

COEFICIENTE CROMÁTICO DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES: ROPOSICIÓN DE UN SISTEMA PARA DETERMINAR DIVERGENCIAS TONALES GENERALES EN INSTRUMENTOS XENARMÓNICOS¹ CON RELACIÓN A LA ESCALA CROMÁTICA EQUITATIVA Y SU APLICACIÓN EN SUPERCOLLIDER.²

CENTS Y SU UTILIDAD PRÁCTICA

En 1884 el matemático y filólogo inglés Alexander John Ellis expone su trabajo *Tonometrical Observations on Some Existing non-harmonic Musical Scales*.³ Este representa un novedoso sistema para describir tonos e intervalos musicales de manera comparativa, funcionando en relación a la escala cromática en temperamento equitativo 12TET, 12TET.⁴ con una resolución de cien divisiones sobre semitono denominados cents. Ellis comprendió que dicha forma de división era suficiente para la descripción de cualquier tipo de sistema musical, ya que el oído humano es insensible a dicho intervalo,⁵ haciendo una división de mayor denominador innecesaria. Así, su trabajo ponía fin al antiguo modo de descripción de tonos y sistemas armónicos por medio frecuencias, en el cual, si bien eran posibles definiciones bastante específicas de altura de un tono individual, se dificultaba el estudio de sistemas musicales completos, debido a la falta de especificación escalar, y a la manera logarítmica en que las frecuencias se incrementan de una octava a otra en su relación ascendente.⁶ La utilidad del sistema propuesto por Ellis ha sido probada en diversas oportunidades, en áreas como la afinación de instrumentos, la comparación de sistemas de afinación, en estudios musicológicos y etnomusicológicos, convirtiéndolo en uno de los sistemas estándar en el análisis de relaciones entre intervalos frecuenciales. Por esta razón, una mirada detallada a dicho sistema se hace necesaria. Desde el punto de vista de las relaciones de intervalos, el cálculo en cents puede ser realizado de la siguiente manera:

$$C = \frac{\log_{10}(r)}{\log_{10}(2)} * 1200$$

donde r es la relación del intervalo a determinar. Así por ejemplo, para una quinta en entonación justa, con relación de 3/2= 1.5, su valor en cents es de:

$$\frac{\log_{10}(1.5)}{\log_{10}(2)} * 1200 = 701.955 \text{ Cents.}$$

Para una definición del valor en cents con frecuencias se pueden utilizar cualquiera de las siguientes formulas: $1200 * \log_2(f_2/f_1)$ ó $3986.31371 * \log_{10}(f_2/f_1)$.

En las formulas anteriormente expuestas f_2 es la frecuencia aguda expresada en Hertz (Hz), f_1 es la frecuencia grave en Hz (siempre con menor valor), y 3986.31371 o 1200, representan una constante k, que para la segunda ecuación, por ejemplo, proviene de la división de 1200 unidades en el logaritmo base diez de la relación de octava (2/1):

$$\frac{\log_{10}(1.5)}{\log_{10}(2)} * 1200 = 701.955 \text{ Cents.}$$

LOS CENTS Y SU CAPACIDAD RELACIONAL

A pesar de las bondades del sistema propuesto por Ellis, este sistema se limita a describir las interválicas de los tonos en el continuo cromático, representándolas en cents. Así, las relaciones interválicas son propuestas de manera individual, para cada tono de un instrumento, sin tener en cuenta la relación general del instrumento con la escala cromática como "cuadrícula" comparativa. Esto hace factible incurrir en errores de definición interválica por asociación incorrecta. Por ejemplo: en la aplicación actual del sistema de cents es factible definir como segunda mayor un intervalo compuesto por La4 menos 60 cents, y Si4 más 80 cents, cuando en realidad dicho intervalo sería mejor identificado como; Sol4 más 40 cents y Do5 menos 20 cents.⁸

Así mismo, otro problema en la actualidad es que no existe un sistema que determine cuál es la "variación cromática general" de un instrumento con respecto a la escala cromática temperada. Es decir, que distanciamiento cromático "total" poseen todos los tonos de dicho instrumento con relación al sistema 12TET. Dicha herramienta facilitaría, por ejemplo, la comparación de dos o más instrumentos con relación a su variación cromática general. De la misma manera, dicho sistema aportaría también en la comparación de un mismo tipo de instrumento elaborado por diferentes maestros constructores. Por otro lado, permitiría también comparar diversos sistemas musicales en relación a su variación cromática general, y facilitaría determinar procesos históricos de transformación, y/o adaptación, de sistemas o instrumentos musicales de diversas índoles.

