

Aplicación de parámetros matemáticos en un trabajo multidisciplinario de composición musical asistida por computador sobre una temática folklórica

Fabio M. Fuentes Hernández^{a,b*}

^a Doctorando en Composición Musical, Facultad de Artes y Ciencias Musicales, Universidad Católica Argentina de Buenos Aires

^b Departamento de Música, Facultad de Artes y Humanidades, Universidad de Caldas, Calle 65 No. 26-10, Manizales, Colombia.

Recibido: 11 de octubre de 2011. Aprobado: 31 de julio de 2012

RESUMEN

En el marco de un proyecto de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Caldas denominado "Resignificación músico-pictórica del mito de la Salamanca", surgió la conveniencia de aplicar y diseñar programas de fundamentación matemática que permitieran definir la estructura y el tratamiento acústico de la obra especialmente escrita para este proyecto. Principalmente me basé en la implementación de la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform) para el análisis de espectros armónicos y su modificación en vivo, y en la utilización de un entorno de programación para procesamiento de sonido en tiempo real. El marco general de la investigación parte del enfoque de Regionalismo Crítico procedente de las propuestas de Kenneth Frampton referentes originalmente a la crítica de la arquitectura. El planteamiento como investigación multidisciplinaria implica (1) una visión crítica de la sustancia mítica y social subyacente, (2) una resignificación pictórica por medio de fotografía, animación y pintura, basada en la sustancia visual que contiene el mito, (3) un enfoque musical electroacústico, a partir del material que surge del folclor local, utilizando la intervención de instrumentos en vivo y procesamiento en tiempo real.

Palabras clave: Mito de la Salamanca, composición musical asistida por computador, Transformada Rápida de Fourier, MatLab, procesamiento en tiempo real.

An application of mathematical parameters on a multi-disciplinary computer-assisted musical composition around a folkloric theme

ABSTRACT

In the context of a Research Vicerector's Office project carried out at Universidad de Caldas called "Musical-pictorial redefinition of the Salamanca Myth", the convenience of designing and applying mathematical based software which allowed the definition of structure and the acoustic treatment of the musical piece that was specially written for this project emerged. The software was mostly based on the fast Fourier transform algorithm for the analysis of harmonic spectra and their live modification, as well as the use of a programming environment for sound processing in real time. The general framework for this research has its origin in the Critical Regionalism ideas proposed by Kenneth Frampton, which originally refer to the critique of architecture. As multidisciplinary research, the approach implies (1) a critical view of the underlying mythical and social matter; (2) a pictorial redefinition by means of photography, animation and painting, based on the visual matter contained in the myth; and (3) an electro-acoustic musical approach based on the material emerging from the local folklore using the intervention of live instruments and real-time processing.

Key words: Salamanca myth, computer-assisted musical composition, Fast Fourier Transform algorithm, MatLab, real time processing.

1. Introducción

En la provincia argentina de Santiago del Estero surgió durante la Colonia una cultura criolla marginal, que entre otras cosas, supo conservar como única región argentina el idioma quechua, y desarrolló particularidades tales como una serie de mitos y leyendas de corte sincrético entre los cuales el de *la Salamanca* es de singular interés (Karlovič, 2006). El nombre de *la Salamanca* indudablemente deriva de la homónima ciudad castellana y de su

famosa universidad que en el mundo hispánico de la época era emblema de sabiduría en su más amplio sentido. Pero el nombre connota también la magia, ya que en Salamanca era famosa la iglesia de San Cipriano, el santo de la magia que según la comedia calderoniana *El mágico prodigioso*, hizo un pacto con el diablo y se salvó a duras penas. Además de eso, por alteración de "salamandra", la voz también designa ciertos batracios aborrecidos.

La Salamanca tiene historia en Santiago, pero me refiero solamente a *la Salamanca* "moderna" que describen múltiples testimonios a lo largo del siglo XX y que se ubica prácticamente en todo el territorio

* Autor de correspondencia.

E-mail: fabio.fuentes@ucaldas.edu.co (F. Fuentes)

santiagueño. Por lo general se trata de un hoyo disimulado por la espesura. Se la puede divisar auditivamente desde lejos por la presencia de música que emana de ella en determinadas horas. Para poder participar hace falta una admisión explícita que se basa en una rigurosa evaluación del coraje del postulante que comienza con el acto blasfemo de escupir una imagen de Jesucristo y/o de la Virgen. El admitido tiene que entrar desnudo y entonces se encuentra con los bichos más asquerosos que se le montan en el cuerpo y los tiene que aguantar. *La Salamanca* está presidida por la bruja, por algún animal, por un salamanquero avanzado o también por el mismo diablo. Mientras que los adeptos coloniales parecen haber acudido más que nada para aprender hechizos y para conseguir insumos de magia, *la Salamanca* moderna es esencialmente una casa de estudios diversificada donde se ofrecen carreras de magia y medicina pero también de habilidades y destrezas que el campesino considera de valor: las artes musicales ante todo, la doma y el manejo de los animales, la destreza con cuchillo y facón, la seducción de mujeres, entre otras más.

