

esmuc

Estudiant:

Especialitat/
Àmbit/Modalitat:

Director/a:

Curs:

Vistiplau
del director/a
del Treball

EXTRACTE

El timbre és un paràmetre acústic complex que encara no s'entén completament. Donat el seu caràcter multidimensional, és difícil de definir el timbre d'un so amb dades científiques objectives. S'ha implementat un prototip de programari que permet l'anàlisi en temps real d'algunes de les característiques tímbriques més recurrents de sons mantinguts produïts per instruments de corda. Aquesta eina informàtica s'ha desenvolupat amb els llenguatges de programació *Pure Data* i *Processing* amb l'objectiu de detectar dimensions com la brillantor, el flux espectral, la compactació i la sorollositat tímbrica. El component pràctic d'aquest treball s'ha complementat amb un resum de l'evolució dels estudis tímbrics més rellevants i l'actual estat de la qüestió en relació a aquest terreny. Aquest programari pot ser d'interès per a diversos sectors musicals i de recerca i pot incentivar la creació de composicions basades en el timbre.

EXTRACTO

El timbre es un parámetro acústico complejo que aún no se comprende completamente. Dado su carácter multidimensional, es difícil de definir el timbre de un sonido con datos científicos objetivos. Se ha implementado un prototipo de software que posibilita el análisis a tiempo real de algunas características tímbricas más recurrentes de sonidos mantenidos producidos por instrumentos de cuerda. Esta herramienta informática se ha desarrollado con los lenguajes de programación *Pure Data* y *Processing* con el objetivo de detectar dimensiones como el brillo, el flujo espectral, la compactación y el ruido tímbrico. La componente práctica de este trabajo se ha complementado con un resumen de la evolución de los estudios tímbricos más relevantes y el actual estado de la cuestión en relación a este campo. Este software puede ser de interés para varios sectores musicales y de investigación y puede incentivar la creación de composiciones basadas en el timbre.

ABSTRACT

Timbre is a complex acoustic parameter that is still not completely understood. Due to its multidimensional character, it is difficult to define the timbre of a sound with scientific objective data. The author implements a software prototype to enable an analysis in real time of some of the most recurrent timbre characteristics of the sustained sounds produced by string instruments. This software tool has been developed with the programming languages *Pure Data* and *Processing* in order to detect timbre parameters such as brightness, spectral flux, compactedness and noisiness. The practical component of the paper is complemented with a review of the evolution of the most relevant timbre investigations and the current state of knowledge concerning this field. This programme may be of interest to a vast array of musical and research fields and may stimulate the creation of timbre-based compositions.

SUMARI

1 – INTRODUCCIÓ.....	6
2 – ESTAT DE LA QÜESTIÓ	8
2.1 – Preàmbul general sobre el timbre.....	8
2.2 – Estudis rellevants	8
2.3 – Dimensions del timbre	9
2.3.1 – Brillantor (<i>Brightness</i>).....	9
2.3.2 – L'atac	10
2.3.3 – Dinamisme o variació (<i>Dynamic, varying level</i>).....	10
2.3.4 – Aspror (<i>Roughness/Sensory Dissonance</i>).....	10
2.3.5 – Compactació/Densitat (<i>Compactedness</i>).....	11
2.3.6 – Soroll (<i>Noisiness</i>).....	12
2.4 – Programaris i eines informàtiques actuals.....	12
3 – EL PROGRAMARI.....	13
3.1 – Metodologia	13
3.1.1 – Procés per al desenvolupament del programari	14
3.2 – Funcionament del programari	14
3.2.1 – Paràmetre 1: Flux espectral	14
3.2.2 – Paràmetre 2: Brillantor	16
3.2.3 – Paràmetre 3: Soroll i compactació tímbrica.....	17
3.2.4 – Connexió <i>Pd-Processing</i>	18
3.3 – Dificultats.....	19
3.4 – Utilitat	20
4 – CATÀLEG DE TÈCNiques	22
5 – EXEMPLES APLICATS A LA COMPOSICIÓ.....	25
6 – CONCLUSIONS	29

7 – REFERÈNCIES.....	31
APÈNDIX A: Estudi dels valors màxims i mínims de la llisor i asimetria.....	33
APÈNDIX B: Instruccions d'ús del programari.....	35
APÈNDIX C: Captures de pantalla del programari.....	36
APÈNDIX D: Captures de pantalla del <i>patch</i> de <i>Pure Data</i>	38

1 - INTRODUCCIÓ

Avui en dia, hi ha milers de violinistes virtuosístics, violistes amb una tècnica impecable i violoncel·listes que expressen amb la seva música l'emoció més exorbitant. Cada cop hi ha més intèrprets amb un nivell altíssim que dominen l'agilitat, la precisió rítmica, l'afinació, el contrapunt harmònic, la polirítmia, la sincronització de tècniques i molts altres trets característics de la interpretació dels instruments de corda. En general, però, hi ha una mancança pel que fa a la variació tímbrica i a la cerca de sonoritats noves, contrastants i atrevides. Són uns aspectes que s'han deixat més de banda a l'hora de crear, interpretar i avaluar la música.

Aquest treball de fi de grau tracta del timbre i ofereix un programari per a experimentar amb el so. Al ser un terreny d'investigació molt recent pel que fa al seu plantejament multidimensional, el tema del treball ha sigut una aposta arriscada, però al mateix temps engrescadora i intrigant. Actualment, no hi ha una definició precisa que expliqui què és el timbre, com n'és el cas per paràmetres com l'altura, el ritme i la intensitat. El timbre és encara un paràmetre sonor poc entès, però té possibilitats infinites que val la pena explorar. Aquest treball ofereix una aproximació contextual sobre el timbre i diverses eines per a enriquir i conscienciar d'aquest paràmetre sonor.

Estudiar el timbre és interessant per diversos motius. Primer de tot, aporta un coneixement que pot tenir una repercussió positiva en la música en general. Més específicament, pot impulsar la futura creació d'obres que valorin especialment aquest paràmetre, facilitar a l'intèrpret a entendre millor el seu so, obrir portes en el camp de l'organologia, incentivar la recerca científica per ampliar les hipòtesis sobre el timbre i apropar una visió diferent sobre el so a un públic crític i implicat.

El programari que s'ha elaborat al llarg del procés de treball, a part de possibilitar els objectius esmentats anteriorment, també es podria desenvolupar en futures investigacions per adaptar-lo a diversos perfils d'usuari. Així s'aproparia d'una manera entretinguda un paràmetre sonor poc estudiat i valorat a solistes, professors, estudiants i amateurs. És cert que els intèrprets treballen el so per aconseguir un timbre ideal i canònic, però en general, no s'acostuma a sortir d'uns límits tímbrics molt marcats.

L'objectiu principal d'aquest treball ha sigut desenvolupar un prototip de programari capaç d'avaluar a temps real el timbre d'una nota mantinguda d'un instrument de corda i d'oferir unes dades tímbriques objectives a l'intèrpret. Per tant, una eina informàtica

que l'interpret pogués tenir en el seu lloc de treball amb la qual pogués experimentar amb el seu so en viu, modificant la seva tècnica i obtenint uns resultats útils, directes i visuals.

Estudiar i exposar el panorama actual dels estudis sobre el timbre també ha sigut un objectiu important del treball. Evidentment, per a dissenyar el programari ha sigut indispensable entendre bé què és el timbre, estudiar de quina manera es pot avaluar i definir, quins paràmetres hi influeixen i quins avenços tecnològics existeixen al respecte.

Un cop creat el programari, s'ha volgut ampliar-ne la utilitat proposant un breu catàleg de tècniques instrumentals per comprendre l'abast que pot tenir el projecte. Aquest objectiu és especialment interessant en quant a la composició, ja que pot ser una ajuda terminològica de cara a explicitar el so desitjat a la partitura, a més de ser un primer pas cap a l'experimentació tímbrica. També s'han escrit diversos exemples musicals per posar en pràctica aquest catàleg i per mostrar diversos plantejaments compositius que poden sorgir d'aquest programari.

El procés de treball ha anat guiant i reconduint alguns dels objectius i el resultat final. Primer, es va fer una cerca general d'informació sobre el timbre, però sorprenentment es va veure que no existia una massa de documentació gaire extensa, com inicialment es pensava. Al ser el timbre complex d'investigar pel seu caràcter multidimensional, els estudis es trobaven molt dispersos i aparentment poc relacionats entre sí. També es va fer un intent d'anàlisi i de comparació d'àudios preexistents de violinistes, per trobar punts en comú i oposats. No obstant, els resultats que es van treure eren incoherents, poc rellevants i gens útils, particularment arran de les condicions incontrolables d'enregistrament (equalitzacions, filtres, reverberacions, etc.).

Abordant un altre plantejament, es va procedir a fer unes primeres temptatives amb el llenguatge visual de programació *Pure Data* per poder començar a provar empíricament alguns aspectes tímbrics. Aquestes primeres descobertes van afavorir que es poguessin cercar estudis sobre el timbre amb més criteri i focalització, i seguidament es van anar desvelant assajos i investigacions referents a aquest àmbit.

A mesura que s'anava ampliant el programari al *Pure Data*, es va anar creant la interfície gràfica amb un llenguatge paral·lel, el *Processing*. Com que el programari s'havia d'anar provant empíricament, es van fer proves amb instrumentistes, que a part

de suggerir millores pel que feia a la part tímbrica, també proposaven aspectes de la part visual i destinada a facilitar-ne l'ús. Finalment, es va elaborar el catàleg de tècniques i seguidament les petites mostres que exemplificaven el treball tímbric.

2 - ESTAT DE LA QÜESTIÓ

2.1 - Preàmbul general sobre el timbre

El timbre és una paràmetre sonor multidimensional. És a dir, hi ha diversos atributs espectrals, produïts per unes propietats físiques i independents d'altres paràmetres sonors com l'altura, la duració i la dinàmica, que estan relacionats amb la percepció i el reconeixement tímbric.

A l'estar subjectes a una sensació subjectiva, la terminologia emprada per a referir-se a les qualitats tímbriques s'ajusta a un context cultural específic, consensuada per la comunitat científica. És important discernir entre els conceptes físics dels perceptius.