Por estas razones, se propone a continuación un sencillo sistema que asume la adopción de un coeficiente cromático

general para instrumentos de diversa afinación. Este, determina de manera unitaria que grado de "alteración" cromática posee dicho instrumento, teniendo en cuenta las relaciones más aproximadas de sus tonos con respecto a los de la escala cromática 12TET. En otras palabras, el procedimiento determina que tanta variación cromática general posee un instrumento y su conjunto de tonos con respecto a la escala cromática de temperamento equitativo, utilizando para este propósito el sistema de Ellis como punto de referencia.

SISTEMA DE COEFICIENTE CROMÁTICO, GENERALIDADES.

Si examinamos un tono en particular, producido por un instrumento xenarmónico, podemos deducir que en relación al tono vecino más cercano de la escala 12TET, este solo puede alejarse en 50 cents, ya que posteriormente se encontraría en una posición más cercana a otro tono de dicha escala. Por esta razón, es factible asumir que dicho intervalo (50 cents) representa un 100% de "distancia" tonal con relación al tono de la escala cromática a la cual se aproxima. De esta forma podemos determinar un porcentaje de "desviación cromática" de un tono en particular, su coeficiente cromático representado en porcentaje, simplemente multiplicando por dos. Por ejemplo, 40 cents representarían un 80% de desviación, 30 cents un 60% y así sucesivamente. Para la determinación de un porcentaje de variación cromática general de un instrumento se propone una aproximación sencilla: El coeficiente cromático de un instrumento puede ser determinado sumando los porcentajes de los tonos individuales, dividiendo dicho porcentaje en el número de tonos y posteriormente dividiendo dicho valor en 100. Esto nos determinaría un número que fluctúa entre 0 y 1, el coeficiente de cromatización del instrumento en cuestión. Así por ejemplo, si nos presentaran un instrumento que tuviera cinco tonos, con porcentajes de desviación individual de 80, 10, 20, 15 y 20 por ciento, tendríamos un coeficiente cromático de: $((80+10+20+15+20)/5)/100=0.29$.

Es necesario indicar que dicho coeficiente representa una fluctuación entre una escala cromática equitativa utilizada en la actualidad, donde $A=440\text{Hz}$, y una escala cromática equitativa imaginaria, alejada de la primera en donde $A=452.89\text{Hz}$ (a 50 cents de distancia). Dicho de otra forma, el coeficiente fluctuaría entre cero y uno. Cero, cuando nuestro instrumento hipotético se encuentra "perfectamente" temperado con la escala cromática equitativa actual ($A=440\text{Hz}$). Uno, cuando nuestro instrumento se encuentra "perfectamente" temperado con la escala cromática equitativa imaginaria ($A=452.89\text{Hz}$), a una distancia de 100% de desviación cromática, es decir a 50 cents, máxima variación que se puede alcanzar con el sistema de Ellis sin estar más cerca de otro tono. Esto por supuesto no representa las distribuciones tonales de instrumentos xenarmónicos en la realidad. Los instrumentos musicales fluctuarían entre uno de estos dos polos cromáticos.

COEFICIENTE EN SUPERCOLLIDER (SC)

A continuación se explica paso por paso la deducción del coeficiente cromático por medio del software de libre distribución SuperCollider. Como primera medida, se plantea el desarrollo y utilidad de un método denominado *frcents*, este permite la conversión de relaciones de frecuencias a cents, de manera individual o por escalas. Posteriormente se explica la conversión de cents a porcentajes y la función individual que permite extraer el coeficiente cromático de los instrumentos a partir de los porcentajes. Por último, se examina el desarrollo y funcionalidad del pequeño sistema general que concreta en un solo proceso los procedimientos expuestos.