A la hora de elegir *la Salamanca* como tema de este trabajo de composición, una de las razones fundamentales ha sido el rol que juega la música en la cultura santiagueña en general y dentro del mito de *la Salamanca* en especial (ver Faberman, 2005). Es conocido el hecho de que Santiago es tierra de músicos y que la importancia de compositores, intérpretes y ritmos santiagueños dentro del folklore argentino es muy superior al peso que tiene la provincia en general. Y dentro de la institución de *la Salamanca* la música es constitutiva desde sus albores en la resistencia indígena colonial hasta nuestros días: sin música no hay *Salamanca* y la Facultad de Música siempre fue la más concurrida, porque así pondera las cosas la idiosincrasia santiagueña.

Fundamental para la estética de la obra *Salamanca* es el enfoque del Regionalismo Crítico que Kenneth Frampton desarrollara en el marco de su crítica de la arquitectura:

“La estrategia fundamental del regionalismo crítico consiste en reconciliar el impacto de la civilización universal con elementos derivados indirectamente de las peculiaridades de un lugar concreto (...). Pero es necesario distinguir entre regionalismo crítico y los ingenuos intentos de revivir las formas hipotéticas de los elementos locales perdidos” (Frampton, 1983, p. 21).

Este enfoque prohibió por lo tanto un comentario meramente ilustrativo del mito para su tratamiento plástico. Hacía falta una reinterpretación desde un punto de vista diferente que arrojaría una luz universal sobre lo histórico-local que conforma el material del mito de *la Salamanca*. El trabajo creativo con estudiantes de la Facultad de Artes y Humanidades de la Universidad de Caldas fue sugiriendo una visión urbana de la sustancia rural del mito original. Fueron entonces la estética de lo urbano y de la *identidad* los elementos que soportaron en general el proceso creativo, entendiéndolos desde el momento actual del arte y, en general, de la sociedad percibida por los jóvenes colombianos, vale decir desde la experiencia y las vivencias que tiene el joven al trasegar por la ciudad.

La interdisciplinariedad de la obra consiste esencialmente en la articulación de la música con la imagen, asumiendo los nuevos medios digitales, basados en la metodología del “stop motion” para crear una obra animada donde las disciplinas descritas se fusionan generando una propuesta plástica. Consecuente con la metodología, fue necesario escenificar las diferentes acciones del mito, recopilando cientos de miles de imágenes, cuadro a cuadro. Utilizando el software adecuado, se empleó la animación como soporte fundamental del componente de la imagen.

2. Metodología

La instrumentación de la composición *Salamanca* consta de violín/viola, guitarra, bombo, sonidos electrónicos y procesamiento en tiempo real. Para la génesis de la obra fue aplicada la Transformada Rápida de Fourier (FFT) luego de la señalización y selección de varios timbres de los instrumentos que intervendrían en la obra.

En cuanto a la señalización acústica de sonidos del bombo (instrumento muy característico del folklore santiagueño), era consciente de la inconveniencia de tomar muestras de este instrumento si lo que se deseaba era extraer componentes que sirvieran para definir un esquema de alturas para la composición. No obstante, se logró un resultado suficiente en cuanto a las posibilidades de aplicación para estructurar las ideas musicales. La estrategia inicial para abordar la pieza implicaba tomar muestras muy variadas en su forma de ataque y en cuanto a la región del instrumento en la cual se producían. Se utilizaron distintos implementos de uso tradicional como las baquetas (caso del bombo) y se exploraron diferentes timbres producto de la ejecución con los

dedos y las palmas. Finalmente, el resultado más interesante se dio al ejecutar un glissando muy corto en el extremo de uno de los parches del instrumento. Una vez realizado este proceso y obtenidas las frecuencias de los parciales, se procedió a elaborar un plan de obra que implicara el uso tanto de las técnicas de conjuntos de grados cromáticos (ver Morris, 1987) como de algunas matrices combinatorias. Para una de las secciones finales de la obra se realizó un *Patch en Max Msp* (software desarrollado por el IRCAM, París) con el fin de intervenir las alturas y modificar microtonalmente algunas de ellas durante el discurso.

Salamanca se configuró entonces, como ya se expuso, en un proyecto interdisciplinario encarado desde las tesis del Regionalismo Crítico, en el cual se trabajaron las ideas musicales a través de una metodología apropiada que reflejara la resignificación de los fenómenos acústicos de la región de Santiago del Estero, incluida la sonoridad de la lengua quichua y la música regional.

El software utilizado fue realizado en ambiente MatLab® en el marco de un proyecto de investigación realizado en la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma de Manizales (Gómez,

2009). Uno de los objetivos de dicho proyecto buscaba caracterizar el timbre de un instrumento a partir del análisis de su espectro sonoro y generar curvas de disonancia para dicho timbre empleando el análisis espectral de William A. Sethares, cuyo trabajo se ha reflejado en la utilización de escalas con diversas divisiones de la octava (5, 10, 11, 13, 17...) (Sethares,1998)¹.