2.2 - Estudis rellevants

Els estudis que s'han portat a cap en aquest terreny s'han enfocat principalment al reconeixement tímbric. S'ha intentat detectar els paràmetres que fan possible la distinció entre un instrument i un altre i no s'ha arribat a un acord precís. Al ser el timbre un paràmetre complex pel que fa a la seva computació, s'ha depès molt dels avenços tecnològics i, per tant, fins els anys 70, els pocs estudis que s'havien elaborat eren molt abstractes i d'un caràcter principalment subjectiu. [Grey; 1975] és de les primeres investigacions que es duen a terme en aquest terreny, adoptant mesures més científiques per avaluar de què tracta el timbre.

A partir d'aquesta primera tesi, els estudis oscil·len entre dues i cinc dimensions per a reconèixer el timbre. [Grey; 1975] i [Wessel; 1979] dissenyen un seguit d'experiments basant-se en dues dimensions generals per a la detecció del timbre: la distribució energètica espectral, fent èmfasi en la influència que té en la percepció de brillantor; i la variació temporal de l'espectre o flux espectral, és a dir, la forma espectral al llarg del temps, remarcant la importància en l'atac. Grey, però, separa la segona dimensió en dues, discernint entre la sincronització dels atacs i les caigudes dels harmònics aguts, i l'amplitud dels harmònics aguts en l'envolupant.

[Krimphoff, McAdams, Winsberg; 1994] defensa que hi ha tres dimensions que defineixen el timbre: la brillantor (relacionat amb el “centre de gravetat” espectral, o centroide espectral), la rapidesa d'atac i la forma espectral global (o irregularitat espectral). [Caclin, McAdams, Smith, Winsberg; 2005] confirmen les tres dimensions anteriors, afegint la important conclusió que la dimensió del flux espectral, proposada per Grey i Wessel, no és tan rellevant per al reconeixement tímbric com es considerava. Malgrat això, suggereixen que el flux espectral pot augmentar la seva rellevància com més marcada sigui la variació, com en el cas d'un so amb *vibrato* o *tremolo*. És més, [Jensen; 2002] inclou el *vibrato* i el *tremolo* com una altra dimensió independent.

[Elliott, Hamilton, Theunissen; 2012] detecten cinc paràmetres per a reconèixer el timbre: la brillantor; el dinamisme, formulat com a variació dinàmica de l'espectre a llarg termini; la “sorollositat” (*noisiness*); la compactació; i un últim paràmetre indefinit pel que fa a la percepció, que es refereix a una variació espectral petita (menor de 6Hz) en un temps lent (menor de 2Hz).

Altres estudis han anat més enllà investigant com el timbre pot afectar el discurs musical. [Wessel; 1979] porta a cap diversos experiments per demostrar que el timbre pot afectar la percepció de l'altura i del ritme. [McAdams, Giordano; 2008] estudia com l'aspror (*roughness*) es relaciona amb la dissonància sensorial (*sensory dissonance*) i de quina manera pot influenciar la percepció de tensió i relaxació musical.

Tanmateix, hi ha un buit pel que fa a definir el timbre en la seva totalitat i no només a un nivell bàsic de reconeixement. Totes aquestes dimensions esmentades, independentment del seu grau de prominència en el timbre, l'afecten en més o menys mesura.

2.3 - Dimensions del timbre

Els següents descriptors han estat els més prominents a l'hora de descriure el timbre als estudis més rellevants. Alguns dels descriptors influeixen més que d'altres, però també és interessant conèixer les subtileses tímbriques. És a dir, el timbre no només està format per les dimensions més explícites, sinó que també es compona d'altres dimensions menys perceptibles.

2.3.1 - Brillantor (*Brightness*)

S'han fet nombrosos estudis per a quantificar aquesta dimensió tímbrica i és la més consensuada. El centroide espectral, el centre de gravetat de l'espectre d'un so, és el que

més determina si el so té una qualitat brillant o opaca [Schubert, Wolfe; 2006]. El centroide és la mitja ponderada de les freqüències de cada harmònic amb la seva amplitud. És a dir, la suma de les freqüències per la seva amplitud dividit per la suma d'amplituds:

$$Centroide_espectral = \frac{\sum_{i=1}^N f_i * a_i}{\sum_{i=1}^N a_i}$$

on f_i és la freqüència central de cada bin i , i a_i és l'amplitud de cada bin i .

Com més aguda la concentració energètica dels parcials dins l'espectre, més brillant sona un senyal. [Von Bismarck, 1974] també s'hi refereix com "estridència" (*sharpness*). Tanmateix, no s'ha de confondre l'altura d'una nota amb el centroide. No per ser més aguda una nota, sonarà més brillant.

2.3.2 - L'atac

L'atac a l'inici d'un so també repercuteix molt en el reconeixement tímbric. [Grey; 1976] defineix aquesta dimensió com "la presència d'energia de baixa amplitud i alta freqüència al segment inicial d'atac".

2.3.3 - Dinamisme o variació (*Dynamic, varying level*)

Aquesta percepció tímbrica ve donada pel flux espectral, és a dir, el grau de variació de la forma espectral en el temps. Aquestes fluctuacions d'amplitud, que varien amb freqüències d'entre 2 i 6 Hz, als parcials es perceben com inestabilitats en el so [Elliot, Hamilton, Theunissen; 2013]. Una nota llarga del violí, que conté molts harmònics, serà més inestable que una ona sinusoidal, que només és una freqüència, encara que els dos sons se sentin amb la mateixa amplitud.

El màxim dinamisme tímbric que es pot trobar sense percebre un canvi de nota (oscil·lacions de 6 Hz) és el *tremolo* de les cordes o el *vibrato* dels vents fusta [Elliot, Hamilton, Theunissen; 2013].

2.3.4 - Aspror (*Roughness/Sensory dissonance*)

La quantitat i freqüència dels batiments que es produeixen entre els parcials aguts d'un so determinen la percepció d'aspror. Els batiments es generen quan sonen dues freqüències que es troben molt juntes, produint-se una fusió de les dues amb

fluctuacions periòdiques de l'amplitud. Amb freqüències agudes, les fluctuacions són tan ràpides que es percep una sensació de rugositat o aspror.

Els parcials que es troben per sobre dels 2000Hz i que estiguin separats per menys de 300Hz, provocaran la sensació d'aspror. Pel que fa als parcials per sota de 2000Hz, la separació haurà de ser més petita per produir aspror [Terhardt; 2000]. Amb freqüències greus, no es produirà la sensació d'aspror, ja que la distància entre les dues freqüències no serà prou gran en proporció.

[MacCallum, Einbond; 2008] ha elaborat un algoritme per a mesurar l'aspror. Amb aquest objecte analitza diverses obres del s. XX en base a l'aspror. És interessant veure el cas de *Partiels* (1975) de G. Grisey.

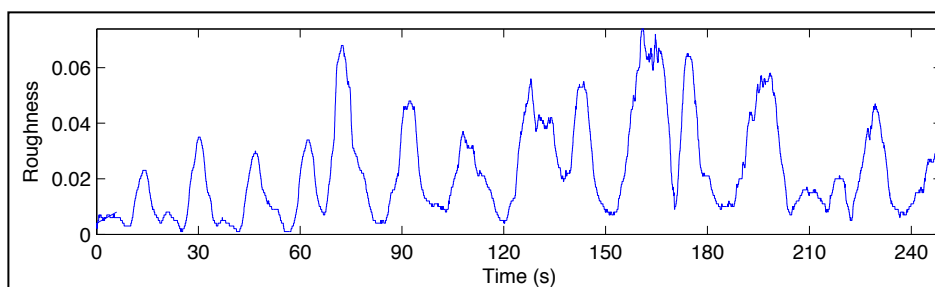


Fig. 1. Aspror a *Partiels* (0''-4'10''). Els punts mínims són els atacs de Mi del contrabaix i el trombó, i els pics coincideixen amb el desenvolupament inharmoni posterior. [MacCallum, Einbond; 2008]

2.3.5 - Compactació/Densitat (*Compactedness*)

Aquesta dimensió tímbrica descriu el so com a més compacte si la seva component espectral és més harmònica, o com a més difós si té més component de soroll [Reuter, Siddiq; 2017], sobretot a les regions espectrals greus, és a dir, quan el so té una asimetria (*skewness*¹) positiva [Elliot, Hamilton, Theunissen; 2013].

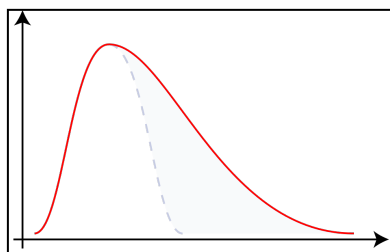


Fig. 2. Asimetria positiva. Un so compacte tindria una forma espectral esbiaixada cap a l'esquerra.

¹ Asimetria (*skewness*): en estadística, és la falta de simetria en una distribució de probabilitat. Es diu que una distribució té una asimetria positiva quan té una cua llarga a la dreta, i té una asimetria negativa quan té una cua llarga a l'esquerra [Everitt, Skrondal, 2010].

2.3.6 - Soroll (*Noisiness*)

Aquesta percepció depèn de l'ample de banda de les regions agudes de l'espectre. Un so sorollós tindrà un centroide agut, amb aquestes àrees espectrals més gruixudes, mentre que un so més net tendirà a dibuixar-se en pics [Elliot, Hamilton, Theunissen; 2013]. Un so sorollós tendirà a una forma espectral amb una asimetria negativa.

El grau de soroll d'un so es pot mesurar fàcilment amb el *Wiener Entropy* o llisor espectral (*spectral flatness*). La llisor espectral es calcula dividint la mitjana geomètrica de la densitat espectral de potència² (DEP) per la mitjana aritmètica de la DEP. Per tant, el soroll sempre tindrà una llisor espectral més alta que un so harmònic. Contra més pics tingui un so, és a dir, més harmònics, menys llisor.