MÉTODO FRCENTS

Si tenemos en cuenta que la mayoría de medios electrónicos de análisis sonoro presentan resultados en Hertz,⁹ es necesario construir un método que nos permita realizar todo el proceso de deducción del coeficiente de variación a partir de resultados frecuenciales (en Hertz). Para este objetivo se desarrolla un método en el software SuperCollider que calcula relaciones interválicas en cents, a partir de la fórmula: $1200 * \log_2(f_2/f_1)$. El método se ha denominado *frcents*, por su trabajo de conversión de relaciones de frecuencias *fr* (Frequency Ratio) a cents. Dicho método no es otra cosa que la implementación de la fórmula de conversión de frecuencias a cents en SuperCollider:

Sintaxis de implementación:¹⁰

```
frcents{^this.collect{arg fr;(1200* log(fr))/log(2)}}
```

Ejemplo de utilización individual del método entre B4 (493.883Hz) y A4(440Hz), (siempre la frecuencia más alta de primero):

Sintaxis:

```
[493.883/440].frcents
```

Resultado: [199.99894404834]. 200= Un tono.(relación en cents).

El método *frcents* también puede ser utilizado en escalas completas, comparando por ejemplo, varios tonos de un instrumento con la escala cromática, solo para determinar sus divergencias en cents. A continuación se utiliza un instrumento hipotético de tres tonos, obteniendo los valores en cents de cada uno de los intervalos generados con relación a los tonos más cercanos en la escala 12TET. Los valores del instrumento propuesto sobre los valores más cercanos de la escala cromática son:¹¹

Instrumento hipotético.	Escala cromática.
A4 +12Cents)=443Hz	A4= 440.
D4 (+48Cents)= 302.	D4 = 293.66.
G4 (+35Cents) = 400.	G4 = 392.00.

Sintaxis del método frcents:

[443/440, 302/293.66, 400/392].frcents

Resultado: [11.76381003978, 48.482139378416, 34.97561480138](Relaciones en cents).

PORCENTAJES Y FUNCIÓN DEL COEFICIENTE

En este apartado se expone el modo de obtener los porcentajes de desviación cromática, y la reducción de los decimales en dichos porcentajes (con el fin de facilitar su manipulación), utilizando los resultados del apartado anterior:

Sintaxis para los porcentajes:

([11.76381003978, 48.482139378416, 34.97561480138]*2).round(0.01)

A partir de dichos porcentajes se implementa una función que determina el coeficiente de alteración que posee un instrumento en particular con relación a la escala cromática. [12](#)

Ejemplo de la función con los resultados anteriores:

Siendo (a) el conjunto de porcentajes de los tonos.

a.sum , la sumatoria de dichos porcentajes.

a.size , el número de tonos.

Sintaxis de la función:

~coef={ |a| ((a.sum /a.size)/100)};

Con los porcentajes anteriormente extraídos:

~coef.value(a= [23.53, 96.96, 69.95]);

Resultado:0.6348 (coeficiente cromático del instrumento).

PROCESO COMPLETO

Si bien, todos los procesos anteriormente mencionados pueden ser utilizados de manera individual, y el coeficiente cromático de un instrumento puede ser determinado siguiendo los pasos uno por uno, como se ha demostrado anteriormente, es necesario plantear también un sistema que nos permita acceder al coeficiente desde las frecuencias (en Hz) de manera unitaria y eficiente. El siguiente código reúne todos los pasos anteriores, haciendo el proceso computable en un solo paso: Primero, convierte las frecuencias en cents. Después, convierte los cents en porcentajes. Por último, permite la obtención del coeficiente cromático general del instrumento de manera inmediata. Todo esto es expresado por su resultado, el cual expone los porcentajes de variación cromática para cada uno de los tonos del instrumento y el coeficiente cromático general del mismo:

Sintaxis:

```
//
( ~coeficiente=( ( //
//
~t1t1= [443/440 ].frcents.round(0.01);
~t2t2= [302/293.66 ].frcents.round(0.01);
~t3t3= [400/392].frcents.round(0.01);
);
(
//
~porcentajes1= ~t1t1*2;
~porcentajes2= ~t2t2*2;
~porcentajes3= ~t3t3*2;
);
(
```

```
//Función
//sumatoria de porcentajes, cantidad del grupo, etc.
[~porcentajes1,~porcentajes2,~porcentajes3];
c.value;
n=c.size;
t=c.sum;
("porcentajes =" ++ c.value).postln;
);
//función del coeficiente, en el grupo.
~coef2={ |c| (( t/n)/100)};

("coeficiente =" ++ ~coef2.value. round(0.001))
);
); Resultado:
Porcentajes (de variación cromática para cada tono):[ [ 23.52 ], [ 96.96 ], [ 69.96 ] ]. (%)
Coeficiente cromático general del instrumento =[ 0.635 ].
```