Desde el punto de vista de los posibles usos planteados por Sethares, los cuales se basan en sus teorías cuantitativas de la disonancia y la relación entre el timbre y la escala, encontré de mayor interés para su aplicación el que se refiere a la exploración de sonidos inarmónicos, y que tiene que ver con la relación existente entre los intervalos y el espectro de los instrumentos. Esto permite utilizar los elementos de forma coherente ya que se trata de la utilización de las alturas más apropiadas para un timbre dado. En general, si por ejemplo se piensa en cómo se usan los instrumentos asociados a ciertas manifestaciones musicales de determinadas regiones, se podría llegar a constituir o plantear aportes significativos desde el punto de vista tímbrico, melódico, armónico, etc., por medio de esta línea de trabajo compositivo.

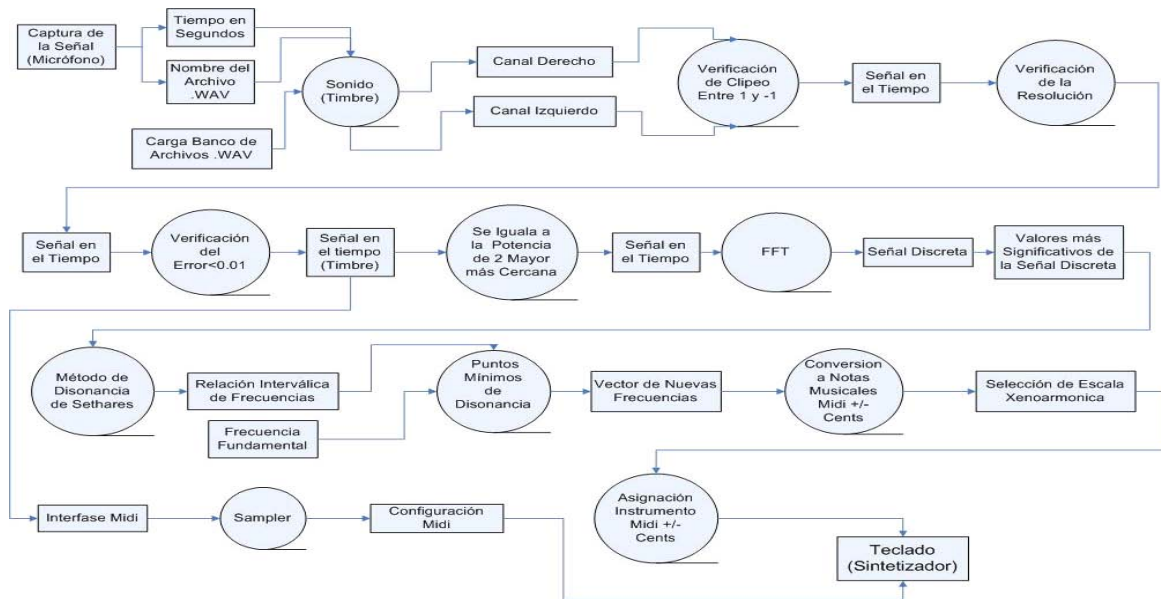


Figura 1. Modelo secuencial del diagrama de flujo de datos.

¹ Algunos antecedentes que han incidido en las tesis de Sethares se encuentran en importantes estudios a cerca de la consonancia y la disonancia, tales como los realizados por Mathews y Pierce (1980) y los de Plomp y Levelt (1965), en los que concluyeron entre otras cosas que la máxima disonancia se producía entre frecuencias cuya diferencia correspondía a 1/4 de ancho de banda crítica (la membrana basilar está compuesta por aproximadamente 24 bandas críticas con cerca de 1.300 neuronas cada una, cuyo ancho de banda varía con la frecuencia).

El planteamiento inicial para estructurar las alturas durante el proceso compositivo, fue la definición de una superposición armónica de dos conjuntos de grados cromáticos de la misma familia (4-1) [2345/89AB] (que fueron el resultado de la aplicación de la FFT) y el no uso ex profeso de transposiciones o inversiones que pudieran sustraer la típica sonoridad resultante de las alturas obtenidas. Sólo luego de la introducción y en puntos determinados de la pieza se fueron incluyendo ciertas notas faltantes del

total cromático, ya fuera con el fin de completar en ocasiones la serie de 12 semitonos, o por razón de respetar el resultado de ciertas transposiciones.

El proceso previo y las herramientas utilizadas para estructurar la pieza se ilustran en las Figuras 1 a 3. En primer lugar, en la Figura 1 se muestran los diagramas de flujo de datos utilizados para la herramienta con la cual se trabajó. Los resultados del proceso de señalización se pueden observar en las Figuras 2 y 3.

