semicorxera. Per fer aquesta operació el que vaig tenir en compte va ser la freqüència de mostreig, el tempo de la cançó i la durada de la nota.

Primer, hem de saber que el tempo d'una cançó (en aquest cas respecte la negra) ens marca quantes negres sonen en un minut. Vindria a ser l'equivalent als batecs del nostre cor, ja que també es mesuren en bpm. Per tant, per saber quants segons dura una negra, el que s'ha de fer és el quocient entre 60 segons (durada d'un minut) i el tempo de la cançó. Per exemple, en el cas que la cançó tingui un tempo de 120 voldrà dir que 0,5 segons són equivalents a una negra.

Seguidament, com hem comentat en el punt 4.2.1, la freqüència de mostreig és el nombre de mostres que s'agafen en un segon. Com més n'hi hagi, més acurat serà el so que es sintetitza. Per tant, després d'haver calculat quants segons dura una negra, ho multipliquem per la freqüència de mostreig. En cas que la freqüència de mostreig triada sigui 44100, voldrà dir que cada negra tindrà 22050 mostres.

Finalment, si sabem el nombre de mostres d'una negra podem fer el producte entre això i el tipus de nota desitjada. A la taula de la dreta podem veure la relació entre el tipus de nota i el nombre que l'associa.

Tenint això en ment, a la versió 2 del programa hi vaig inserir tres nous paràmetres que s'havien d'omplir abans de poder sintetitzar el so. El primer marca la freqüència de mostreig que vols, el segon el tempo de la cançó (segons la negra) i, per últim, el tercer marca el tipus de nota de la cançó s'havia d'escriure en forma de nombre gràcies a la taula de la dreta. Aquest augment de paràmetres editables per l'usuari que fa servir el programa em va

TIPUS DE NOTA	DURADA
semifusa	0,0625
fusa	0,125
semicorxera	0,25
semicorxera amb punt	0,4
corxera	0,5
corxera amb punt	0,75
negra	1
negra amb punt	1,5
blanca	2
blanca amb punt	3
rodona	4

fer tenir en compte més possibles errors per tal que el programa no es pengés i l'usuari pogués rectificar l'error. És important informar que a aquesta versió del programa s'ha de tenir en compte la freqüència de mostreig per tal que coincideixi la de l'ona sintetitzada amb la que s'utilitzi al programa MFM.

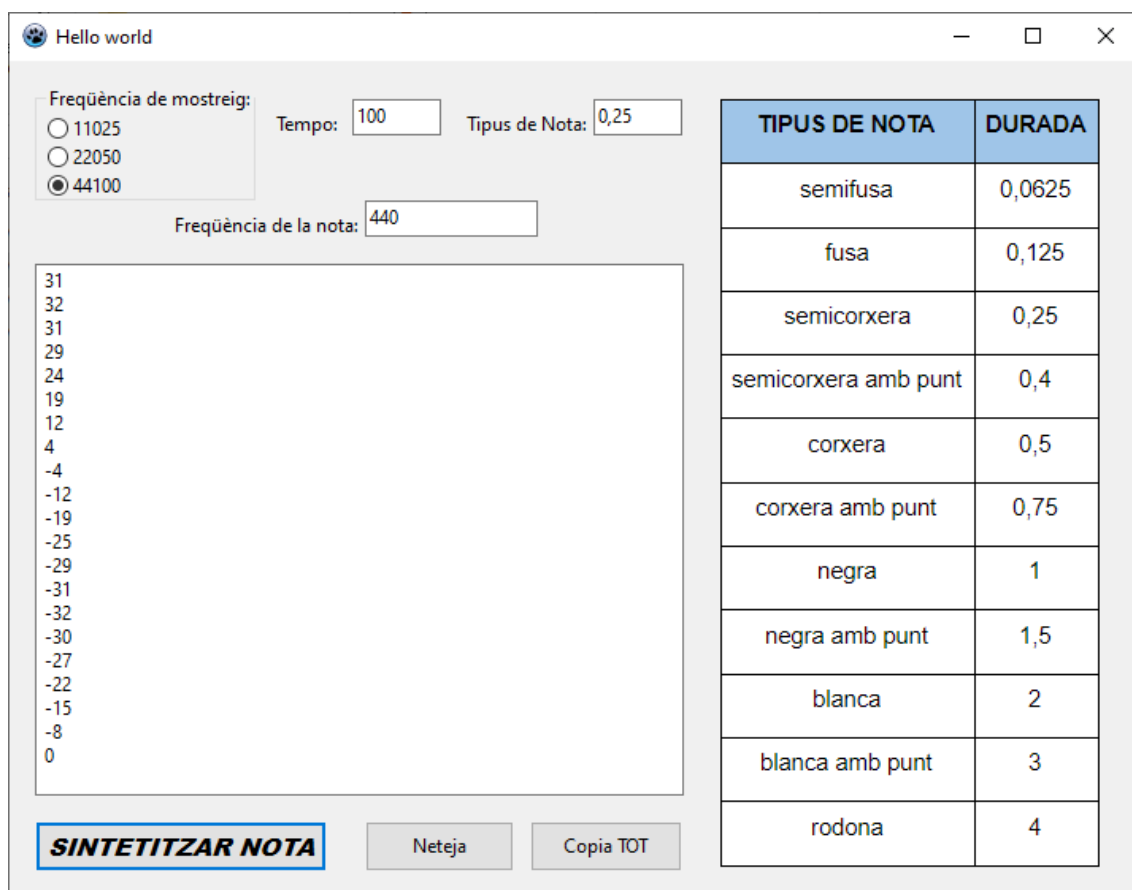


Figura 5.5: Captura de pantalla de la versió 2 que permet sintetitzar una ona d'una freqüència d'una durada triada prèviament. (Font pròpia).