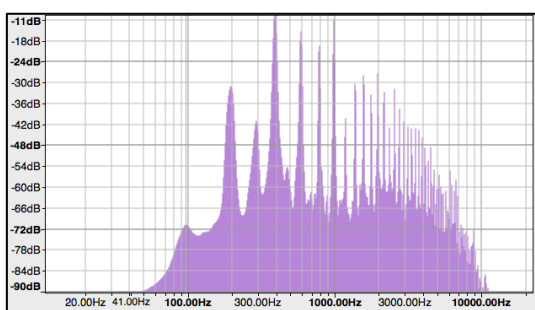


Fig. 3. Sol 2 (corda oberta) tocat en un violí amb una dinàmica *f*. Hi ha uns pics molt definits (parcials).

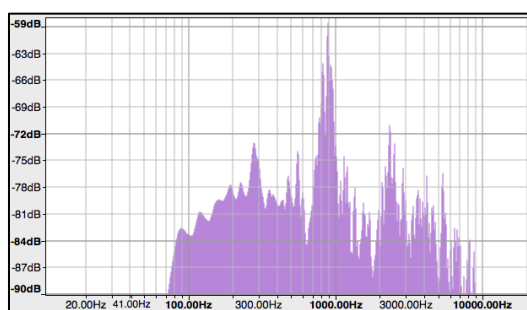


Fig. 4. So produït tocant a la fusta del cos d'un violí. Hi ha alguns pics, gruixuts i poc definits. Només a simple vista, es pot contemplar que la llisor espectral és més alta, en comparació a la fig. 3.

2.4 - Programaris i eines informàtiques actuals

Fins ara, no s'ha concebut cap aplicació informàtica que avaluï les característiques tímbriques dels instruments de corda a nivell d'usuari. S'han tractat molt altres aspectes musicals com el ritme, la dinàmica i l'altura, amb videojocs i aplicacions interactives com el *Garageband*, diverses modalitats de karaoke, *plugins* per a crear música i ritmes amb síntesi concatenativa³ com *cataRT* [Versió 1.2.4; Schwarz et al., 2014] i *RhythmCat* [Versió 0.1; Ó Nuanáin, 2016].

² Densitat espectral de potència: distribució de la potència d'un senyal sobre les diferents freqüències del seu espectre.

³ Síntesi concatenativa: tècnica per a sintetitzar sons relacionant i unint mostres petites d'àudio.

Pel que fa al timbre, existeixen abundants programaris i llibreries d'anàlisi espectral. Des de programes més generals com *Max/MSP* (Versió 7.3.4) o *Pure Data* (Versió 0.43.4-extended), a eines més específiques d'anàlisi espectral com *SPEAR* [Versió 0.7.1; Klingbeil, 2008], *Sonic Visualiser* (Versió 3.0.3; Cannam, Landone, Sandler, 2017) i *sms-tools* [Versió 3; Serra, Serra, Gulati, 2007].

3 - EL PROGRAMARI⁴

3.1 - Metodologia

El desenvolupament d'aquest programari s'ha dut a terme amb el llenguatge de programació gràfica *Pure Data (Pd)* per elaborar la component d'anàlisi tímbrica a temps real, i amb el llenguatge de programació *Processing* per crear la interfície gràfica d'usuari (GUI).

El *Pd*, com el *Max/Msp*, és un llenguatge per a analitzar, sintetitzar i processar senyals d'àudio. A diferència del *Max/MSP*, és de codi obert i gratuït. A més, compta amb nombroses llibreries per a analitzar característiques espectrals. La més predominant al programari ha estat la llibreria *timbreID* [Versió 0.5.1; Brent, s.d.], desenvolupada per William Brent. Aquesta llibreria conté objectes essencials com *specCentroid~* (centroide d'un espectre), *specBrightness~* (grau de brillantor computat de 0 a 1), *specFlatness~* (grau de llisor de l'espectre de 0 a 1) i *specSkewness~* (l'assimetria espectral respecte el centroide).

El *Processing* també és un llenguatge de codi obert i gratuït. És una eina molt adequada per a projectes audiovisuals i accessible pel que fa a la dificultat del seu ús. S'ha utilitzat per crear la interfície gràfica per facilitar la visualització de la informació d'anàlisi tímbrica.

Per fer dialogar el *Pure Data* amb el *Processing* també ha calgut disposar de la llibreria *OSC* [Versió 1.05; Wright, s.d.], desenvolupada per Matt Wright, que comunica dispositius, sintetitzadors, i en aquest cas, llenguatges de programació. D'aquesta manera ha estat possible enviar les dades d'anàlisi que produïa el *Pure Data* al *Processing*, al mateix temps que s'enviaven ordres de l'estil de "play" o "stop" des del *Processing* al *Pd*.

⁴ Consulteu l'Apèndix B per les instruccions d'ús i l'Apèndix C per veure algunes captures de pantalla del programari prototip.

3.1.1 - Procés per al desenvolupament del programari

Abans de començar a escriure el codi, es va fer una investigació de les necessitats que tindria el programari. Primer, calia oferir una informació d'anàlisi sonora a temps real i, per tant, un llenguatge suficientment ràpid per a efectuar la tasca. També calia treballar amb objectes especialitzats en anàlisi espectral amb els quals es pogués fer un estudi precís d'elements com el flux espectral, la brillantor, el nivell de soroll i la densitat o compactació d'un so mantingut. A més, es necessitava un mitjà per a crear una interfície molt visual i propera a l'usuari objectiu.

Un cop resoltes aquestes qüestions, es va estudiar com funcionaria el programari a nivell general. Alguns dels plantejaments van ser: quins algorismes caldria implementar; de quina manera es mostrarien els resultats; o quins marges (grau de precisió), finestres (interval d'informació de mostres) o *hop-size* (freqüència de canvi de finestra) serien més adients per la utilitat del projecte.

A continuació, es va fer un esbós dels passos que seguiria el programari (primer, una pantalla amb les instruccions i un botó "play"; després, una seqüència de preparació "Ready, steady..."; seguidament, la presentació de la informació d'anàlisi, etc.).

Finalment, es va escriure el codi, tant del *Pure Data* com del *Processing*, fent proves freqüents per a detectar possibles errors.

3.2 – Funcionament del programari

El programari conté quatre opcions d'anàlisi: el flux espectral, la brillantor, el soroll i la compactació tímbrica. Tanmateix, pel que fa al soroll i a la compactació tímbrica, a l'estar estretament relacionats, s'ha optat per fer un gràfic que inclou els dos paràmetres, on l'usuari pot visualitzar a quina de les quatre opcions (soroll-netedat, compactació-difusió) s'hi acosta més. El senyal entra pel micròfon del dispositiu amb el qual es fa funcionar el programari.

3.2.1 - Paràmetre 1: Flux espectral

Pel que fa al flux espectral, el programari ofereix un percentatge, on el 100% és l'estabilitat perfecta, és a dir, el centroide espectral no varia en el temps, i el 0% és una inestabilitat relativa. Per a obtenir resultats a diferents graus de precisió, l'usuari pot escollir un nivell: *easy*, *medium*, *expert*. Al nivell fàcil, l'usuari tindrà un marge de

1200Hz de variació del centroide espectral de mitjana; al nivell mitjà, tindrà un marge de 600Hz; i al nivell expert, un marge de 300Hz. És a dir, al nivell mitjà, si l'usuari toca amb un centroide estable de 2000Hz, quan el programa detecti que el centroide ha augmentat a 2600Hz o més, o ha disminuït fins a 1400Hz, l'estabilitat espectral marcarà 0%. Dintre d'aquest marge, la proporció serà lineal: quan l'usuari variï en 300Hz al nivell mitjà, el programa marcarà 50% d'estabilitat. Aquests marges s'han establert de manera empírica, provant amb diversos instrumentistes de corda de diferents nivells. Aquest percentatge es calcula de la següent manera:

Al *Pd*, l'objecte *specCentroid~* rep el senyal d'àudio entrant, i treu una freqüència (el centroide espectral) cada 0.1 mil·lèsima de segon (especificat al metrònom al *Pd*).

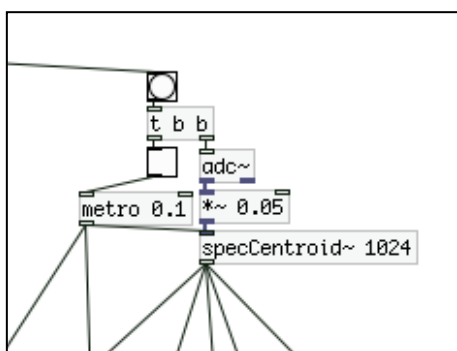


Fig. 5. Prement "play" al programari, *Pd* envia un bang al micròfon (*adc~*) per encendre'l i un bang al metrònom per iniciar-lo.

Aquestes freqüències s'acumulen en una llista (finestra) de 2000 mostres que en fa la mitjana així que s'omple, reiniciant-se el comptador per tornar a calcular la mitjana dels següents 2000 mostres. Alhora, es creen 10 finestres de 1000 mostres, que comencen el seu recompte a 200 mostres de distància una de l'altra (*hop-size*), fent també les mitjanes.

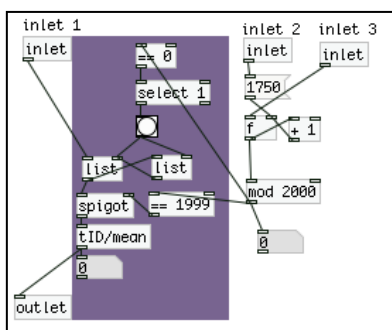


Fig. 6. A l'inlet 1 entren els centroides, a l'inlet 2 un bang i a l'inlet 3 el metrònom. El subpatch calcula la mitjana (*tID/mean*) de la llista (*spigot*) dels centroides entrants del comptador 0 al 1999 (2000 mostres). Quan arriba a 1999, es reinicia el comptador.

Per tant, *Processing* rep cada 2000 mostres una mitjana general de 2000 mostres, i 10 mitjanes petites de 1000 mostres cadascuna. Agafant de referència la mitjana gran de 2000 mostres, i establint 1200Hz, 600Hz o 300Hz (segons el nivell), com a límit màxim

d'instabilitat, *Processing* calcula quin percentatge de variació tenen les mitjanes petites de 1000 mostres respecte la mitjana gran.

```
//----- Function that calculates regularity in percentage -----
float reg_percentage(float pNombre1, float pNombre2){
  if (100-abs((pNombre1 - pNombre2)/300*100) > 0){
    return 100-abs((pNombre1 - pNombre2)/300*100);
  }
  else return (0);
}
```

Fig. 7. Funció que calcula el percentatge de regularitat, on *pNombre1* sempre és la mitjana de la finestra de 2000 mostres, i *pNombre2* és la mitjana canviant (cada 200 mostres) de 1000 mostres. Quan el percentatge és menor a 0, és a dir, quan s'ha superat la variació màxima de 300Hz, l'usuari llegeix 0%.