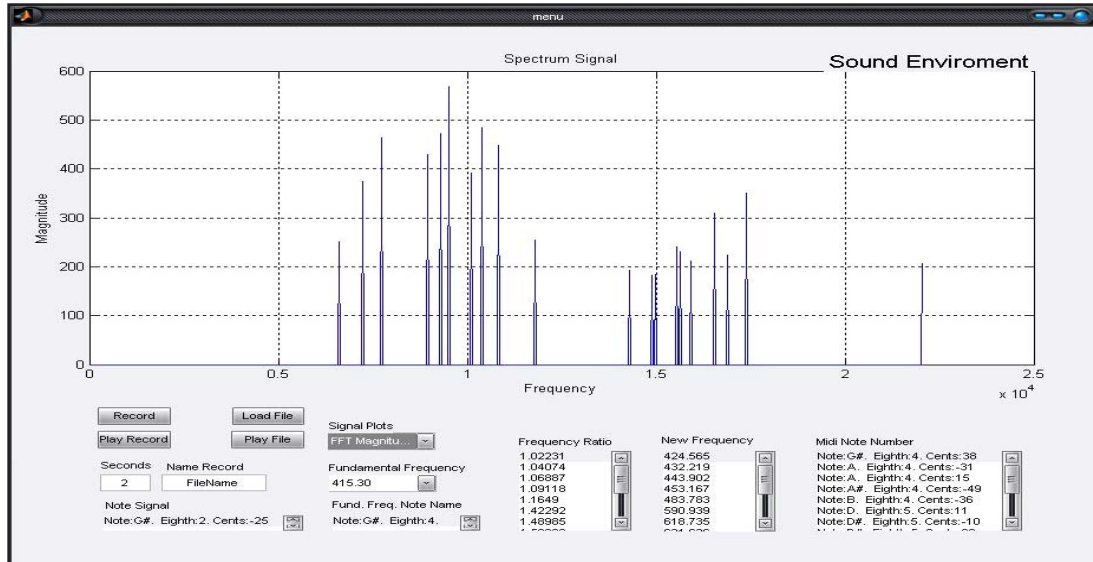


Figura 2. Espectro de la señal.

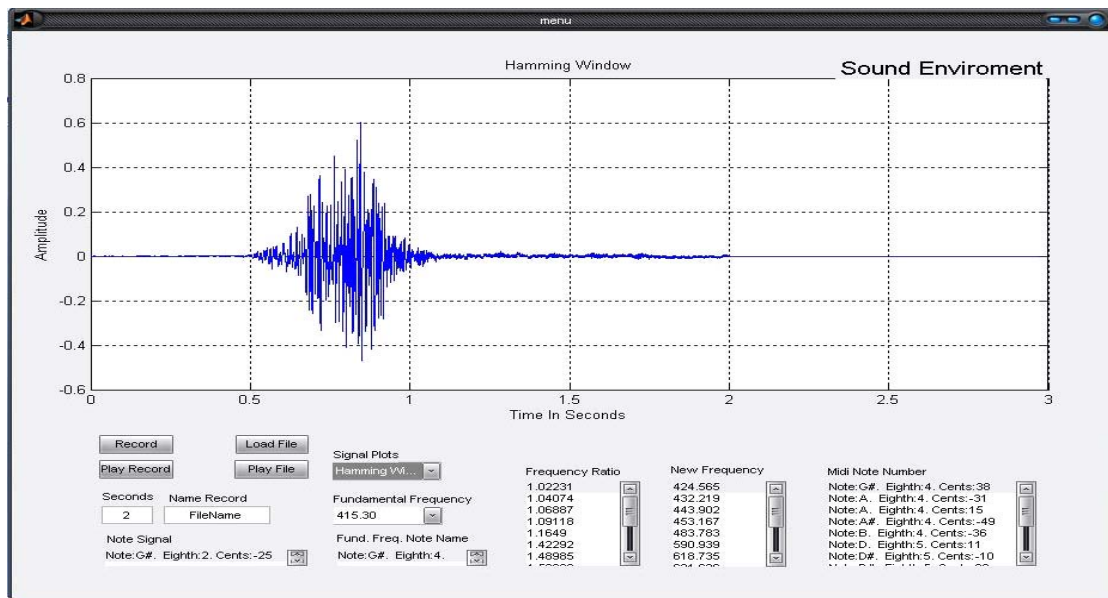


Figura 3. Ventana de Hamming.

El muestreo de esta señal (ver Figura 3) permite el análisis empleando el filtro de ventaneo (Hamming). Luego se accede a caracterizar el timbre del instrumento a partir del análisis del espectro de su sonido. En las gráficas de disonancia producidas por el programa, donde se predice la disonancia percibida para dos notas con el timbre analizado en función de la separación relativa de sus frecuencias fundamentales, se pueden apreciar varios valores mínimos en el valor de la disonancia, con sus correspondientes separaciones relativas en frecuencia con respecto a la primera nota. El programa también encuentra los valores de frecuencia relativa asociados a estos mínimos y los muestra en la ventana, donde se imprimen la frecuencia fundamental inicial, las separaciones relativas de la segunda nota asociadas a mínimos de disonancia, y los valores absolutos de frecuencia de la fundamental de la segunda nota que corresponden con los anteriores, y que se

obtienen simplemente multiplicando la frecuencia fundamental inicial por las separaciones relativas en frecuencia. El programa permite fundamentales con frecuencias entre 25,5 y 4186,0 Hz. Finalmente, con ayuda del Software AnalogX Frequency Converter o del MIDI Toolbox, es posible traducir las frecuencias obtenidas en números de nota *MIDI* y desviaciones microtonales correspondientes en cents.