Per tant, aquesta segona versió em permetia fer el que vaig fer a la versió de l'Excel però d'una forma molt més ràpida. Tot i això, encara hi havia moltes coses a millorar per poder sintetitzar una cançó en pocs segons.

5.2.4. Versió 3

A la 3 versió del programa és on, des del meu punt de vista, va tenir lloc el salt més important i amb el qual podreu veure al final que ens permetrà sintetitzar una cançó senzilla d'una d'una melodia monofònica com "aniversari feliç".

Bàsicament aquesta nova versió presentava una millora important, ara el programa contenia una graella de 4 columnes i diverses files. A la primera columna és on es posa la nota que vols sintetitzar i llavors, juntament amb la informació de l'octava a la qual pertany -que s'ha d'escriure a la segona columna- el programa relaciona cada nota i la seva octava concreta amb la seva freqüència. És important recalcar que la nota escrita que s'hi insereix és important que s'escriu en minúscules, ja que sinó el programa no funciona. A la tercera columna s'hi ha de posar l'amplitud que vols que tingui l'ona que sintetitzes -si és major de 500, la reproducció en el programa MFM s'haurà de fer amb 16 bits-. Per últim, a la quarta columna el que s'hi ha d'inserir és la durada de la nota que es vol sintetitzar. En aquest cas, igual que a la primera columna amb la nota, s'hi ha d'inserir el nom en minúscules i el programa accepta les durades de: fusa, semicorxera, corxera, corxera amb punt, negra, negra amb punt, blanca, blanca amb punt i rodona. També és important informar que a partir d'aquesta versió del programa s'hi pot inserir un silenci indicant-ho a la primera columna, tot i això s'hi ha de posar una octava i amplitud qualsevols i determinar la duració del silenci a la quarta columna.

En el cas de les files, tal com es pot intuir, cada una esdevé un nota diferent. Quan el programa acaba de calcular totes les mostres de la nota de la primera fila mira si a la segona fila s'hi ha introduït una nova nota o no. En cas afirmatiu, el programa el que fa és seguir calculant la següent funció just després de la primera i d'aquesta manera el programa MFM pot reproduir la cançó completa directament. En cas que a la segona fila no hi hagi cap nota, el programa no continua i acaba el seu càlcul.

A la part superior del programa hi ha dues opcions més de les quals ja havíem parlat a la versió anterior, per una banda la d'escollir la freqüència de mostreig i, per l'altra, el tempo de la cançó.

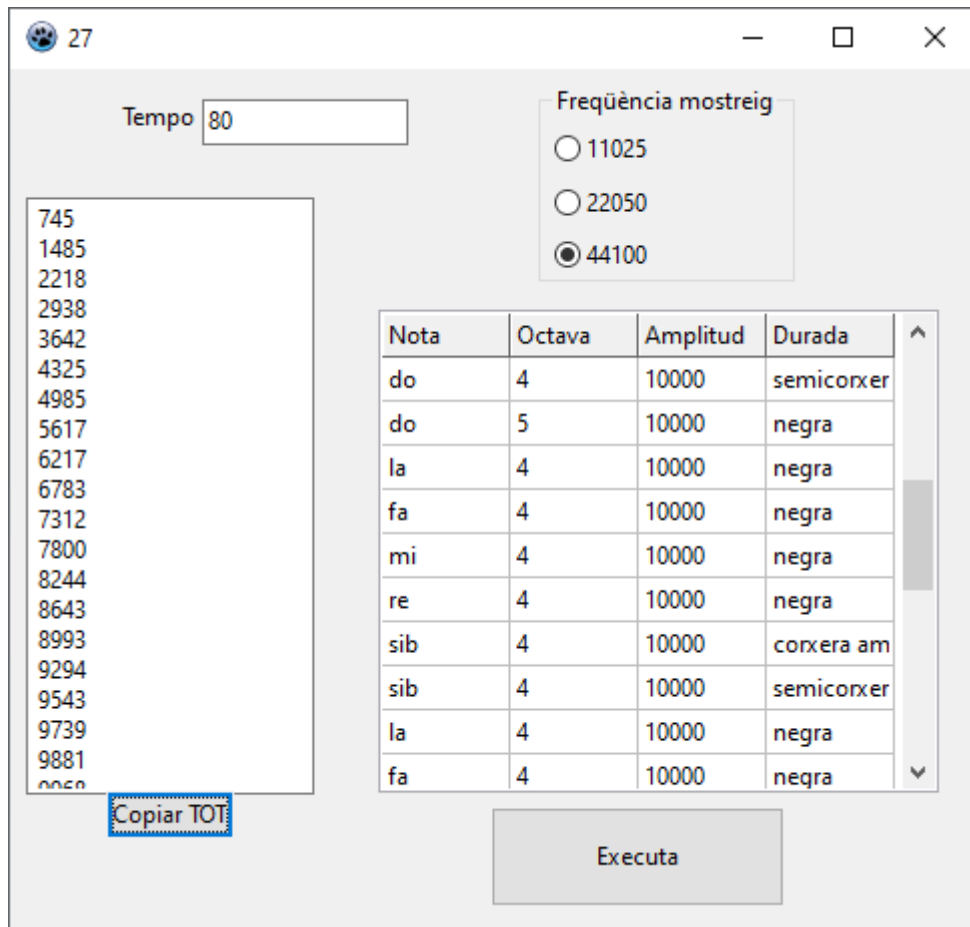


Figura 5.6: Captura de pantalla de la versió 3 que permet sintetitzar diverses notes amb una durada concreta. Amb aquesta versió es poden sintetitzar melodies monofòniques ràpidament. (Font pròpia).

Per tant, amb aquesta tercera versió ja podem sintetitzar la cançó d'*aniversari feliç* que havia fet en un inici i que havia trigat una tarda, a fer-ho en poc menys de 5 minuts (comptant la feina d'escriure les notes a la graella). Podem veure el resultat fet a partir d'aquesta versió al CD annex, a l'arxiu d'àudio "Happybirthday-versió3.wav".