3.2.2 - Paràmetre 2: Brillantor

La brillantor del timbre que produeix l'usuari es calcula de manera semblant al flux espectral. Tanmateix, al ser el paràmetre més sinestèsic, s'ha cregut convenient representar-lo amb un indicador vertical de colors de menys (blau fosc) a més (groc) brillants o lluminosos.

Per avaluar la brillantor s'ha emprat l'objecte `specBrightness~`, que calcula la ràtio entre la suma de les magnituds sobre el centroide i la suma de totes les magnituds de l'espectre.⁵ Ja que la ràtio dóna un nombre entre 0 i 1, s'ha calculat el percentatge de brillantor, i se li ha assignat a cada color una franja de 10%. Quan la brillantor és de 10%, només es veurà el color més fosc. A mida que vagi incrementant-se la brillantor, s'afegiran colors més clars a l'indicador.

Les franges varien segons la informació rebuda des del *Pure Data*. Com que la brillantor es manté força estable entre mostres, s'envia directament la informació des de l'objecte `specBrightness~`, amb una velocitat de 10 mil·lèsimes de segon. Tanmateix, per evitar saturar l'usuari amb massa informació, el *Processing* està programat per només ensenyar la brillantor que variï en més de 5% respecte la mostra anterior. És a dir, si la primera mostra és de 70% i la segona de 73%, el programa només mostrarà la primera mostra del 70%. Només es mostrarà un altre valor quan aparegui una mostra que sigui més gran de 75% o més petita de 65%.

⁵ Veure la referència de l'objecte `specBrightness~` per una explicació més detallada a: <http://williambrent.conflations.com/pages/research.html>

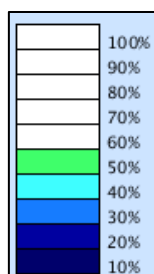


Fig. 8. Indicador de brillantor que en aquest cas marca un 50%.

3.2.3 - Paràmetres 3 i 4: Soroll i compactació tímbrica

Aquestes dues característiques tímbriques són les més complicades de visualitzar. Per definició, un so sorollós i un so difós tenen una llisor (*flatness*) més alta que un so net o un so compacte. Tanmateix, un so sorollós i un so net tenen en comú una asimetria espectral (*skewness*) negativa, i un so difós i un so compacte tenen una asimetria positiva.

	Asimetria espectral (<i>skewness</i>) +	Asimetria espectral (<i>skewness</i>) -
Llisor (<i>flatness</i>) +	Difós	Sorollós
Llisor (<i>flatness</i>) -	Compacte	Net

En general, i excepte que estiguin filtrats d'alguna manera, els sons que produeixen els instruments sempre tenen una asimetria positiva. Per tant, per aquest projecte, s'ha considerat que els sons que tenen un timbre amb una relació compacte-difusió tenen una asimetria més positiva que uns sons amb una relació net-sorollós. És més, el rang pel qual es mou la asimetria és d'1,2 a 4,4 en el cas dels instruments de corda. Pel que fa a la llisor espectral dels sons produïts amb instruments de corda, normalment es mou de 0,02 a 0,023. Això és donat perquè, encara que el timbre presenti soroll, la claredat dels pics de l'espectre de les cordes segueix sent predominant.

S'ha creat un gràfic on l'eix X mostra la llisor espectral, i l'eix Y la asimetria espectral. Cada vèrtex de la matriu indica quina característica, de les quatre afectades per la llisor i la asimetria, produeix l'usuari. Un cercle representa a temps real la variació de llisor i asimetria. La rapidesa d'aquesta variació ve donada pel flux d'informació que rep del *Pure Data*, que envia les dades cada 400 mil·lèsimes de segon. Per evitar que hi hagi salts molt bruscs entre cada mostra, les dades que s'envien són la mitjana de 100

mostres tant de la llisor com de la inclinació. La precisió que podria aportar el fet d'enviar mostra per mostra fa que se'n vegi perjudicada la utilitat del programa.

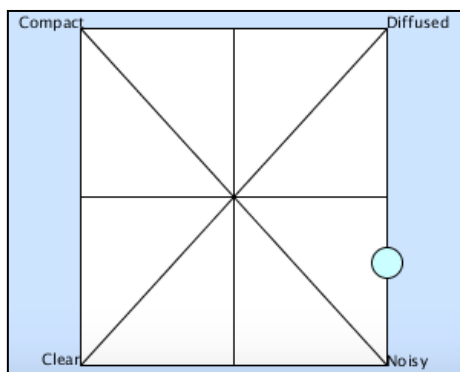


Fig. 9. Gràfic que representa a temps real la compactació espectral i el soroll. Aquest exemple mostra un so amb una component de soroll altíssima, sent la percepció de l'oient de soroll i no tant de difusió.

Ha estat difícil decidir de quina manera calibrar l'algoritme. Al ser característiques relatives, s'han hagut de posar uns límits de mínimes i màximes asimetries espectrals i llisors. Finalment, s'ha decidit de fer un estudi empíric⁶ dels valors més freqüents quan es toca amb una tècnica de *legato*, en cordes a l'aire i en notes amb posicions, i amb les dinàmiques *f*, *mf* i *p*. Aquests valors s'han aplicat com a estàndards i un cop provat el programari amb aquests nombres, els resultats han estat favorables i coherents. Els rangs de valors establerts han estat: 1,2 fins 4,4 per la asimetria; i 0,002 fins 0,023 per la llisor espectral.

```
void compact_noise(float one, float two){
  if (stage == 3){
    skewness = one-1;
    flatness = two-0.002;
  }
  if (skewness > 3.5) {
    skewness = 3.5;
  }
  else if (skewness <= 0) {
    skewness = 0;
  }
  else if (flatness > 0.021){
    flatness = 0.021;
  }
}
```

Fig. 10. Funció que aplica els valors estàndards i calcula la compactació espectral i la "sorollositat".

3.2.4 - Connexió Pd-Processing

Per fer dialogar el Pd i el Processing, va caldre la llibreria OSC. Al Pd, després d'importar la llibreria a la base de dades, es va haver de crear una adreça iP i un número de port coincident amb Processing. Fet això, ja es podien enviar les dades que es gestionarien després al Processing.

⁶ Consultar l'apèndix A per a veure la taula amb l'estudi.

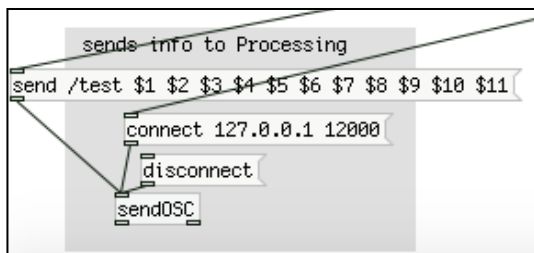


Fig. 11. L'adreça iP és 127.0.0.1, i el número de port és 12000. La informació s'envia a través del missatge "send /test". Cada \$(n°) és una dada enviada de Pd a Processing.

Similarment, Processing també envia informació a Pd de la següent manera. Enviant un 1 quan l'usuari prem el botó de "play", Pd engega el micròfon i el metrònom amb un bang, i quan l'usuari prem l'"stop", Processing torna a enviar un 1, que Pd entén com un altre bang que apaga el circuit.

```
//----- Sends info to puredata -----
void mousePressed(){
  if (stage == 0 || stage == 3){
    OscMessage myOscMessage = new OscMessage("/test");
    if (stage == 0 && mouseX <= 420 && mouseX >= 380 && mouseY >= 130 && mouseY <= 175){
      println("1");
      myOscMessage.add((int)1);
      oscP5.send(myOscMessage, myRemoteLocation);
      time_in_seconds = second();
      stoptime = 2;
      stage = 1;
    }
    else if (stage == 3 && mouseX <= 420 && mouseX >= 380 && mouseY >= 130 && mouseY <= 175){
      println("1");
      myOscMessage.add((int)1);
      oscP5.send(myOscMessage, myRemoteLocation);
      time_in_seconds = second();
      stoptime = 2;
      stage = 0;
    }
  }
}
```

Fig. 12. Quan es prem el botó (coordenades x i y), s'envia un 1. Pure data apaga i encén el programa.

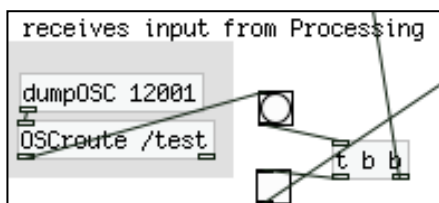


Fig. 13. Pd rep bangs que engeguen i apaguen el "toggle" que fa funcionar l'anàlisi espectral del so entrant al micròfon.

3.3 - Dificultats

Mentre s'elaborava el programari, s'han anat trobant diverses dificultats i complicacions. Algunes eren de caràcter més tècnic pel que fa a la programació, i d'altres de caràcter conceptual.

Un problema que no es va detectar a temps va ser que la llibreria *OSC* del *Pure Data* no funcionava amb la versió que s'estava utilitzant, el *Pd-Vanilla*. S'ha hagut d'utilitzar una versió lleugerament obsoleta del *Pure Data*, el *Pd-Extended*. Després d'adaptar el codi a la versió més antiga, s'ha comprovat que pel funcionament del programa no sembla que hagi de portar problemes.

Un altre element a considerar va ser els marges d'error de cada paràmetre. És a dir, per què utilitzar, en el cas de l'estabilitat espectral, una variació límit de 300Hz, i no de 350Hz? Finalment es va optar per fer diverses proves empíriques amb instrumentistes de corda, i crear tres nivells de precisió: fàcil, mitjà i expert.

També es va haver de prendre decisions pel que fa a la rapidesa dels canvis de valors de cada paràmetre. Com més dades s'enviaven, més precís era el resultat, però també més ràpids els canvis visuals i, per tant, més confusos per l'usuari. Va ser imprescindible buscar un equilibri tal que el cercle que indica com és el timbre de l'interpret es mogués de forma gradual i no de manera abrupta i atabalada.