Para la utilización del código con instrumentos reales simplemente deben ingresarse las frecuencias en Hz en los campos denominados ~t1t1, ~t2t2 y ~t3t3. Si se requiere comparar más tonos que los propuestos en el ejemplo es necesario adicionar posiciones en los procesos del sistema. Por ejemplo, para analizar un instrumento pentatónico sería necesario adjuntar; ~t4t4 y ~t5t5. Así mismo, sería imperativo adjuntar los siguientes campos de porcentaje:~porcentajes4= ~t4t4*2; ~porcentajes5= ~t5t5*2.

También se hace necesario agregar dichos campos de porcentajes en la variable c. Por ejemplo: c=[~porcentajes1, ~porcentajes2, ~porcentajes3, ~porcentajes4, ~porcentajes5];

En cuanto a los resultados extraídos del análisis anteriormente expuesto podemos proponer que el número 0.635 representa el coeficiente cromático general del pequeño instrumento hipotético. Este coeficiente nos indica que el instrumento posee una alta tendencia a la separación con relación a la escala cromática (A=440). Recordando los resultados en cents de sus tonos con respecto a sus próximos vecinos en la escala cromática (11.76381003978, 48.482139378416, 34.97561480138), y los porcentajes individuales de dichas relaciones (23.53, 96.96, 69.95), podemos argumentar que el coeficiente se ve influenciado por la "lejanía tonal" de los dos últimos intervalos, siendo contrastada por una sola relación próxima la escala cromática en 12TET (A=440).

EXPRESIÓN GRÁFICA

Pensar los intervalos en porcentajes, con relación a 50 cents, nos facilita expresar las variaciones cromáticas para cada tono de manera gráfica, y las relaciones de distanciamiento cromático entre los tonos. Esto es una particularidad del entendimiento de 50 cents como 100% de la variación cromática posible, a diferencia del pensamiento tradicional en el que comparamos en 100 cents, sobrepasando algunas veces el porcentaje de máximo distanciamiento. En el siguiente ejemplo podemos observar el nivel de distanciamiento de cada tono del instrumento con respecto a su tono más cercano en la escala cromática, así como también la relación entre los tonos. En la tabla, el cero representa el tono ideal de la escala 12TET para cada intervalo, y los puntos en la línea azul representan los tonos del instrumento hipotético, donde uno representa el mayor nivel de distanciamiento posible que un tono puede poseer con respecto al sistema 12TET:

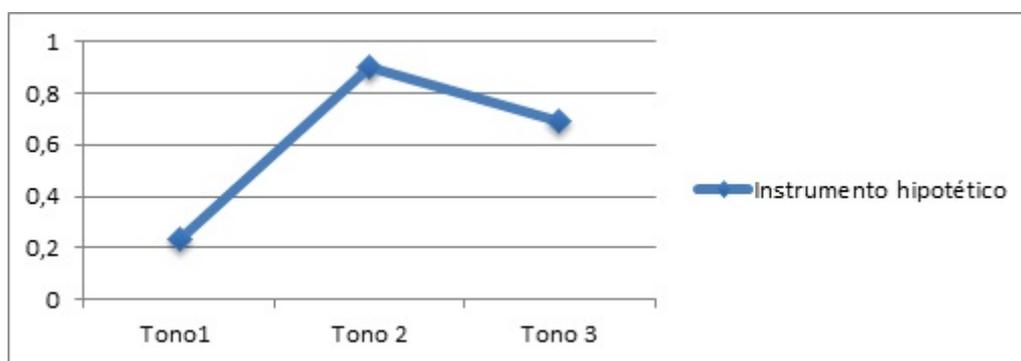


Tabla 1. Gráfica de la relación absoluta de los tonos del instrumento hipotético con respecto a la escala cromática en 12TET. 1 representa el 100% de desviación posible: 50 cents.