5.2.5. Versió 4

Tot i haver aconseguit una de les meves metes personals de quan vaig iniciar el procés de la part pràctica, reduir el temps necessari per dur a terme el procés de sintetització d'una cançó monofònica, vaig decidir no quedar-me aquí. El que volia fer ara era modificar el programa per tal d'anar més enllà i que pogués produir cançons polifòniques que oferissin riquesa musical i permetessin crear cançons més completes.

Per això, el que vaig fer va ser augmentar la graella i donar capacitat per a cinc notes que poden sonar de forma simultània, ja que el que fa el programa és sumar la funció de l'ona sonora de cada una de les notes. Per aquesta versió em va caldre molt més estudi de cares a erradicar tots els possibles errors que podia fer qualsevol persona en utilitzar el programa.

Gràcies a aquesta polifonia vaig poder aconseguir sintetitzar sons com el de l'arxiu d'àudio "Riverflowsinyou-versió4,1.wav" que trobareu al CD.

Finalment, amb la part teòrica feta i l'estudi fet de les ones sonores típiques d'un sintetitzador explicades al punt 4.3.1, vaig poder donar una volta més a la quarta versió del meu sintetitzador digital afegint diverses opcions tímbriques per l'ona que es vol sintetitzar. D'aquesta manera, la versió 4 del programa et permet triar entre: una ona sinusoidal, de dent de serra, quadrada o triangular. Altrament, a més de poder triar entre les 4 opcions d'ona sonora, hi ha una opció del programa que et crea un atac i una atenuació a l'ona sonora que fa que el so sintetitzat sigui més similar al que podem aconseguir de manera natural, ja que les ones sonores òbviament no són infinites en el temps i per tant sofreixen un procés que fa que el volum de l'ona disminueix fins a quedar esmorteït. Aquest procés vist en el gràfic de la *Figura 5.7* es basa en un període curt d'atac, on l'amplitud del so s'incrementa ràpidament fins arribar al seu màxim en poques mil·lèsimes de segon i una segona part molt més llarga on l'amplitud va disminuint fins a acabar essent inexistent.

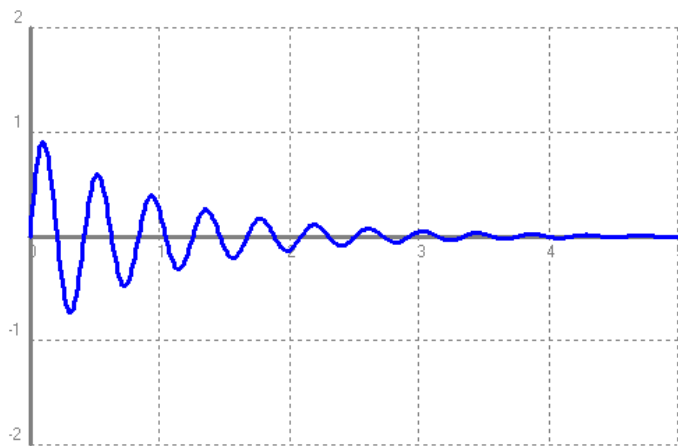


Figura 5.7: Representació gràfica d'una ona amb atac i atenuació. (Font pròpia).

La fórmula que vaig seguir per crear aquest atac i atenuació es va basar en una funció exponencial negativa. En aquest cas, si analitzem la fórmula veiem que cada vegada que el nombre de mostres del dividend és igual que el divisor o múltiple, el resultat es divideix en 2, 4, 6 etc. D'aquesta manera, cada vegada que el nombre de mostres va augmentant, el resultat de la funció va disminuint.

Aquí vaig crear dos tipus diferents d'atac i atenuació del so. Al tipus 1 la fórmula del dividend de l'exponent varia segons la durada de la nota, d'aquesta manera com més petita sigui la durada de la nota més ràpida serà l'atenuació del so -. Imitava el possible recorregut que podria tenir una nota tocada al piano, com menor sigui la durada, més ràpid treuràs el dit de la tecla -*Fórmula 5.1*-. Per altra banda, al tipus 2 d'atac i atenuació el dividend de l'exponent és sempre igual (4000), indiferentment de la durada de la nota. En aquest cas doncs, a cada múltiple de 4000 l'ona disminuirà a la meitat, a la quarta part, a la sisena, etc. D'aquesta manera el so obtingut és més similar al que podem obtenir en instruments com una guitarra, on tot i que una durada d'una nota concreta sigui curta, el temps que triga una nota a quedar esmorteïda és el mateix que per una altra -*Fórmula 5.2*-. Tenint aquesta fórmula en compte podem fer que un so que podia arribar a ser robòtic i molest, s'apropi més a aquest efecte físic d'atac i atenuació que es produeix quan s'escolta un so.

$$\text{Tipus 1}(x) = (A \cdot \sin(x) \cdot n^{\circ} \text{ mostres}) \cdot 2^{\frac{-n^{\circ} \text{ mostres}}{h}}$$

Fórmula 5.1: Fórmula que defineix l'atac i decaïment del tipus 1.

$$\text{Tipus 2}(x) = (A \cdot \sin(x) \cdot n^{\circ} \text{ mostres}) \cdot 2^{\frac{-n^{\circ} \text{ mostres}}{4000}}$$

Fórmula 5.2: Fórmula que defineix l'atac i decaïment del tipus 2.



Figura 5.7: Captura de pantalla de la versió final 4 del meu programa informàtic. (Font Pròpia).