La mesura dels paràmetre del soroll i de la compactació tímbrica també van presentar algunes dificultats. Provant amb diversos àudios d'instruments orquestrals, es va constatar que la asimetria de l'espectre era sempre positiva, per tant no existia l'opció d'analitzar la dimensió del soroll d'una manera estricta, ja que per definició, havia de tenir una asimetria negativa. Finalment, es va relativitzar la asimetria de tal manera que si era molt positiva, es decantés per ser un so compacte, i si ho era menys positiva, es considerés un so sorollós.

Les dimensions de l'aspror i l'atac no s'han inclòs al programari. Els dos paràmetres són els més complexos i costosos d'analitzar a temps real. Per completar el programari, caldrà incloure aquests dos paràmetres en futures investigacions.

3.4 - Utilitat

Les possibilitats que ofereix aquest programa són nombroses. L'anàlisi dels aspectes tímbrics més rellevants a temps real pot ser d'interès per a diferents àrees de recerca.

Per al compositor, aquesta eina pot facilitar-li la descripció del so mitjançant uns valors objectius i molt precisos. Fins ara, les subtileses tímbriques s'han fet arribar a l'interpret amb adjectius sinestèsics o amb una descripció de la tècnica de l'instrument a grans

trets. Alexander Scriabin escriu “Brumeux” (bromós) o “De plus en plus lumineux et flamboyant” (cada cop més lluminós i brillant) al Poema del Foc; al Quartet de la Fi del Temps de Olivier Messiaen hi apareixen adjectius com “Granitique” (granític), “En poudroisement harmonieux” (centellejant harmoniosament) i “Robuste” (robust); a Vox Balenae de George Crumb, els intèrprets toquen amb adjectius com “Broad” (ample), “Flowing” (fluint), “Pure” (pur) i “Serene” (serè).

Altres compositors prefereixen especificar la manera de tocar, d'una manera més o menys lliure. Algunes obres en tenen suficient amb apunts com *sul pont.*, *vibrato* i *écrasé*, i d'altres, com en són el cas les obres de Helmut Lachenmann, entren en un detall minuciós de les posicions de l'arc a la corda, la pressió de la mà esquerra i de l'arc, el cop i l'articulació, establint diverses gradacions en cada tècnica.

Amb aquest programari, el compositor pot experimentar amb l'instrument per buscar el timbre que vol i aconseguir expandir la possibilitat sonora amb la informació que obté de l'anàlisi espectral. Per exemple, el “cada cop més lluminós i brillant” de Scriabin es podria haver resolt d'una manera més sincronitzada entre els violins si sabessin que cada tants compassos haurien d'haver incrementat un 10% la seva brillantor tímbrica. Els “Granitique” o “Robuste” de Messiaen podrien ser més explícits amb una major densitat o compactació (*compactedness*) i amb una mica d'aspror (*roughness*). És més, les indicacions de Lachenmann podrien ser encara més precises si especifiqués quin percentatge de soroll voldria en l'*écrasé* o com de difós voldria els *sul tasto*.

D'altra banda, en la vessant interpretativa, aquesta eina proporciona un ventall de possibilitats pedagògiques. És un instrument per a treballar so i tècnica de l'instrument. És motivant pel seu caràcter de joc, i de cara a principiants pot ser engrescant i divertit. També, a un nivell més avançat, permet de ser el professor d'un mateix al visualitzar uns paràmetres tímbrics consensuats científicament. A més, pot ser interessant per a introduir-se en un llenguatge més contemporani. L'intèrpret, a part de practicar elements més clàssics com l'estabilitat sonora, la nitidesa i el color, pot fer una recerca d'altres timbres que li poden ser útils per a enfrontar-se a determinats passatges de les obres dels segles XX i XXI.

4 - CATÀLEG DE TÈCNiques

S'han elaborat una sèrie de taules i gràfics per posar en pràctica el programari. Aquestes mostren les característiques tímbrics d'alguns exemples de tècniques dels instruments de corda. L'estudi s'ha fet amb un violí francès de principis del s. XX, amb cordes de la casa eslovena *Warchal*⁷ del model *Amber*, descrit el seu so com “ric i càlid”.

Al següent gràfic, es mostren els resultats esperables al programari dels elements tímbrics de compactació i soroll. A part de les notes tocades corda a l'aire *tenuto*, nombrats com *ord.* i la corda en qüestió, la resta de les tècniques s'han produït a la corda sol, també a l'aire. Totes les tècniques s'han tocat en una dinàmica *mf*.

Ja només pel que fa a les cordes a l'aire *ord.* es pot veure una diferència clara de timbre. La corda Sol és la que treu un so més net, però les cordes Re i La són les més harmòniques, ja que presenten una llisor espectral més baixa i per tant, més pics. El so de la corda Re és el més compacte, és a dir, té una asimetria més positiva i per tant, una concentració de greus més gran en relació als aguts. Això podria ser donat per les vibracions per simpatia de la corda sol. Finalment, la corda Mi és la que produeix el so més sorollós amb una component molt alta d'aguts respecte a la seva fonamental.

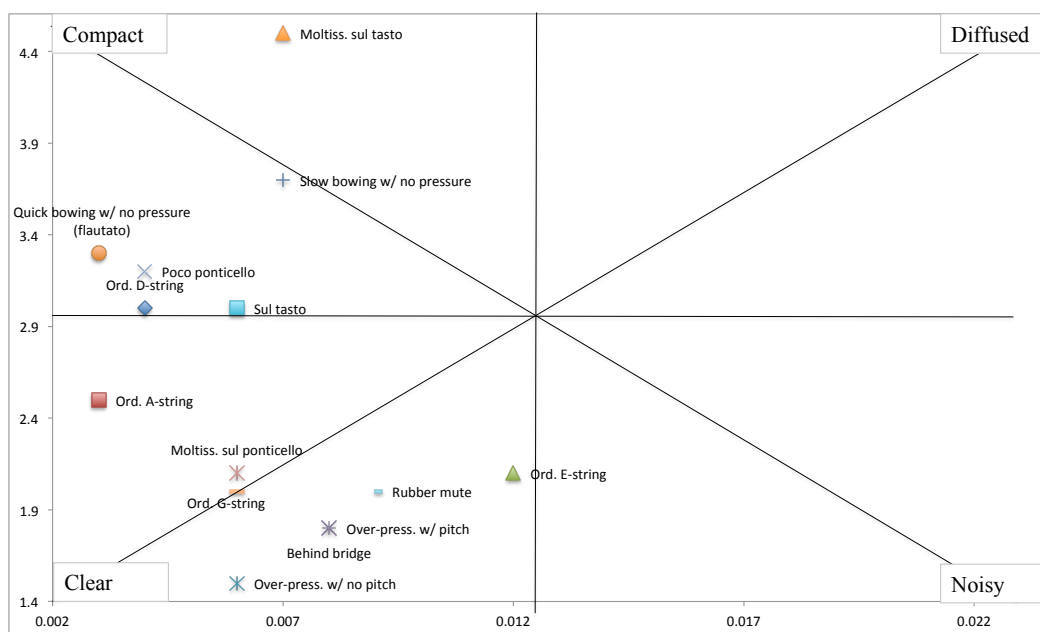


Fig. 14. Gràfic on l'eix X mostra la llisor espectral i l'eix Y la asimetria d'algunes tècniques dels instruments de corda.

⁷ Per a consultar la seva pàgina web, visitar: <http://www.warchal.com>

Totes aquestes tècniques es concentren en una àrea de poca component de soroll. Es troben resultats sorprenents, com ara que un so de sobrepressió que no produeixi altura és menys sorollós que, per exemple, la corda Mi a l'aire, o una nota tocada amb sordina. Analitzant les possibles causes, s'ha trobat que una sobrepressió “sense produir altura” en realitat produeix una altura molt marcada, però tan allunyada al timbre relacionat amb el violí, que es considera que no té altura. Tanmateix, una sobrepressió “sense altura” produeix un subharmònic amb una freqüència determinada, i pot ser per això que el seu espectre es dibuixi en pics més clars que un Mi corda a l'aire. També és curiós com la asimetria d'aquesta sobrepressió és la més baixa. És a dir, té una component d'aguts més alta que de greus, similar al cas de la sobrepressió “amb altura” i de la nota tocada darrere el pont.

Com menys pressió de l'arc sobre la corda, menys aguts apareixen al so produït. En són el cas el *flautato* ràpid i el *flautato* lent (o *slow bowing with no pressure*), però també el *moltissimo sul tasto* i amb menys mesura el *sul tasto*. Encara que la pressió conscient de l'arc en aquestes últimes dues tècniques sigui la mateixa, la adhesió de les cerres de l'arc és menor donada la poca tensió de la corda en aquests punts més allunyats del pont.

Al següent gràfic s'ha ampliat el rang de llisor espectral per adaptar les tècniques més sorolloses. Alguns exemples són el *sul ponticello* (directament a sobre el pont), de manera que aparentment no es produeixi cap altura determinada; la sobrepressió produïda paral·lelament (“verticalment”) a les cordes; el *flautato* produït paral·lelament a les cordes; i el *flautato* produït amb un moviment circular per les cordes. Són tècniques que perceptiblement no produeixen cap altura definida, però amb les dades que aporta el programa, es poden veure diferències considerables de timbre. Per començar, el component de soroll varia amb segons quina tècnica. El *sul ponticello* (directament sobre el pont) té molt menys soroll que el *flautato* vertical, però també té un so molt menys definit i més difós. De cara a classificar sorolls per la seva harmonicitat, són clars els exemples que tenen altures més o menys definides.