DEMOSTRACIÓN DEL COEFICIENTE CROMATICO EN UN SIKU CONSTRUIDO POR EL AUTOR

Los sikus¹³ son flautas pánicas formadas por hileras de tubos cerrados en su extremo inferior y ordenados de menor a mayor longitud. Estos instrumentos se construyen de diferentes materiales, en los sitios arqueológicos se les han

encontrado elaboradas de cerámica, hueso, piedra y caña. Junto con las queñas, las flautas pánicas son los instrumentos más representativos del universo musical andino, en parte por que su interpretación y elaborados sistemas musicales pueden ser datados mucho tiempo antes de la llegada de los españoles.¹⁴ El instrumento incluido en este trabajo, denominado siku blanco, fue construido por el autor a partir de tubos de PVC.¹⁵ Su elaboración propone una escala creada de manera arbitraria, teniendo en cuenta las necesidades de este estudio. Su cualidad modal "caótica" produce una línea melódica particular, que no se corresponde con las sonoridades y funciones tonales de sus familiares andinos.

Siku Blanco:



Foto 1: Siku Blanco. Tomada por el autor, el 3 de febrero de 2014.

Dimensiones del siku blanco:

diámetros internos de los tubos 1.2 cm

siku blanco (11 tubos), longitud: 47, 40.7, 37.8, 34.4, 29.2, 24.8, 23.6, 22, 20.5, 19 y 17.1cm.

Escala:

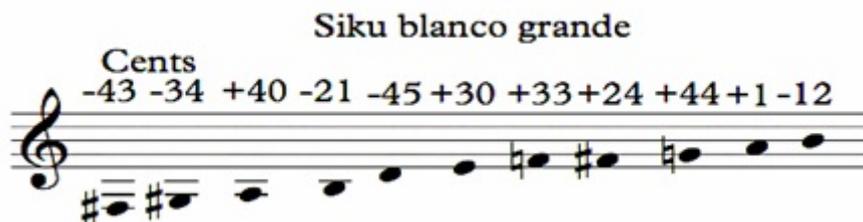


Fig. 1: Escala del siku blanco.¹⁶

Tonos en Hz del siku blanco:

180.5, 203.6, 225.2, 244, 286.2, 335.4, 356, 375.2, 402.2, 440.3, 490.4.

Tonos cercanos en Hz de la escala cromática en 12TET:

F#3=185.00, G#3=207.65, A3=220.00, B3=246.94, D4=293.66, E4=329.63, F4=349.23, F#4 = 369.99, G4=392.00, A4 = 440.00, B4 = 493.88

COEFICIENTE CROMÁTICO EN EL SIKU BLANCO¹⁷

Resultados:

Porcentajes =[[85.26], [68.2], [80.88], [41.48], [89.1], [60.08], [66.48], [48.42], [88.94], [2.36], [24.48]]. (%)

Coeficiente =[0.596].

Teniendo en cuenta estos resultados podemos proponer que el siku blanco es, en su generalidad, un instrumento que se aleja de manera significativa de la escala cromática en 12TET. Esto es debido a su alto coeficiente cromático; 0.596, el cual se determina claramente por el porcentaje de desviación cromática de los tonos de manera individual. Así, para las notas 1,3,5 y 9, esta diferencia se encuentra entre el 80% y el 90%, un porcentaje de divergencia cromática bastante alto. Estas cuatro notas representan un 36.36% del total de los tonos existentes en el instrumento (poco más de una tercera parte). Un porcentaje menor de diferencia cromática se encuentra en sus notas 2,4,6,7,8, las cuales fluctúan entre el 40% y el 70%. Estas cinco notas representan un 45.45% de los tonos totales del instrumento. Sin embargo, es necesario aclarar que este conjunto de cinco notas, que se encuentran en un rango medio de desviación cromática, promedia en general un 57% de dicha variación, lo cual incrementa levemente el coeficiente general del instrumento. Por el contrario, en los tonos 10 y 11 el porcentaje es de 2.36% y 24.48% respectivamente. Estos porcentajes reducen el coeficiente cromático general del instrumento, pero debido a que los 2 tonos que presentan esta cualidad solo corresponden al

18.18% de la escala del instrumento, su bajo porcentaje de variación no es suficiente para determinar que el instrumento se acerca a la escala cromática en 12TET (A4=440). Por el contrario, los tonos restantes si presentan desviaciones significativas en relación a la escala cromática 12TET, y su número, en relación al número total de tonos, es bastante elevado, propiciando que el coeficiente cromático general del instrumento aumente.