Tot i poder semblar que aquesta versió va ser la més ràpida de realitzar és la que he anat detallant més i tot i haver-hi una versió posterior, la considero la versió final del meu Treball de Recerca. És la que permet crear melodies més riques i decidir les característiques tímbriques de l'ona que es vol sintetitzar. Amb aquesta versió vaig aconseguir sintetitzar dues cançons conegudes com són La cançó principal del videojoc "Super Mario Bros" i "River Flows In You" de Yiruma amb les diverses opcions tímbriques que ofereix la versió 4, perquè pugueu observar la diferència respecte a la versió anterior. Per escoltar-les heu d'anar al CD annex a aquest treball, a la carpeta "Super Mario Bros Versió 4" i "River Flows In You Versió 4".

5.2.6. Versió 5

Finalment, la cinquena versió va resoldre un problema que havia tingut el meu programa des de la primera versió. Aquest problema era el fet que no és possible desar la feina feta per tal de reobrir-la més tard i continuar. Calia sintetitzar una cançó completa sense poder tancar el programa.

Per a aquesta versió vaig ometre tot tipus de caselles i ho vaig concentrar tot al quadre de text, fet que em permetia desar-lo en format .txt i obrir-lo de nou quan el necessités. En aquest cas la freqüència de mostreig ja ve regida pel programa (44100 Hz), però l'usuari pot modificar el tipus d'ona, l'amplitud i el tempo de la cançó. A cada fila s'hi havia d'inserir una informació determinada pel programa i en aquest cas, a la fila 1 s'hi ha d'indicar quin tipus d'ona o característiques tímbriques volies que tingués l'ona (taula x), a la fila 2 s'hi insereix l'amplitud de totes les notes de la melodia, a la fila 3 s'hi ha d'introduir el tempo (respecte la negra) de la peça que es vol sintetitzar; finalment a partir de la fila 4 s'hi escriu la nota, l'octava i la durada. Per tant, a partir de la quarta, cada fila pertany a una nota diferent i el programa el que fa és calcular de forma seguida la funció d'ona de cada una de les notes i quan les té totes calculades copia els resultats al quadre de text inferior. Aleshores el procés que s'ha de fer és el que ja fèiem a les versions anteriors, és a dir, copiar totes les mostres i enganxar-les al programa MFM.

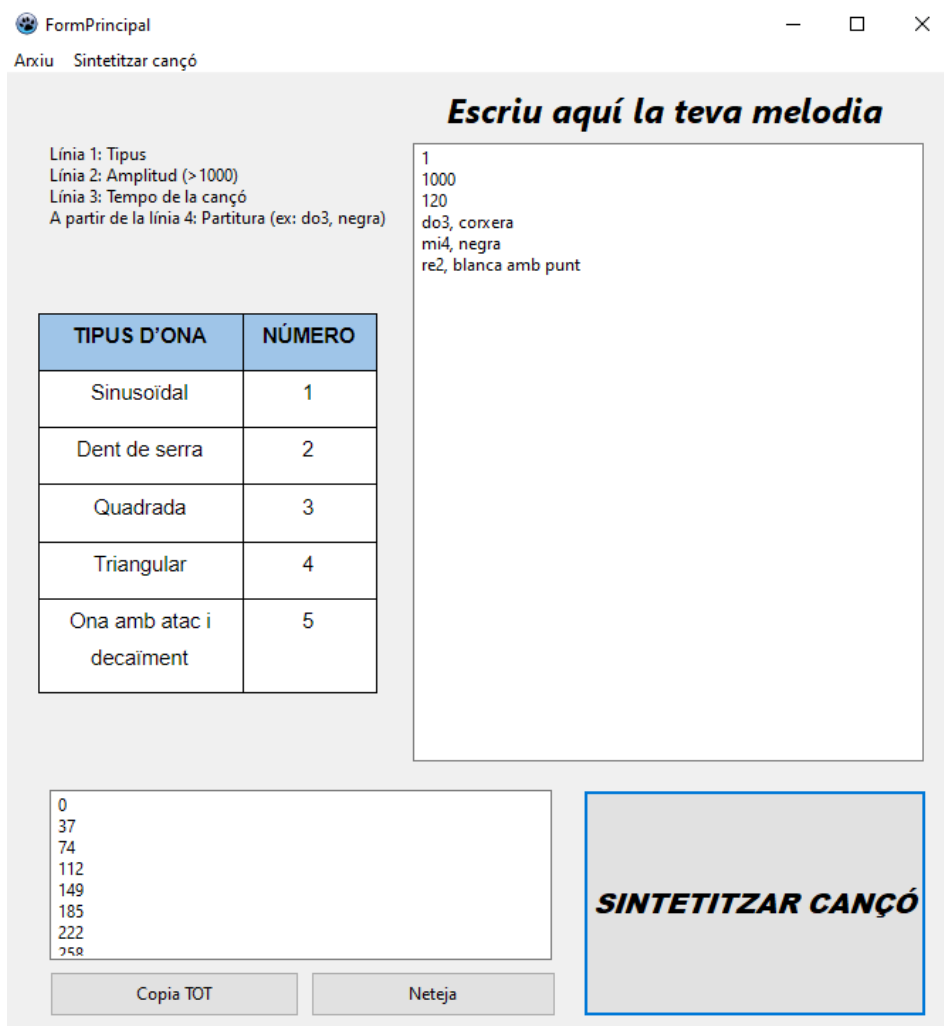


Figura 5.8: Captura de pantalla de la versió final 5 del meu programa informàtic. (Font Pròpia).

Tot i aquestes millores fetes al programa, les possibilitats que t'ofereix aquesta versió respecte a l'anterior van disminuir, ja que no es podien realitzar polifonies. El fet de gestionar la informació del quadre de text de manera que cada fila indiqués una informació concreta em va requerir haver d'aprendre un seguit de conceptes nous sobre la programació de la mà d'en Jordi Lagares. Tanmateix, l'aprenentatge que em calia per desenvolupar polifonies i el temps limitat que et marca l'entrega d'aquest propi treball em van fer decidir acabar aquí les meves versions. Per tant, tot i que aquesta és l'última versió feta del meu sintetitzador digital, la versió anterior permet fer polifonies i és més completa, l'únic inconvenient que presenta és que no es pot guardar el treball que has realitzat.