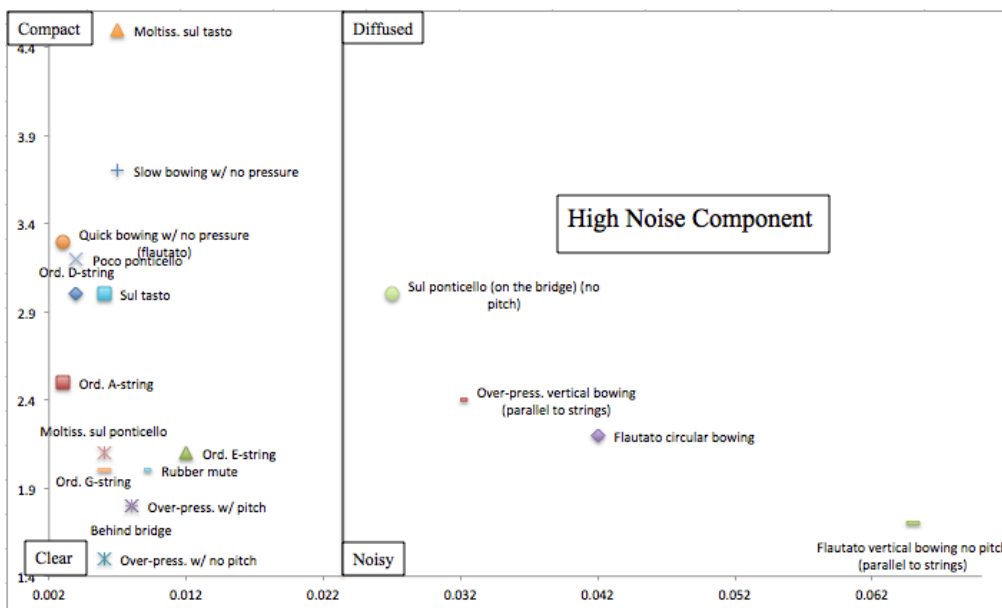


Fig. 15. Gràfic amb llisor espectral (X) i asimetria (Y). S'hi mostra la contraposició entre tècniques més i menys sorolloses.

Pel que fa a la brillantor d'aquestes tècniques, a la següent figura es mostra l'àmplia varietat de colors que pot produir el violí. Es pot veure com les dimensions de sorollositat i compactació no afecten necessàriament a la percepció de brillantor. Com a tècnica més brillant es troba el so *ordinario* de la corda a l'aire Mi. Després entre un 50% i un 60%, es troben tècniques com la sobrepressió amb altura, el *moltissimo sul pont.*, el *flautato* lent i la corda a l'aire La *ordinario*. Entre el 30% i el 50% es troben les tècniques *sul tasto*, la corda Sol a l'aire, la nota amb sordina i el *poco pont.* Els sons més foscos amb altura són el *moltissimo sul tasto*, la corda a l'aire Re i el *flautato* ràpid. Les tècniques més sorolloses tendeixen a una brillantor més inestable. En general, el *flautato* paral·lel a les cordes, el *flautato* circular i el *sul pont.* (directament sobre el pont) tenen brillantors altes, per sobre de 80%. La tècnica més inestable és la sobrepressió paral·lela a les cordes, que fluctua entre un 40 - 60%.

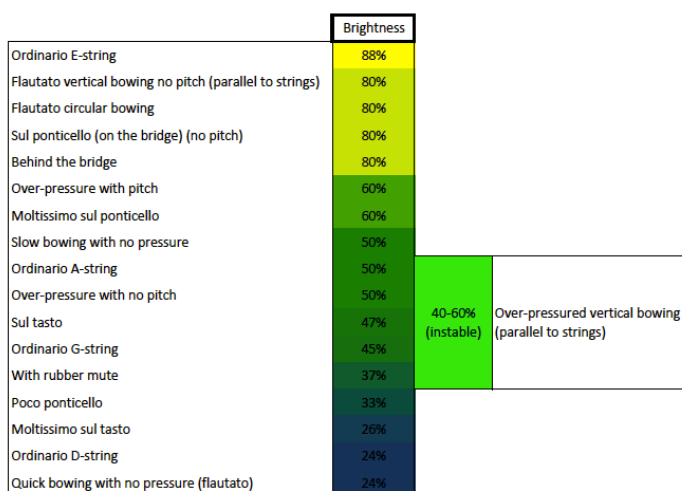


Fig. 16. Gradació de la brillantor que produeixen alguns exemples de tècniques amb el violí.

5 - EXEMPLES APLICATS A LA COMPOSICIÓ

Per il·lustrar algunes de les aplicacions que podria tenir aquest programari, s'han escrit diversos exemples musicals basant-se en fonaments tímbrics emprant algunes tècniques compositives convencionals.

El primer exemple mostra la transformació tímbrica d'un passatge dialèctic entre els components d'un quartet de corda. En tres compassos, un material extremadament brillant es converteix progressivament en un de fosc i opac. El fragment s'inicia amb tècniques de més d'un 80% de brillantor, com el so de la corda mi a l'aire *ff*, un *flautato* paral·lel a les cordes (vertical) molt ràpid, i un so força difós, però també brillant, produït per les cerdes de l'arc sobre el pont. Al segon compàs, s'hi troben tècniques d'una brillantor mitja (entre 35% a 80%) com el so produït al tocar darrere el pont, al tocar amb sobrepressió (tant produint altura com no), o al tocar molt a prop del pont. Finalment, a l'últim compàs s'hi troben tècniques poc brillants com tocar amb sordina, molt amunt del bateador o amb molt poca pressió de l'arc i moviment molt ràpid.

Aquest exemple té una clara direcció tímbrica que es podria expandir al llarg d'un passatge més durador, i també és podria estrènyer formant un gest curt. La transformació pot servir com a material principal d'una obra o simplement com a enllaç d'un bloc compositiu a un altre.

Fig. 17. Exemple 1: Transformació emprant la dimensió tímbrica de la brillantor.

El següent exemple planteja dues capes tímbriques sobreposades. La primera té una sonoritat molt difosa, produïda per un *moltissimo sul tasto* al contrabaix en una posició aguda a la quarta corda; un *moltissimo sul tasto* passant l'arc molt lentament sense gairebé pressió al violoncel; i un moviment ràpid paral·lel a les cordes amb molt poca pressió d'arc de notes greus a la viola. Aquestes tècniques tenen una llisor i asimetria espectral altes i, per tant, es perceben com sons emboirats o bruts.

Al següent compàs, una segona capa molt brillant apareix per sobre, als violins. A la corda Mi a l'aire se succeeixen tècniques com el *flautato* vertical i circular, i el so produït al tocar just a sobre del pont. Encara que no es percep una altura gaire definida, aquest última tècnica treu un so més brillant a la corda Mi que a les altres cordes.

The musical score for Figure 18, Example 2, is divided into two layers of sound production.
Layer 1: Diffuseness (indicated by a circle) is played by the Viola, Violoncello, and Double Bass.
 - Viola: *tutto l'arco, moltissimo flautato* (*pp*).
 - Violoncello: *moltissimo sul tasto* (very slow bowing with no pressure (flaut.)) IV string (*pp*).
 - Double Bass: *moltissimo sul tasto* (as high up the neck as possible) IV string (*pp*).
Layer 2: Brightness (indicated by a circle) is played by Violin 1 and Violin 2.
 - Violin 1: *flautato vertical bowing* (*p*), *flautato circular bowing* (*mp*), *ord.*, and *on the bridge (no pitch)*.
 - Violin 2: *flautato vertical bowing* (*p*), *flautato circular bowing* (*mp*), and *ord. behind the bridge*.
 The tempo is marked as $\text{♩} = 50$.

Fig. 18. Exemple 2: Composició per capes. La primera explora la dimensió de la compactació, produint un so poc compacte, és a dir, un so difós. La segona produeix un so brillant per sobre.

El tercer exemple és un disseny de gest musical basat en el timbre. Està format per quatre tipus de timbre diferents basats en la compactació i la sorollositat. El gest és una seqüència de timbres que comença amb un so net, després un so difós, després un so compacte i, finalment, un so sorollós. Les tècniques seleccionades pertanyen a quatre quadrants tímbrics diferents en el gràfic que mostra la llisor i la asimetria espectral. El gest es podria variar substituint les tècniques per d'altres que es trobessin en els quadrants adients. També es podrien variar altres paràmetres sonors com l'altura, la dinàmica i el ritme, però mantenint la seqüència tímbrica.

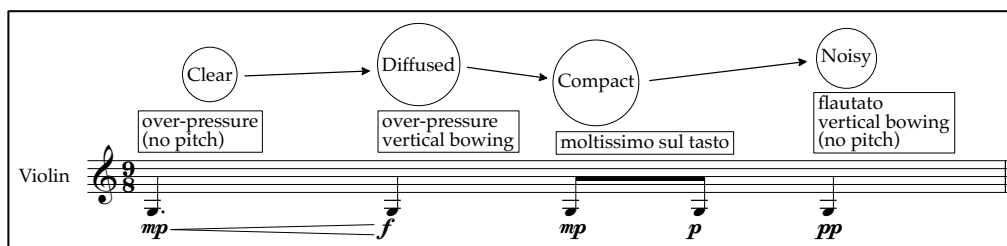


Fig. 19. Exemple 3: Gest format per una seqüència de quatre timbres diferents en base a la compactació i la sorollositat.

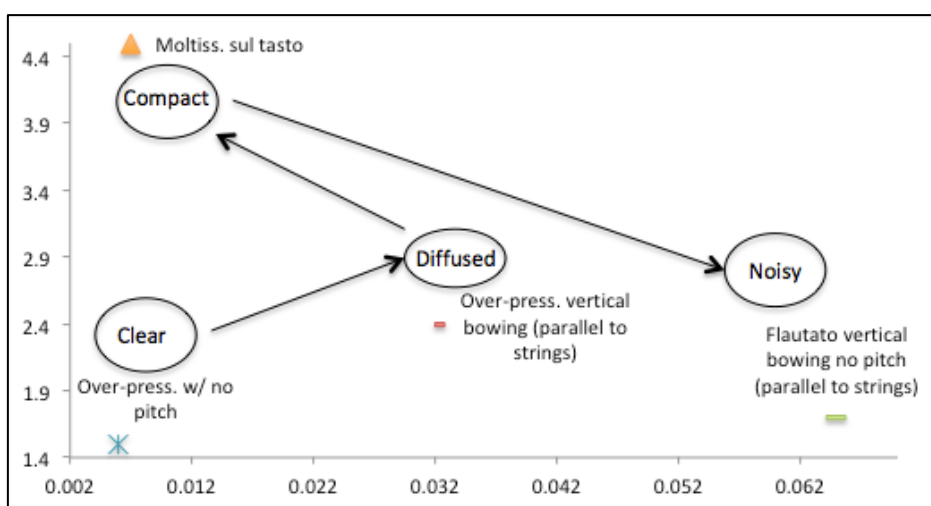


Fig. 20. Gràfic amb la llisor i asimetria espectral de les tècniques de la seqüència del gest de l'exemple 3.