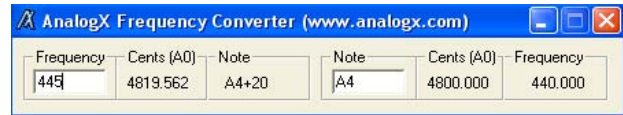
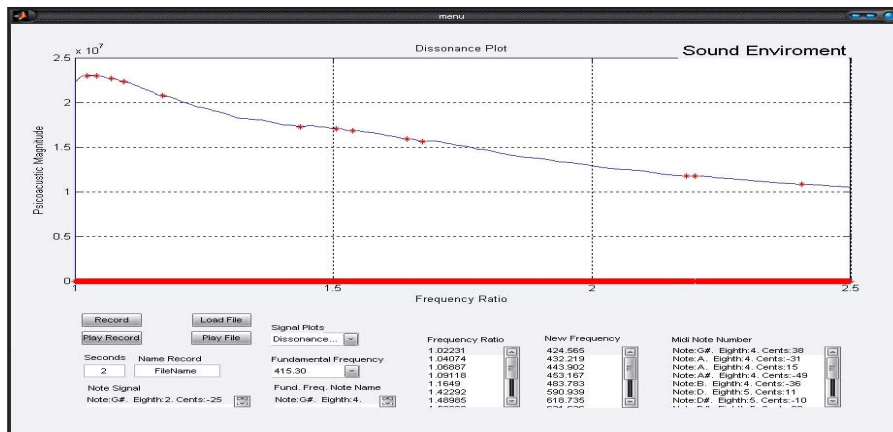
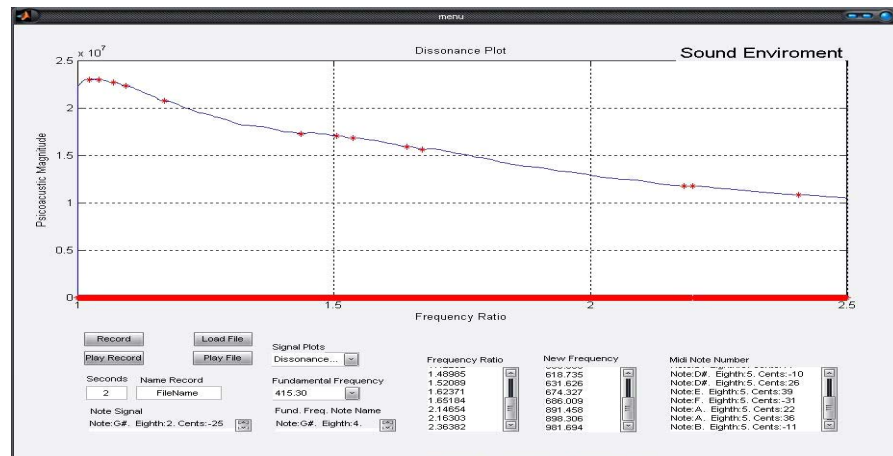


Figura 4. Software Frequency Converter.

En la Figura 4 (Software Frequency Converter), como ejemplo, se observan los datos de la frecuencia 445 (LA) más 20 centésimas.



(a)



(b)

Figura 5. Datos obtenidos de la curva de disonancia. (a) Vista 1 de la gráfica. (b) Vista 2 de la gráfica.

Partiendo de las frecuencias obtenidas (Figura 5) y el MIDI Toolbox Software Package, Copyright © 2004, University of Jyväskylä Finland (tenido en cuenta para nuevas aplicaciones en la librería de MatLab® en el desarrollo musical), se establece una relación entre la función usada *hz2midi*, con la finalidad de aplicar la conversión de los valores frecuenciales hallados en los mínimos de la curva de disonancia a su correspondiente relación *MIDI +/- cents*.

Tal como aparece en la Figura 5, las frecuencias obtenidas al señalar el glissando del bombo (cuya fundamental resultó ser G#) fueron las siguientes:

G#4 +38 cents // A4 -31 cents // A4 -15 cents // A#4 -49 cents // B4 -36 cents // D4 +11cents // D#4 -10 cents // D#4 +26 cents // E4 +39 cents // F -31cents // A5 +22 cents // A5 +36 cents // B5 -11 cents.

Luego de analizar las notas obtenidas se suprimieron aquellas que resultaron repetidas (A4, D#4, A5), eligiendo las que por su frecuencia con +

o - cents se diferenciaran al máximo entre sus vecinas. El resultado fue entonces el que sigue:

G#4 +38 cents // A4 -31 cents // A#4 -49 cents // B4 -36 cents // D4 +11cents // D#4 +26 cents // E4 +39 cents // F -31cents // A5 +22 cents // B5 -11 cents.

La secuencia de notas utilizada finalmente para la obra dentro del sistema de conjuntos de grados cromáticos generó 2 PCS /4-1 separados por una 3ª menor (2345/89AB).

Para el tratamiento microtonal se emplea un *patch* realizado en Max Msp el cual fue diseñado inicialmente con el objeto de intervenir en tiempo real las notas ejecutadas por el violín. El *patch* (ver Figuras 6 y 7) funciona de manera tal que cuando el violín ejecuta las notas “correspondientes” a los parciales obtenidos, éstas se aproximan hacia las respectivas frecuencias microtonales ascendiendo o descendiendo según lo establecido en el *patch*.