6. CONCLUSIONS

“Jordi, i això per què serveix?”, si aquell dia aquella alumna no hagués preguntat això, el més probable és que avui us estaria presentant un treball totalment diferent del que us he presentat. Aquella pregunta no va suposar només el principi de moltes pàgines, sinó un aprenentatge i un creixement personal que es van anar convertint amb tot el que heu pogut llegir fins ara.

Ha passat un any des de llavors, un any intens amb molts moments d'estrès que m'han fet veure que amb superació i esforç puc aconseguir tots els reptes que em proposi. A més, com tots sabem, aquest darrer any s'ha vist marcat per una pandèmia global i el nostre confinament. Però, si es tracta de veure el got mig ple, vaig afrontar la situació com una oportunitat a l'hora d'organitzar el meu treball i treure el màxim rendiment dels mesos que ens vam passar tots tancats a casa. En el meu cas el confinament em va servir per disposar de més temps per poder dedicar al meu treball de recerca.

A la introducció del treball em marcava l'objectiu d'intentar entendre i saber explicar com es forma la música a través de conèixer les fórmules matemàtiques amb les quals es forma el so. I, humilment, crec que l'he aconseguit perquè no m'he limitat només a explicar-ho des d'un vessant teòric, sinó que també he utilitzat tots aquests coneixements pel desenvolupament d'un programa que utilitza aquestes fórmules matemàtiques per sintetitzar sons diversos. Ara em trobo aquí, en aquestes últimes línies, defensant un treball del qual em sento orgullós. En tot moment, he intentat fer un treball que tothom pogués entendre - independentment dels seus coneixements matemàtics, físics o tecnològics-. Crec que he aconseguit poder explicar com les matemàtiques són molt més que nombres i ens expliquen moltes de les coses que ens envolten, coses tan senzilles i quotidianes com la música.

Tot i això, arribar aquí no ha estat un camí fàcil. Al llarg del treball m'he trobat amb dificultats que moltes vegades m'han fet replantejar si anava pel bon camí,

però la meua curiositat i les ganes d'aprendre més coses sobre el tema em van esperonar a seguir endavant. Algunes de les dificultats que m'he trobat, per exemple, han sigut com explicar un tema que sovint a mi mateix em costava d'entendre. Ho he intentat fer el millor que he pogut perquè fos el més entenedor possible, i espero que ho hàgiu pogut comprendre de la millor manera. Una altra de les dificultats amb les quals m'he trobat ha estat haver de crear un programa des de zero, inicialment amb uns coneixements molt limitats, i haver de demanar ajuda al meu tutor en ple confinament, quan les comunicacions ja eren complicades de per si.

Tot i que una part important del temps que he dedicat a aquest treball ha sigut a la meua recerca documental i a la síntesi de les fonts consultades a la part teòrica, del que estic més orgullós és de la part pràctica. I no només per ser la part del treball que em sento més pròpia, sinó perquè he aconseguit assolir, i fins i tot superar, l'objectiu que m'havia proposat, arribant molt més lluny del que en un inici m'hauria pogut imaginar. A les darreres versions he aconseguit un sintetitzador capaç de generar ones sonores de diferents veus que permeten que diverses melodies puguin sonar alhora. A més, actualment també disposen de tota una sèrie de variables que permeten modificar el so, de manera que l'usuari pot decidir-ne les característiques fent variar l'ona sonora. Jo m'hauria pogut conformar amb alguna de les primeres versions del programa en què el meu objectiu estava més que resolt, però a mesura que he anat adquirint coneixements, la meua curiositat m'ha empès a desenvolupar versions millorades.

Però si una cosa tinc clara, és que això no es pot quedar aquí. Reconec que amb més temps i amb més coneixements hagués pogut arribar més lluny. Per això no descarto que en un futur pugui ampliar aquest treball i crear noves versions de la part pràctica. Perquè lluny de desanimar-me, aquests mesos han servit per adonar-me que és un tema que m'apassiona i que encara avui dia em continua creant curiositat. I he constatat que, de fet, la curiositat és directament proporcional al coneixement adquirit.

Començàvem aquest treball preguntant-nos el perquè de moltes coses, i intentant resoldre-ho, m'he acabat preguntat el perquè de moltes altres. Però com deia el gran científic del segle XX, Albert Einstein:

“L’important és no deixar de fer-se preguntes.”

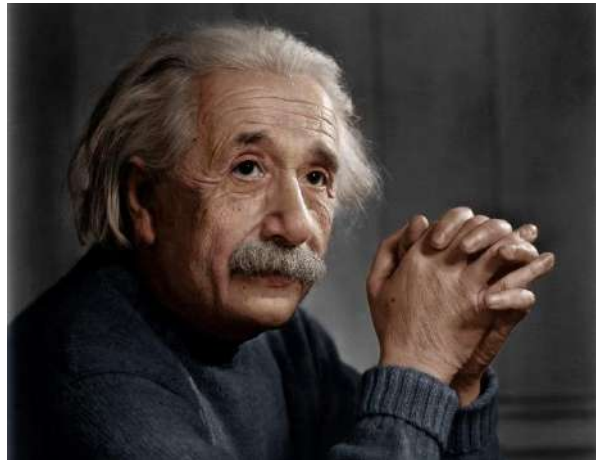


Figura 6.1: Il·lustració del científic Albert Einstein. (Font: Hipertextual).

7. Agraïments

Ja per acabar, i quan només em queda adjutar tota la bibliografia, m'agradaria dedicar aquesta pàgina del treball a agraïr a totes aquelles persones que han fet possible aquest treball. També m'agradaria fer una menció especial a la meva família i al meu tutor, en Jordi Lagares, que durant aquests mesos m'han ajudat tant i m'han donat el suport i les idees necessàries per tirar aquest treball endavant.