Así mismo, resulta interesante estudiar por este medio comparativo el comportamiento de los intervalos de la escala del instrumento. Por ejemplo, es valioso observar que los tonos 1,3,5 (F#3, A3,D4), proponen una tríada de D en primera inversión la cual posee un grado de desviación cromática más o menos equivalente entre sus componentes: 85.26%, 80.88%, 89.1%. Tal cualidad refuerza el comportamiento tríadico (armónico) de estos intervalos, en comparación con las estructuras tríadicas de la escala cromática 12TET. Esto sucede por que dicha estructura tríadica esta dada por la relación de proximidad de los valores de los porcentajes entre sí, no por el valor absoluto de dichos porcentajes. Por otra parte, un comportamiento similar es encontrado en las notas 2,4,6 del instrumento. Estas conforman también un acorde tríadico, esta vez de E en primera inversión. La diferencia cromática de los tonos de esta tríada demuestra también un grado de equivalencia significativo: 68.2%, 41.48%, 60.08%. Sin embargo, dicha equivalencia es menor a la encontrada en la primera tríada expuesta, ya que el tono 4 posee un 41.48% de esta distancia cromática, mientras que los tonos 2 y 6 poseen una desviación de 68.2% y 60.08% respectivamente. Esto implica que dicha tríada es menos regular en comparación a la escala cromática en 12TET que la tríada expuesta en principio. Por otra parte, estos procedimientos porcentuales también se presentan como una herramienta bastante propicia si se desea analizar los intervalos desde el punto de vista de la construcción diatónica (por segundas). Un ejemplo de esta cualidad se produce al observar los tonos 7,8,9,10 y 11. En estos, los grados de desviación cromática resultan bastante dispares entre sí. Para el tono 9, es de 88.94%, mientras el tono 10 posee tan solo el 2.36%. De la misma manera es necesario observar que en conjunto, la secuencia de segundas propuesta posee también un grado de desviación bastante dispar con respecto a sus respectivos tonos en la escala cromática en 12TET: 66.48%, 48.42%, 88.94%, 2.36%, 24.48%. A pesar de esto, es necesario exponer también que existe entre las segundas un comportamiento secuencial que parece generar un cierto grado de equivalencia cromática entre los grados 7 y 8, y los grados 10 y 11, ya que estos poseen porcentajes más o menos aproximados entre sí: 66.48% y 48.42% para los tonos 7 y 8, y 2.36% y 24.48% para los tonos 10 y 11. Por el contrario, el tono 9 no se aproxima a ninguno de los dos intervalos consecutivos a el. Esto genera una disparidad en dicha relación, es decir; no existe un grado de equivalencia de estos intervalos con respecto a los intervalos presentados por sus tonos relativos en la escala cromática en 12TET.

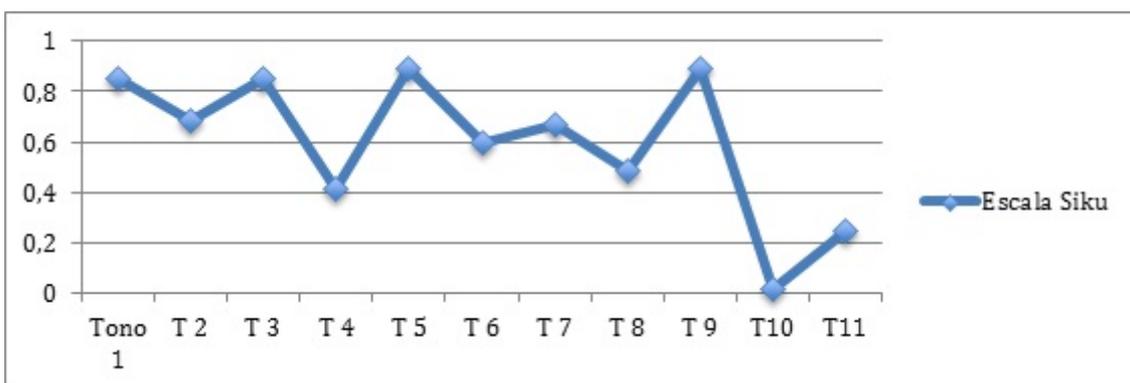


Tabla 2: Escala completa del siku blanco, en relación absoluta a los tonos más cercanos en la escala cromática en 12TET. (1 =100% de desviación posible: 50 cents.)