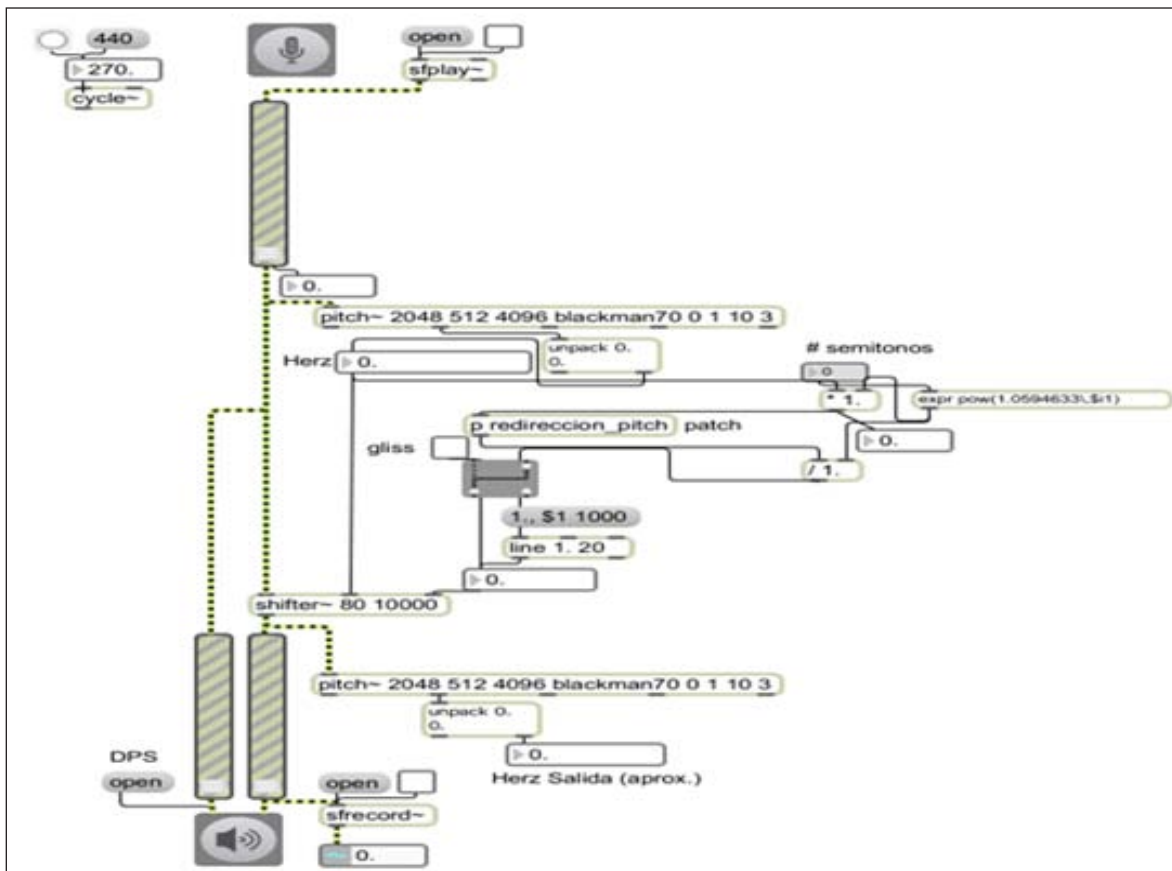


Figura 6. Modelo de Patch Max Msp direccionador de frecuencia.

En la Figura 6 se observa el *patch* de Max. En la parte superior hay 3 opciones: la de la izquierda corresponde a un seno cuya frecuencia se puede modificar, al centro aparece la señal de audio del micrófono, y a la derecha el objeto que permite abrir los archivos de audio (wav, aiff...). Las pruebas se hicieron en primer lugar con una sola frecuencia para probar que se corrigiera cualquier señal dada. Se utilizó un seno simple de 440 hz cuyo valor se eligió aproximar a 450 hz. Dado que esta frecuencia es dada por un valor numérico la corrección se hace con el objeto llamado *shifter* que multiplica una frecuencia por cualquier número deseado.

En el objeto interno llamado *redirection-pitch* se determinaron las frecuencias que ingresan de la nueva escala (parciales del bombo en este caso). Por medio de condicionales (mayor que, menor que, igual que, etc.), la frecuencia que entra (sea del seno, del micrófono o de la pista) se aproxima a la frecuencia de la nota más cercana elegida para este fin. Lo que hace este interno es calcular el número que permita multiplicar la frecuencia que entra para "cambiarla" por la más cercana de la gama.

Otro recurso de la composición lo constituye la posibilidad de utilizar glissandi entre las distintas alturas o entre las respectivas aproximaciones microtonales de cada nota temperada. Se requiere,

sin embargo, de algunos segundos para disponer del recurso en tiempo real. Prosiguiendo con la descripción del *patch* la caja que indica "# de semitonos" funciona como transpositor.

Las frecuencias del *patch* "*redirection-pitch.png*" (Figura 7) corresponden a la programación que permite aproximar las notas que entran del violín u otro instrumento y que pueden ser modificadas de acuerdo a los parciales obtenidos.