8. Bibliografia

- [1] S. Macip, «Per què ens agrada tant la música?,» *Diari Ara*, 05 Abril 2019.
- [2] H. Schiffman, *La Percepción Sensorial*, Mèxic: Limusa, 2001.
- [3] V. Román, «Va de Ciència,» 29 Maig 2011. [En línea]. Available: <http://vdciencia.blogspot.com/2011/03/velocitat-de-propagacio-del-so.html>. [Último acceso: 21 febrer 2020].
- [4] D. Maggiolo, «Escuela Universitaria de Música,» [En línea]. Available: <https://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/prp.html>. [Último acceso: 21 febrer 2020].
- [5] «Diferenciador,» [En línea]. Available: <https://www.diferenciador.com/diferencia-entre-sonido-y-ruido/>. [Último acceso: 22 febrer 2020].
- [6] «Volver a Escuchar,» [En línea]. Available: <https://www.volveraescuchar.com/general/la-diferencia-entre-ruido-y-sonido/>. [Último acceso: 25 febrer 2020].
- [7] D. Álvarez, «Medium,» 12 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.volveraescuchar.com/general/la-diferencia-entre-ruido-y-sonido/>. [Último acceso: 1 març 2020].
- [8] Rodrigo, «Despertar Sabiendo,» 18 juny 2019. [En línea]. Available: <https://www.despertarsabiendo.com/musica/la-partitura-mas-antigua-de-la-historia/>. [Último acceso: 1 març 2020].
- [9] C. Darwin, *El origen del hombre*, Barcelona: Grupo Planeta, 2009.
- [10] Lara, «Superprof,» 19 maig 2017. [En línea]. Available: <https://www.superprof.es/blog/chino-lengua-con-tonos/>. [Último acceso: 23 març 2020].
- [11] N. L. Wallin, *The origins of music*, Massachussets: MIT Press, 2000.
- [12] «CEIPSO Maestro Rodrigo,» [En línea]. Available: <http://www.ceipsomaestrorodrigo.com/el-origen-de-la-musica-en-la-prehistoria-2/>. [Último acceso: 6 març 2020].
- [13] S. M. Villar, «L'es muc digital,» [En línea]. Available: http://www.esmuc.cat/esmuc_digital/Esmuc-digital/Revistes/Numero-13-deseembre-2012/Espai-de-recerca2/Por-que-nos-gusta-la-musica. [Último acceso: 7 març 2020].
- [14] «Significados,» [En línea]. Available: <https://www.encyclopedia.cat/ec-gdlc-e00072487.xml>. [Último acceso: 7 març 2020].

- [15] «Parèntesis,» 28 octubre 2014. [En línea]. Available: <https://www.parentesi-ep.com/2014/10/28/qu%C3%A8-%C3%A9s-la-musicoter%C3%A0pia/>. [Último acceso: 8 març 2020].
- [16] «Atès a Casa,» [En línea]. Available: <https://ayudaadomiciliovalencia.info/beneficios-de-la-musicoterapia/>. [Último acceso: 7 març 2020].
- [17] C. Ulbricht, «Psychology today,» 21 juny 2013. [En línea]. Available: <https://www.psychologytoday.com/intl/blog/natural-standard/201306/music-therapy-health-and-wellness>. [Último acceso: 6 març 2020].
- [18] A. Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Ediciones UPC, 1998.
- [19] «Khan Academy,» [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/computing/computer-programming/programming-natural-simulations/programming-oscillations/a/oscillation-amplitude-and-period>. [Último acceso: 13 març 2020].
- [20] J. R. Pierce, Los sonidos de la musica, Barcelona: Scientific American Books, 1985.
- [21] «Audio social,» 14 gener 2013. [En línea]. Available: <https://www.audiosocial.es/2013/01/14/caracteristiques-del-so-la-frequecia/>. [Último acceso: 13 març 2020].
- [22] «Enciclopèdia.cat,» [En línea]. Available: <https://www.enciclopedia.cat/ec-gec-0192031.xml>. [Último acceso: 13 març 2020].
- [23] M. Bruch, «Tecnologia de la comunicació,» 2010. [En línea]. Available: <http://peprifa.cat/arees/tcn4/10-11/comunic/bruch/ones.htm>. [Último acceso: 14 març 2020].
- [24] P. Rodríguez, «Xataka,» 31 gener 2013. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/audio/auriculares-con-cancelacion-activa-del-ruido-como-funcionan-ventajas-e-inconvenientes>. [Último acceso: 20 març 2020].
- [25] «Música y sonido,» [En línea]. Available: <https://musicaysonido.es/2019/04/25/altura-musical/>. [Último acceso: 21 març 2020].
- [26] M. Morell, «Viaje al mundo de la audición,» 06 juny 2018. [En línea]. Available: <http://www.cochlea.org/es/sonidos/campo-auditivo-humano>. [Último acceso: 22 març 2020].
- [27] «Planeta musik,» 30 11 2017. [En línea]. Available: <https://planetamusik.com/blog/frecuencia-timbre-duracion-e-intensidad-cualidades-del-sonido/>. [Último acceso: 24 març 2020].
- [28] «Universidad politécnica del País Vasco,» [En línea]. Available: <http://www.ehu.eus/acustica/bachillerato/casoes/casoes.html>. [Último acceso: 25 març 2020].