La següent proposta té un plantejament més espectral. Un acord format pels primers parcials de la sèrie harmònica de Do apareix en una dinàmica *p* a l'orquestra de cordes. Al llarg dels quatre compassos, l'acord no canvia, però sí que ho fa el timbre metafòric que es crea. Al tercer temps del primer compàs el primer faristol de les violes i dels violoncel·ls emfatitzen els parcials aguts de la sèrie harmònica, concentrant l'energia espectral en aquesta zona harmònica i, per tant, creant un timbre més brillant. Seguidament, els primers violins i el primer faristol dels segons embruten l'acord espectral a la zona dels aguts amb fortes dissonàncies amb un tremolo *pp*, produint un timbre sorollós. A continuació, les primeres violes i violoncel·ls embruten l'espectre als greus, fent un timbre no sorollós, però sí difós. Finalment contesten els violins emfatitzant uns parcials de la sèrie més greus que els potenciat al primer compàs, produint un so menys brillant que en el primer cas.

The image shows a musical score for five instruments: Violin I, Violin II, Viola, Violoncello, and Double Bass. The score is in 4/4 time and features a spectral chord. The instruments are arranged in staves from top to bottom. The score includes various annotations and dynamics:

- Violin I:** Starts with a rest, then plays a spectral chord marked *pp*. A box highlights the chord with the annotation "+ Noisiness". Later, it plays a melodic line marked *mf* with the annotation "+ Brightness".
- Violin II:** Plays a sustained chord marked *p*.
- Viola:** Starts with a rest, then plays a spectral chord marked *p*. A box highlights the chord with the annotation "#8". Later, it plays a melodic line marked *mf* with the annotation "+ Brightness".
- Violoncello:** Starts with a rest, then plays a spectral chord marked *mf*. A box highlights the chord with the annotation "+ Diffuseness". Later, it plays a melodic line marked *p*.
- Double Bass:** Plays a sustained chord marked *p*.

Annotations are placed in circles and boxes, with lines pointing to specific parts of the score. The overall structure is a 4-measure phrase.

Fig. 21. Exemple 4: Acord espectral amb variacions tímbriques.

6 - CONCLUSIONS

El timbre és un paràmetre acústic molt interessant que al dia d'avui encara no s'entén en la seva totalitat. Les primeres investigacions científiques formals no van començar fins als anys 70 i han depès considerablement del progrés tecnològic. Actualment hi ha un ventall molt ampli de programaris per a l'anàlisi espectral i, afortunadament, el timbre és cada cop més i més estudiat. Tanmateix, hi ha una gran mancança pel que fa a eines informàtiques d'aquest sector destinades a un públic general.

Aquest treball de fi de grau ha implementat un programari per a analitzar el timbre dels instruments de corda a nivell d'usuari. És un programari que permet a l'intèrpret de visualitzar en temps real algunes de les seves característiques tímbriques, tals com la regularitat o flux espectral, la brillantor, la compactació i el soroll. Aquest component més pràctic del treball s'ha complimentat amb una recerca de l'evolució dels estudis més rellevants i l'estat de la qüestió de la situació actual d'aquesta àrea d'investigació. A més, s'ha provat el programari amb l'elaboració d'un estudi d'algunes tècniques interpretatives dels instruments de corda i se n'ha fet diverses classificacions i comparacions.

Aquest programari pot ser d'interès per a alguns sectors musicals i de recerca. A un nivell compositiu, aquesta eina pot donar una nova visió del so i de la tècnica d'escriptura. Els compositors poden imaginar sonoritats diferents i escriure-les d'una forma molt explícita utilitzant el programari. Poden categoritzar els sons en base a les seves característiques tímbriques, classificant-los per famílies o gradacions, i utilitzar aquests grups per a concebre noves obres, similarment al tractament que es fa de les altures, els ritmes i les dinàmiques.

Aquest programa també pot ser útil de cara als intèrprets. A part de poder practicar-hi alguns aspectes de la tècnica tradicional, el programari pot ampliar el seu coneixement del seu so personal i pot ajudar a fer front certs passatges musicals. Poden experimentar amb la seva producció sonora per a descobrir noves sonoritats i textures, fàcilment modificant-ne la tècnica a temps real per a obtenir uns resultats instantanis.

Addicionalment, en l'àrea de pedagogia també pot ajudar a incentivar a principiants a seguir tocant. Sent una eina molt visual i atractiva, el jove intèrpret pot sentir-se més captivat, i menys frustrat al veure els seus progressos amb unes dades objectives.

L'interpret pot planificar-se una sèrie d'objectius que pot anar controlant amb el programari.

Altres utilitats es poden trobar en àmbits com l'organologia i la musicologia. Lutiers, restauradors i historiadors poden emprar l'eina per a comparar el timbre d'instruments, cordes i accessoris com sordines, cordals i matallops. En la sonologia també pot ajudar a millorar aspectes de l'enregistrament i la postproducció.

Finalment, aquest programari pot promoure que es desenvolupin altres i millors aplicacions d'ús més accessible. Aquest projecte només és un prototip amb un plantejament molt bàsic del timbre. Donat el temps i els pocs recursos, encara és un projecte molt jove. No obstant això, és un pas decidit i amb molt de potencial cap al desenvolupament d'un programari complet i precís.

En futures investigacions, seria convenient millorar la interfície gràfica amb un disseny més creatiu i seductor a més d'afegir algun apartat teòric, referències bibliogràfiques i unes millors instruccions d'ús a la pantalla. També caldria calibrar els paràmetres tímbrics d'una manera més exacta elaborant un estudi complet amb un grup extens d'interprets i millors recursos informàtics. És més, el programari es podria ampliar adaptant-lo a altres famílies instrumentals.

En aquest treball es posa de manifest l'interès que pot tenir l'eina desenvolupada per a una àrea de recerca acústica i musical. Aquesta idea és una proposta original per a impulsar futures recerques en timbre i l'essència del so. L'autora anima a investigadors i músics a expandir la seva visió sonora i a anar més enllà dels límits musicals canònics d'avui en dia.

7 - REFERÈNCIES

- BRENT, W. (s.d.). timbreID (Versió 0.5.1). [Programoteca per a Pure Data]. Recuperat a: <https://puredata.info/downloads/timbreid/releases>
- CACLIN, A.; MCADAMS, S.; SMITH, B. K.; WINSBERG, S. (2005) "Acoustic correlates of timbre space dimensions: A confirmatory study using synthetic tones". *Acoustical Society of America*, Juliol 2005, Vol. 118, n°1, pàg. 471-482.
- CANNAM, C.; LANDONE, C.; SANDLER, M. (2017) Sonic Visualiser (Versió 3.0.3). [Programari informàtic]. Recuperat a: <https://www.sonicvisualiser.org/index.html>
- ELLIOT, T. E.; HAMILTON, L. S.; THEUNISSEN, F. E. (2013) "Acoustic structure of the five perceptual dimensions of timbre in orchestral instrument tones". *Acoustical Society of America*, Gener 2013, Vol. 133, n°1, pàg. 389-404.
- EVERITT, B. S.; SKRONDAL, A. (2010) *The Cambridge Dictionary of Statistics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- GREY, J. M. (1975) *An exploration of musical timbre* [tesi doctoral]. Stanford University, Stanford, Califòrnia.
- GREY, J. M. (1977) "Multidimensional perceptual scaling of musical timbres". *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 61, n°5, pàg. 1270-1277.
- JENSEN, K. (2002) "The Timbre Model". *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 112, n°5.
- KLINGBEIL, M. (2008) SPEAR (Versió 0.7.1). [Programari informàtic]. Recuperat a: <http://www.klingbeil.com/spear/>
- KRIMPHOFF, J.; MCADAMS, S.; WINSBERG, S. (1994) "Caractérisation du timbre des sons complexes. II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique." *Journal de physique*. Volum n°4, pàg. 625-628.
- MACCALLUM, J.; EINBOND, A. (2008) "Real-Time Analysis of Sensory Dissonance". A: KRONLAND-MARTINET, R.; YSTAD, S.; JENSEN, K.. [ed.]. *Computer Music Modeling and Retrieval. Sense of Sounds*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pàg. 157-160.
- MCADAMS, S.; GIORDANO, B. (2008) "The perception of musical timbre". A: HALLAM, S.; CROSS, I.; THAUT, M.. [ed.]. *Oxford Handbook of Music Psychology*. Oxford: Oxford University Press, pàg. 72-80.

Ó NUANÁIN, C.. (2016) RhythmCat (Versió 0.1). [Programari informàtic]. Recuperat a: <https://github.com/carthach/rhythmCAT/blob/master/README.md>

REUTER, C.; SIDDIQ, S. (2017) "The colourful life of timbre spaces". A: WÖLLNER, C. [ed.]. *Body, Sound and Space in Music and Beyond: Multimodal Explorations*. Routledge. pàg. 150-167

SANDELL, G. (1991) "A Library of Orchestral Instrument Spectra". *Proceedings of the 1991 International Computer Music Conference, ICMC 1991, Montreal, Quebec, Canada, October 16-20, 1991*. Michigan Publishing, pàg. 98 – 101.

SCHUBERT, E.; WOLFE, J. (2006) "Does Timbral Brightness Scale with Frequency and Spectral Centroid". *Acta Acustica United With Acustica*. Vol. 92, pàg. 820-825.