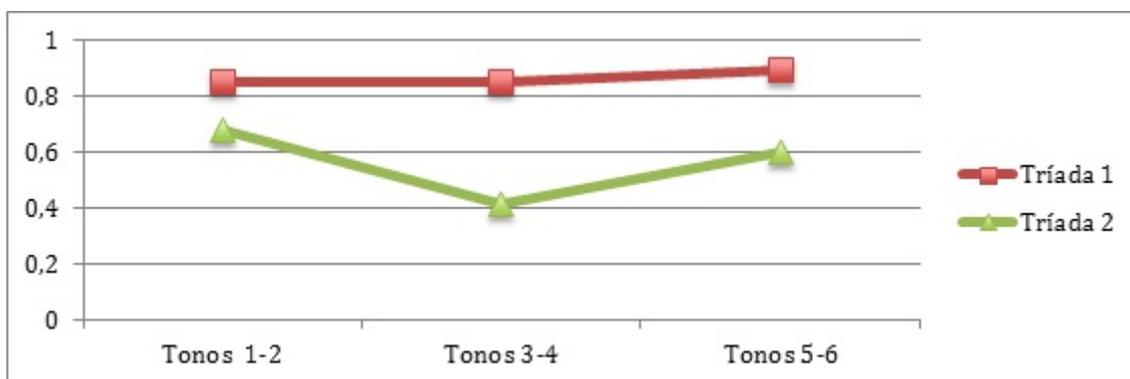


Tabla 3: Tríada uno y tríada dos. Nótese la relación de concordancia de las tríadas con respecto a la escala cromática en 12TET.

Esta relación es representada gráficamente por el paralelismo con las líneas de nivel de porcentaje. La tríada uno es claramente más concordante con la escala cromática que la tríada dos.

CONCLUSIONES

Las comparaciones anteriormente propuestas exponen la validez de la utilización del coeficiente cromático general como herramienta de medición de la variación cromática de un instrumento xenarmónico con respecto a la escala cromática en temperamento equitativo. Así mismo, los resultados exponen también esta herramienta como medio de comparación de los grados de desviación cromática de las notas del instrumento de manera individual. A su vez, es importante anotar que los procedimientos expuestos permiten la determinación de la relación de sus tonos con respecto a las estructuras interválicas en la escala cromática en 12TET, lo que facilita analizar comparativamente estructuras tríadicas, diatónicas, cuartales o de cualquier otra índole que se presenten en las escalas estudiadas.

De la misma manera, los resultados del análisis nos permiten argumentar también que instrumentos con bajo coeficiente cromático, i.e. 0.1 o 0.2, tienden a aproximarse a la escala cromática equitativa y podrán ser representados sonoramente (o musicalmente) con mayor facilidad por instrumentos que adopten dicha escala. En contraste, instrumentos que tengan un alto coeficiente cromático, y aquellos que presenten altos grados de disparidad en sus interválicas, como el ejemplar analizado en este trabajo, serán más difíciles de representar sonoramente, en parte porque sus tonos se desvían en mayor proporción y de diversas formas en relación a los tonos más próximos a ellos en la escala cromática en 12TET.

Las cualidades analíticas de las herramientas expuestas en este trabajo se suman al sistema propuesto por Alexander Ellis en 1884, en un esfuerzo por mejorar nuestra comprensión de los instrumentos musicales y de las músicas que con ellos se produce. La utilización de estos medios queda a la disposición del lector, quien podrá hacer uso de los mismos en los diversos casos que se le puedan presentar, o a su vez podrá proponer también transformaciones a los métodos expuestos con el fin de desarrollar una mejor herramienta de análisis de los instrumentos musicales, lo cual engloba estos medios de análisis dentro de la lógica del código libre y la libre transmisión de la información.