- [29] «Db electronics,» [En línea]. Available: <https://www.dbelectronics.es/intensidad-del-sonido-en-decibelios/>. [Último acceso: 25 març 2020].
- [30] «Melómanos,» [En línea]. Available: <http://www.melomanos.com/la-musica/lenguaje-musical/las-cualidades-del-sonido/el-timbre/>. [Último acceso: 26 març 2020].
- [31] A. Vila, « Les web d'Albert Vila,» [En línea]. Available: <https://albertvila.cat/teoria-escales-musicals/teoria-escales-musicals-harmonics-timbre.htm>. [Último acceso: 26 març 2020].
- [32] «Fisic,» [En línea]. Available: <https://www.fisic.ch/contenidos/ondas-y-sonido/ondas-estacionarias/>. [Último acceso: 26 març 2020].
- [33] «OpenCourseWare Universitat Politècnica de Catalunya,» [En línea]. Available: https://ocw.upc.edu/webs/42254/Acustica_ES/Bloc3/Tema11/Fitxes/T11_02_O_e_en_membranes.htm. [Último acceso: 28 març 2020].
- [34] «Universidad del País Vasco,» [En línea]. Available: <http://www.ehu.eus/acustica/espanol/musica/inpees/inpees.html>. [Último acceso: 25 abril 2020].
- [35] «La vitalidad del cambio,» 10 novembre 2016. [En línea]. Available: <https://lavitalidaddelcambio.wordpress.com/2016/11/10/placas-de-chladni/>. [Último acceso: 28 març 2020].
- [36] N. Euler, «Musiki,» [En línea]. Available: <http://musiki.org.ar/Resonancia>. [Último acceso: 30 març 2020].
- [37] C. S. Fernández, «Patología + Rehabilitación + Construcción,» [En línea]. Available: <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/01/colapsos-estructurales-historicos-parte-3-del-ano-1500-al-1831/>. [Último acceso: 30 març 2020].
- [38] «Acústica integral,» 09 novembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.acusticaintegral.com/reverberacion.htm>. [Último acceso: 30 març 2020].
- [39] «Wikisofia,» 09 octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.wikisofia.cat/wiki/Autor:Pit%C3%A0gores>. [Último acceso: 25 abril 2020].
- [40] «Unidad de cultura científica,» 10 febrer 2014. [En línea]. Available: <http://divulgauned.es/pitagoras/>. [Último acceso: 25 abril 2020].
- [41] «Origen de la filosofia IES Baix Montseny,» [En línea]. Available: <https://blocs.xtec.cat/histfilosofiaiesbaixmontseny/quant-a/pitagorics/>. [Último acceso: 26 abril 2020].
- [42] «MideBien,» 31 agost 2020. [En línea]. Available: <https://midebien.com/pitagoras-y-su-escala-musical/>. [Último acceso: 26 abril 2020].
- [43] L. F. F. Simón, «Luis F F Simón,» 15 novembre 2017. [En línea]. Available: https://courses.lumenlearning.com/musicappreciation_with_theory/chapter/pythagoras/. [Último acceso: 30 abril 2020].

- [44] M. d. León, «Madridmasd,» 1 abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.madrimasd.org/blogs/maticas/2016/04/01/140934>. [Último acceso: 28 abril 2020].
- [45] «Lumen,» [En línea]. Available: https://courses.lumenlearning.com/musicappreciation_with_theory/chapter/pythagoras/. [Último acceso: 28 abril 2020].
- [46] Jámblico, *Vida Pitagórica*, Madrid: Gredos, 2003.
- [47] P. M. González, «DivulgaMAT,» [En línea]. Available: <https://virtual.uptc.edu.co/ova/estadistica/docs/autores/pag/mat/Pitagoras9.asp.htm>. [Último acceso: 30 abril 2020].
- [48] M. Senabre, «Rincón musicológico,» 28 maig 2018. [En línea]. Available: <https://musicologiaempirica.wordpress.com/2018/05/28/breve-historia-de-los-sistemas-de-afinacion/>. [Último acceso: 1 maig 2020].
- [49] «Aportación sobre la Escala diatónica,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/miescdiatonic/trabajo/4-2-como-encontramos-la-escala-diatonica>. [Último acceso: 1 maig 2020].
- [50] J. G. Illa, «La justa entonación,» [En línea]. Available: <http://www.justaentonacion.com/teoria/teoria.htm>. [Último acceso: 20 juny 2020].
- [51] P. R. Reyes, *La harmónica de Claudio Ptolomeo*, Murcia: Universidad de Murcia, 2003.
- [52] Á. G. Morán, «Terraantiquae,» 20 juny 2014. [En línea]. Available: <https://terraantiquae.com/m/blogpost?id=2043782%3ABlogPost%3A317460>. [Último acceso: 20 juliol 2020].
- [53] «Clasesdeguitarra com,» 15 juny 2020. [En línea]. Available: <https://clasesdeguitarra.com.co/cambio-de-tono/>. [Último acceso: 29 juliol 2020].
- [54] B. Reitman, «Medium,» 30 juny 2019. [En línea]. Available: <https://medium.com/@borisreitman/problems-with-ancient-musical-scales-272217ca0d27>. [Último acceso: 2 agost 2020].
- [55] «Physics of Music - notes,» [En línea]. Available: <https://pages.mtu.edu/~suits/scales.html>. [Último acceso: agost 2 2020].
- [56] «Geometría sagrada,» [En línea]. Available: <http://www.sacred-geometry.es/?q=es/content/proporci%C3%B3n-en-las-escalas-musicales#5>. [Último acceso: 12 juny 2020].
- [57] «Sinc ciencias,» 14 desembre 2009. [En línea]. Available: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-ritmo-musical-y-el-algoritmo-de-Euclides-están-emparejados>. [Último acceso: 15 juny 2020].