El sistema de alturas escogido para la organización de las mismas, se basa en los *pitch class sets* (PCS), conjuntos de grados cromáticos que con la aplicación de algunas matrices combinatorias (especialmente Cuadrado Romano), constituyen la base estructural de la obra (Galdo y Cetta, 2009; Cetta, 2004). Se usan también algunos subconjuntos agrupados de a 3 elementos. Aquellas notas que no hacen parte de la serie inicial fruto de la aplicación de la FFT, son incluidas en forma libre o aparecen como notas traspuestas durante el transcurso para equilibrar en ocasiones algunos pasajes cuyo color armónico puede resultar saturado, o con fines de establecer puentes de unión entre las secciones. A continuación aparecen las notas elegidas para desarrollar el trabajo, su respectiva frecuencia y clasificación alfanumérica, así como las formas de elección o agrupación de los conjuntos de grados cromáticos usados:

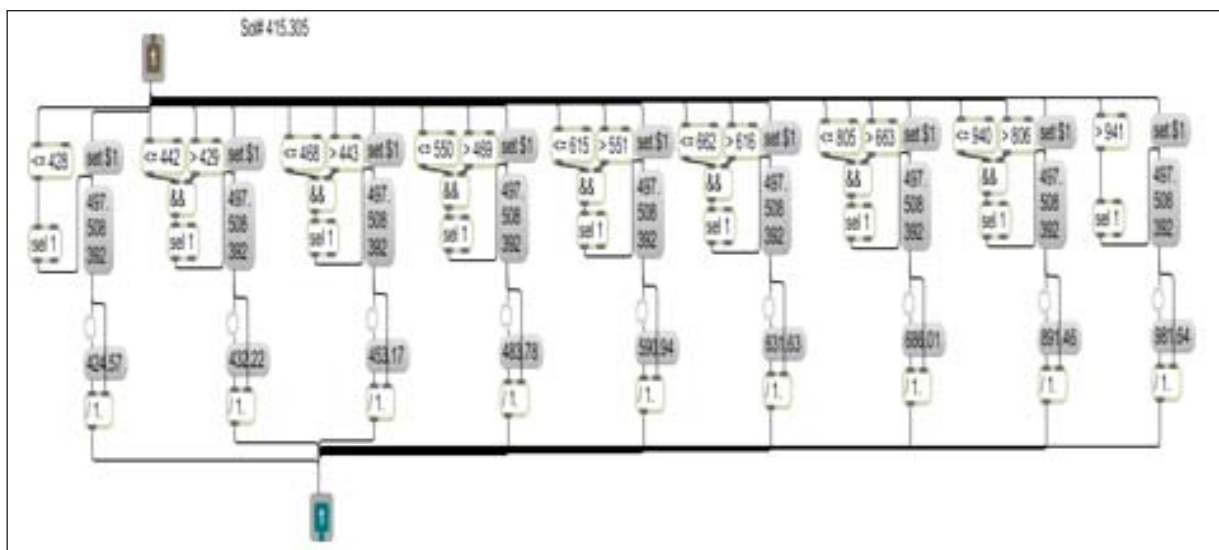


Figura 7. Frecuencias del *patch* "*redirection-pitch.png*".

NOTAS	Sol#4	La4	La#4	Si4	Re5	Re#5	Mi	Fa
FREC.(Hz)	424,57	432,22	453,16	483,78	590,94	631,62	674,32	686,009
CLASIF.	8	9	A	B	2	3	4	5

1. (89AB) / (2345) [PCS 4-1] 2 conjuntos semejantes utilizados para realizar el contrapunto entre cadenas.
2. (B234) - (9AB2) [PCS 4-4].
3. (AB23) - (8945) [PCS 4-7].
4. (8A24) [PCS 4-25].

3. Resultados y discusión

Si bien el resultado de la aplicación de los conceptos se refleja en cierta sonoridad característica, esto es intencional, en parte con el fin de sostener al máximo el color de la textura armónica que posteriormente será vinculada con un plano de texturas rítmicas asignadas para el bombo (glissandi con dedos, con baqueta y presión del parche; redobles; contrapunto rítmico con el resto de los planos, etc.). Se busca una fusión tímbrica de los resultados del sonido analizado (glissando) con el resto de los instrumentos, y además, la imitación de modos de ejecución similares entre el bombo, por un lado, y el violín y la guitarra (trémolos, por ejemplo) por el otro. Otra de las causas por la cual se privilegió la textura armónica sin mayores variaciones, es la que tiene que ver con la elaboración e intervención de una banda sonora de fondo, entre cuyos fines se encuentra el de establecer una especie de “contrapunto de planos armónicos” que incida en el color a través de batimientos, oposición de los planos o interacción de estos. En este caso sí está contemplado el uso y tratamiento de transposiciones e inversiones del material de los conjuntos.

La escritura de los instrumentos privilegia algunas de las posibilidades tímbricas de cada uno de ellos, ya sea por la forma de articular, el planteamiento de las texturas rítmico-melódicas, la posición y forma de ataque, el uso de armónicos, la oposición de planos diferentes, etc.