SCHWARZ, D.; IMTR TEAM; IRCAM. (2014) CataRT (Versió 1.2.4). [Programari informàtic]. Recuperat a: <http://imtr.ircam.fr/imtr/CataRT>

SERRA, X.; SERRA, F.; GULATI, S. (2007). sms-tools (Versió 3). [Programari informàtic]. Recuperat a: <https://github.com/MTG/sms-tools>

TERHARDT, E. (2000) *Auditory roughness* [en línia]. Technische Universität München Institut für Informations- und Kommunikationstechnik, 15 febrer 2000 [Consulta: febrer 2018]. Disponible a: <http://www.mmk.ei.tum.de/fileadmin/w00bqn/www/Personen/Terhardt/ter/top/roughness.html>

VON BISMARCK, G. (1974) "Timbre of steady sounds: A factorial investigation of its verbal attributes". *Acta Acustica United With Acustica*, Vol. 30, pàg. 146-159.

WESSEL, D. L. (1979). "Timbre Space as a Musical Control Structure". *Computer Music Journal*, IRCAM, Vol. 3, N° 2, pàg. 45-52.

WRIGHT, M. (s.d.). OSC OpenSoundControl for Pd. (Versió 1.05). [Programoteca per a Pure Data]. Recuperat a: <https://puredata.info/downloads/osc/releases>

APÈNDIX A: Estudi dels valors màxims i mínims de la llisor i asimetria espectrals

Taula amb els valors mínims i màxims de la asimetria espectral i la llisor espectral. Els resultats han estat obtinguts amb el programari, tocant amb el violí amb una tècnica de *legato*; amb unes dinàmiques contrastants de *f*, *mf* i *p*; en cordes a l'aire i amb notes amb posicions.

		<i>legato ord. f</i>	<i>legato ord. mf</i>	<i>legato ord. p</i>
Sol 2 (a l'aire)	asimetria	1,5-2,1	1,7-2,6	3,3-4
	llisor	0,002-0,005	0,004-0,009	0,007-0,02
Re 3 (a l'aire)	asimetria	2,4-3,4	2,1-3,1	3,9-4,4
	llisor	0,003-0,009	0,003-0,006	0,005-0,013
La 3 (a l'aire)	asimetria	1,8-2,5	1,5-2,6	1,7-2,5
	llisor	0,003-0,007	0,003-0,006	0,007-0,013
Mi 4 (a l'aire)	asimetria	1,3-1,9	1,2-1,9	1,8-2,7
	llisor	0,005-0,01		0,01-0,023
La 2	asimetria	1,5-1,8	1,6-2,3	2,5-4,1
	llisor	0,005-0,011	0,004-0,009	0,004-0,006
Si 2	asimetria	1,7-2,1	1,8-2,9	2,8-4,7
	llisor	0,005-0,009	0,004-0,008	0,005-0,007
Do 3	asimetria	1,5-2,1	1,8-2,8	2,9-4,3
	llisor	0,004-0,009	0,003-0,006	0,004-0,01
Re 3 (corda IV)	asimetria	1,9-2,4	2,2-2,9	3,7-4
	llisor	0,004-0,009	0,003-0,005	0,005-0,009
Mi 3 (corda IV)	asimetria	2-2,8	1,8-2,6	3,7-4,8
	llisor	0,004-0,01	0,004-0,006	0,005-0,01
Fa# (corda IV)	asimetria	1,6-2	2-2,8	2,3-3,5
	llisor	0,005-0,01	0,003-0,007	0,006-0,013
Sol (corda IV)	asimetria	1,6-2,1	1,8-2,2	2,7-3,7
	llisor	0,005-0,01	0,004-0,006	0,006-0,01
Mi 3 (III)	asimetria	1,8-2	1,4-2,7	2,8-4
	llisor	0,005-0,008	0,006-0,12	0,005-0,015
Fa# 3 (III)	asimetria	1,6-2,1	1,8-2,3	2-3,3
	llisor	0,003-0,007	0,003-0,007	0,004-0,011
Sol 3 (III)	asimetria	1,4-2	1,5-2,1	2,1-2,6
	llisor	0,006-0,011	0,005-0,013	0,006-0,013
La 3 (III)	asimetria	1,9-2,3	1,7-2,1	2,2-3
	llisor	0,004-0,008	0,005-0,008	0,005-0,015
Si 3 (II)	asimetria	1,7-1,9	1,8-2,2	2-2,6
	llisor	0,004-0,014	0,003-0,008	0,005-0,017
Do 4 (II)	asimetria	1,4-2	1,2-2,2	1,6-2,1
	llisor	0,005-0,01	0,005-0,011	0,006-0,013
Re 4 (II)	asimetria	1,6-1,7	1,7-2,1	1,8-2,2
	llisor	0,007-0,015	0,008-0,015	0,007-0,02

Mi 4 (II)	asimetria	1,7-2,3	1,7-2	1,5-1,9
	llisor	0,006-0,013	0,004-0,01	0,004-0,013
Fa# 4 (I)	asimetria	1,3-1,8	1,5-2,2	1,5-2
	llisor	0,005-0,012	0,004-0,014	0,008-0,015
Sol 4 (I)	asimetria	1,6-1,9	1,6-2,2	1,9-2,2
	llisor	0,009-0,012	0,009-0,01	0,006-0,016
La 4 (I)	asimetria	1,7-2	1,9-2,2	1,7-2,3
	llisor	0,004-0,014	0,005-0,013	0,005-0,014

APÈNDIX B: Instruccions d'ús del programari

Aquestes són les instruccions per instal·lar i utilitzar el programari.

- Instruccions -

1 – Descarregar i instal·lar el *Processing* i el *Pure Data*

- Descarregar i instal·lar el *Processing* de:
<https://processing.org/download/>
- Descarregar i instal·lar el *Pure Data – extended* de:
<https://puredata.info/downloads/pd-extended>

2 – Descarregar i instal·lar les llibreries

- Descarregar i instal·lar la llibreria *OSC* per *Pure Data* de:
<https://puredata.info/downloads/osc>
- Descarregar i instal·lar la llibreria *timbreID* per *Pure Data* de:
<https://puredata.info/downloads/timbreid>
- Descarregar i instal·lar la llibreria *OSC* per *Processing* de:
<http://www.sojamo.de/libraries/oscP5/>

3 – Descarregar el programari

- Descarregar el patch “Software (pure data).pd” i la carpeta “Software__Processing” de:
<https://www.dropbox.com/sh/jx817zbsjr5vphm/AAC11Z8LMEHQs8b8vqd4GAFa?dl=0>
- Desar-ho tot dins de la mateixa carpeta a l'ordinador.

4 – Utilitzar el programari

- Obrir el patch de *Pure Data* al *Pd-extended*. Encendre el DSP.
- Obrir l'arxiu “Software__Processing.pde” de la carpeta “Software__Processing”.
- Prémer “play” al *Processing*.

Contactar amb Carla Garcia (carlagarciag@hotmail.com) per a qualsevol dubte.

APÈNDIX C: Captures de pantalla del programari

This is a tool to analyze some of the timbrical properties of a sustained sound.
To visualize in real time:
your spectral flux, brightness, compactedness and noisiness, press play.

Play!

Theory about timbre

Bibliography

Choose your level

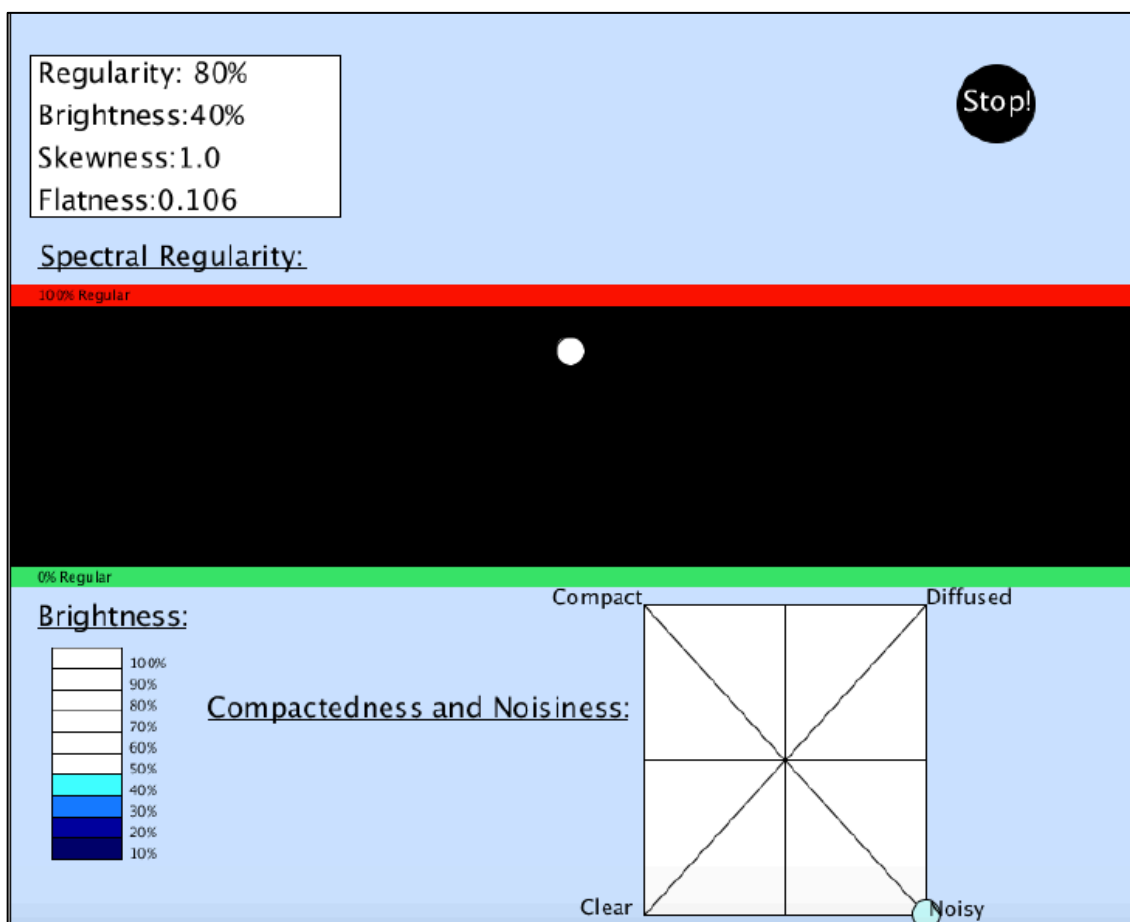
Easy

Medium

Expert

Ready!

Steady!



APÈNDIX D: Captures de pantalla del patch de Pure Data