- [58] M. Ruiza, «Biografías y vidas,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/e/euclides.htm>. [Último acceso: 6 agost 2020].
- [59] «Khan Academy,» [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/computing/computer-science/cryptography/modarithmetic/a/the-euclidean-algorithm>. [Último acceso: 15 juny 2020].
- [60] P. Gómez, «Web de Paco Gómez,» [En línea]. Available: <http://webpgomez.com/artes/musica-y-ciencia/384-si-euclides-lo-supiese-se-sentiria-orgullosa>. [Último acceso: 16 juny 2020].
- [61] «Universidad del País Vasco,» [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/fourier/Fourier.html>. [Último acceso: 30 juny 2020].
- [62] M. Isaurralde, 27 desembre 2019. [En línea]. Available: <https://medium.com/@matinsaurralde4/la-transformada-de-fourier-en-el-d%C3%ADa-a-d%C3%ADa-11e4b1726021>. [Último acceso: 15 juny 2020].
- [63] «Fourier transform,» [En línea]. Available: <http://www.thefouriertransform.com/#introduction>. [Último acceso: 20 juny 2020].
- [64] «20 minutos,» 18 agost 2020. [En línea]. Available: <https://www.20minutos.es/noticia/4354916/0/lista-grandes-inventos-siglo-xix/>. [Último acceso: 25 agost 2020].
- [65] W. L. Welch, From tinfoil to stereo : the acoustic years of the recording industry, Florida: Gainesville, 1994.
- [66] N. Serrano, «La increíble historia de la primera grabación musical,» *ABC*, 07 novembre 2016.
- [67] G. Navarrete, «Hispanonic,» 14 novembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.hispasonic.com/blogs/breve-historia-grabacion/39879>. [Último acceso: 8 juliol 2020].
- [68] «El economista,» 07 abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.economistaamerica.cl/sociedad-eAm-chile/noticias/7475527/04/16/El-boom-del-Streaming-la-nueva-forma-de-consumir-musica.html>. [Último acceso: 20 juliol 2020].
- [69] «LANDR,» [En línea]. Available: <https://www.landr.com/es/que-es-la-masterizacion>. [Último acceso: 10 juliol 2020].
- [70] J. Corcho, «El fil d'ipsi,» 11 desembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.ipsi.cat/elfil/estimuls-supernormals-el-poder-de-linstint/>. [Último acceso: 11 juliol 2020].

- [71] J. Zamorano, «Libro de notas,» 02 setembre 2007. [En línea]. Available: <https://librodenotas.com/deloanimallohumanolodivino/11854/la-musica-evolucion-del-lenguaje-de-las-emociones>. [Último acceso: 12 agost 2020].
- [72] C. Hoffman, «Black ghost audio,» 22 juliol 2018. [En línea]. Available: <https://www.blackghostaudio.com/blog/the-quick-guide-to-audio-aliasing>. [Último acceso: 14 abril 2020].
- [73] «El so digital,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/ginebro.cat/cultura-audiovisual/10-3-el-so-digital>. [Último acceso: 27 juliol 2020].
- [74] M. Bosch, «DIGITS,» [En línea]. Available: <http://www.digits.cat/colaboracions/mostreig>. [Último acceso: 14 abril 2020].
- [75] «The bass valley,» [En línea]. Available: <https://thebassvalley.com/breve-historia-de-los-sintetizadores/>. [Último acceso: 15 juliol 2020].
- [76] Juanma, «Thomann,» 8 abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.thomann.de/blog/es/historia-de-los-sintetizadores/>. [Último acceso: 15 juliol 2020].
- [77] «Discogs,» [En línea]. Available: <https://www.discogs.com/es/style/synth-pop>. [Último acceso: 2 setembre 2020].
- [78] «Compadre,» [En línea]. Available: <https://www.compadre.org/osp/EJSS/4415/210.htm>. [Último acceso: 5 maig 2020].
- [79] «Musiki,» [En línea]. Available: http://musiki.org.ar/Onda_diente_de_sierra. [Último acceso: 18 juliol 2020].
- [80] «Electrónica ugr,» [En línea]. Available: <http://electronica.ugr.es/~amroldan/asignaturas/curso03-04/cce/practicas/manuales/osciloscopio/terminos.htm>. [Último acceso: 20 juliol 2020].
- [81] «Musiki,» [En línea]. Available: http://musiki.org.ar/Onda_cuadrada. [Último acceso: 20 juliol 2020].
- [82] «Universitat del País Basc,» [En línea]. Available: <https://www.disca.upv.es/adomenec/IASPA/tema5/FormesdOna.html>. [Último acceso: 22 juliol 2020].
- [83] «Musiki,» [En línea]. Available: http://musiki.org.ar/Onda_triangular. [Último acceso: 22 juliol 2020].
- [84] «WikiAudio,» [En línea]. Available: <https://www.wikiaudio.org/adsr-envelope/>. [Último acceso: 05 abril 2018].
- [85] «Apple,» [En línea]. Available: <https://support.apple.com/es-es/guide/logicpro/lgcef2181366/mac>. [Último acceso: 22 juliol 2020].

- [86] «School training,» 24 juny 2019. [En línea]. Available: <https://www.schooltraining.es/blog/ver/903-que-es-un-vocoder-cuatro-mejores-plugins-de-vocoders.html>. [Último acceso: 22 juliol 2020].
- [87] E. Song, «Neural text-to-speech with a modeling-by-generation excitation vocoder,» 2020.
- [88] «Google research,» [En línea]. Available: <https://research.google/teams/brain/magenta/>. [Último acceso: 5 setembre 2020].
- [89] «Magenta tensorflow,» [En línea]. Available: <https://magenta.tensorflow.org/blog/>. [Último acceso: 5 setembre 2020].
- [90] A. Défossez, «Demucs: Deep Extractor for Music Sources with extra,» 2019.
- [91] «Red hat,» [En línea]. Available: <https://www.redhat.com/es/topics/middleware/what-is-ide>. [Último acceso: 2 setembre 2020].

9. Annex

En aquest apartat hi trobeu el CD-ROM on hi ha les diverses versions del meu sintetitzador digital que he creat al llarg de la part pràctica, així com tot de material complementari que ajudarà a entendre millor el meu Treball de Recerca, com ara diversos arxius d'àudio sintetitzats gràcies al programa informàtic o varis arxius *.lpi* que contenen totes les directrius amb les que funciona el programa, entre d'altres.