Los recursos utilizados para la estructuración de la obra musical por medio del desarrollo de programas y aplicaciones matemáticas como la FFT se implementaron en una determinada sección de *la Salamanca*. La forma general de la obra tiene cinco partes y su duración total es de aproximadamente 20 minutos. Como tal, la parte que corresponde al desarrollo de las ideas de este artículo es la sección C, una pieza denominada *El bombo y la ampalagua (Duelo)*,

que en total dura cerca de 6 minutos durante los cuales los instrumentistas interactúan e intervienen con el discurso del material electroacústico procesado y espacializado en vivo. La estructura general de esta pieza también comprende cinco secciones con introducción, de las cuales la última recoge los elementos tratados en este artículo. La partitura y descripción de esta sección se relaciona en la Figura 8.

Esta sección funciona como epílogo de la pieza y está hecha con el fin de facilitar la aplicación del *patch* de Max, el cual modifica microtonalmente las frecuencias de las notas ejecutadas por el violín. El pasaje del violín lo configuran rigurosamente los parciales obtenidos del glissando del bombo. Dicho pasaje es una línea melódica lenta y espaciada por silencios alternos que hacen parte de un plan previamente elaborado donde hay una aumentación progresiva de los valores de los silencios y las figuras hasta el final de la pieza. A partir de la letra F donde se presentan los 2 PCS ejes de la obra, cada conjunto de cuatro grados cromáticos ejecutado por la guitarra es reexpuesto por el violín en forma retrógrada. Así por ejemplo el primer conjunto (4325) es ejecutado luego por el violín como (5234); el segundo conjunto (BA95) en la guitarra es tomado por el violín como (59AB), etc. Durante estos últimos compases hay una combinación de los planos instrumentales a través de algunas matrices de combinación y de un contrapunto de cadenas donde el plano del violín, muy quieto, se opone al inestable plano de la guitarra. En este epílogo la guitarra es rigurosa al comienzo, con el plan de alturas asignado (2345/89AB). Posteriormente incluye las demás notas que completan el total cromático en algunos pasajes y puentes melódicos. Finaliza la pieza con acordes de la guitarra precedidos de apoyaturas, y al final un armónico de Sol# (nota fundamental de la señalización del bombo) mientras el violín culmina con una secuencia del set 4-1/(2345).

El Duelo

Figura 8. Partitura.

4. Conclusiones

El uso de la Transformada Discreta de Fourier como herramienta para la obtención de material compositivo es muy efectiva. Su uso y posterior aplicación se enriquecen al combinarse con herramientas para el control de audio y la espacialización en escena. Los resultados obtenidos de la aplicación de la FFT y su posterior diseño y agrupación en conjuntos de grados cromáticos permiten re-elaborar un material y tratarlo por medio de matrices combinatorias. El procesamiento en tiempo real a través de Max Msp posibilita

redireccionar las frecuencias microtonalmente a pesar de ser compleja su aplicación en vivo. El éxito de la puesta en escena implica un trabajo coordinado por parte de todos los actores y aspectos que intervienen en la obra. Pero es, en últimas, del control de audio y video de lo cual dependerá el resultado final. Un trabajo interdisciplinario de composición mixta de estas características requiere indispensablemente de una consola digital que permita el control del discurso musical y su adecuada relación con la obra pictórica animada.

Referencias

- Cetta P. (2004). *Principios de estructuración de la altura empleando conjuntos de grados cromáticos*, Instituto de Investigación Musicológica "Carlos Vega". Educa: Buenos Aires.
- Farberman J. (2005). *Las salamancas de Lorenza, magia, hechicería y curanderismo en el Tucumán colonial*. Siglo XXI Editores Argentina S.A. (Colección Historia y Cultura): Buenos Aires.
- Frampton K. (1983). Towards a Critical Regionalism: Six Points for an Architecture of Resistance. En: *The Anti-Aesthetic: Essays on Postmodern Culture*. Edited by Hal Foster. Bay Press: Port Townsen. pp. 16-30.
- Galdo C., Cetta P. (2009). *Apuntes del Seminario de Matemática Aplicada a la Composición Musical*. Doctorado en Música, Facultad de Artes y Ciencia Musicales, Universidad Católica Argentina.
- Gómez C.A. (2009). *Reimplementación y expansión de funcionalidad del ambiente de sonorización basado en la medición cuantitativa de la disonancia psicoacústica de Sethares*. Proyecto de desarrollo para optar a título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Manizales.
- Karlovich A. (2006). Supay y salamanca en Santiago del Estero. En: *Actas de las VII Jornadas Andinas de Literatura Latinoamericana (JALLA)*, Bogotá, Colombia.
- Mathews M.V., Pierce J.R. (1980). Harmony and nonharmonic parciais. *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(5):1252-1257.
- Morris R. (1987). *Composition with Pitch Classes: A Theory of Compositional Design*. New Haven: Yale University Press. c1987. xx, 359 p.: ill.; 26 cm.
- Plomp R., Levelt W.J.M. (1965). Tonal consonance and critical bandwidth. *J. Acoust. Soc. Am.*, 38(4):548-60.
- Sethares W.A. (1998). *Tuning, Timbre Spectrum and Scale*. Springer-Verlag, London Limited.