BIBLIOGRAFÍA

- Cottle, D. (2011). Beginner's tutorial. En Scott Wilson, D. Cottle y N. Collins (Eds.). *The SuperCollider Book*, p. 3-54. Londres: The MIT Press.
- Ellis, A. (1884) *Tonometrical Observations on Some Existing Non-Harmonic Musical Scales* Proceedings of the Royal Society of London. Vol. 37, 368-385.
- Ellis, Alexander (1875). Notes. En A. Ellis (Ed.). *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. Cambridge: Dover.
- Fletcher, N. (2005). Stopped-pipe wind instruments: Acoustics of the panpipes. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol 117, No 1, pp. 370-374.
- Glasier, J. (1997). *Ivor Darreg and the Xenharmonics*, Bibliography by Jonathan Glasier. Perfect Sound Forever. Online music magazine. en: <http://www.furious.com/perfect/xenharmonics.html>
- Gruszczynska-Ziólkowska, A. (2009). Variedad sonora de las antaras de nasca: ¿Un caos o el sistema?. *Revista Española de Antropología Americana*, Vol. 39, No 1, pp. 145-168.
- Loy, G. (2006). *Musimathics, Vol 1: The mathematical Foundations of Music*. Cambridge: The MIT Press.
- Olsen, D. A. (2002). *Music of El Dorado. The Ethnomusicology of Ancient South American Cultures*. Gainesville: University Press of Florida.
- Rasch, R. (2002). Tuning and temperament. En (ed.). Thomas C. *The cambridge history of western music theory*, p. 193-222 Cambridge: Cambridge University Press.
- Sachs, C. (1947). *Historia Universal de los instrumentos Musicales*. Buenos Aires: Ediciones Centurión.
- Vega, C. (1946). *Los instrumentos musicales aborígenes y criollos de la Argentina*. Buenos Aires: Ediciones Centurión.
- Zannos, I. (2011). Programming in SuperCollider. En Scott W., David C. y Nick C. (Eds.). *The SuperCollider Book*. Londres: The MIT Press. pp. 127-178.

ANEXO 1. ESCALA CROMÁTICA 12TET

Tabla con la escala cromática equitativa y sus valores en Hertz. Se utiliza para la comparación con los tonos instrumentales.

C0 = 16.35 Hz C#0 = 17.32 D0 = 18.35 D#0 = 19.45 E0 = 20.60 F0 = 21.83 F#0 = 23.12 G0 = 24.50 G#0 = 25.96 A0 = 27.50 A#0 = 29.14 B0 = 30.87 C1 = 32.70 C#1 = 34.65 D1 = 36.71 D#1 = 38.89 E1 = 41.20 F1 = 43.65 F#1 = 46.25 G1 = 49.00 G#1 = 51.91 A1 = 55.00 A#1 = 58.27 B1 = 61.74	C4 = 261.63 Hz C#4 = 277.18 D4 = 293.66 D#4 = 311.13 E4 = 329.63 F4 = 349.23 F#4 = 369.99 G4 = 392.00 G#4 = 415.30 A4 = 440.00 A#4 = 466.16 B4 = 493.88 C5 = 523.25 C#5 = 554.37 D5 = 587.33 D#5 = 622.25 E5 = 659.26 F5 = 698.46 F#5 = 739.99 G5 = 783.99 G#5 = 830.61 A5 = 880.00 A#5 = 932.33 B5 = 987.77	C8 = 4186.01 Hz C#8 = 4434.92 D8 = 4698.64 D#8 = 4978.04 E8 = 5274.04 F8 = 5587.66 F#8 = 5919.92 G8 = 6271.92 G#8 = 6644.88 A8 = 7040.00 A#8 = 7458.62 B8 = 7902.14 C9 = 8372.02 C#9 = 8869.84 D9 = 9397.28 D#9 = 9956.08 E9 = 10548.08 F9 = 11175.32 F#9 = 11839.84 G9 = 12543.84 G#9 = 13289.76 A9 = 14080.00 A#9 = 14917.24 B9 = 15804.28
C2 = 65.41 Hz □ C#2 = 69.30 □ D2 = 73.42 □ D#2 = 77.78 □ E2 = 82.41 □ F2 = 87.31 □ F#2 = 92.50 □ G2 = 98.00 □ G#2 = 103.83 □A2 = 110.00 □ A#2 = 116.54 □ B2 = 123.47 □ C3 = 130.81 □ C#3 = 138.59 □ D3 = 146.83 □ D#3 = 155.56 □ E3 = 164.81 □ F3 = 174.61 □ F#3 = 185.00 □ G3 = 196.00 □ G#3 = 207.65 □ A3 = 220.00 □ A#3 = 233.08 □ B3 = 246.94	C6 = 1046.50 Hz □ C#6 = 1108.73 □ D6 = 1174.66 □ D#6 = 1244.51 E6 = 1318.51 □ F6 = 1396.91 □ F#6 = 1479.98 □ G6 = 1567.98 □ G#6 = 1661.22 □ A6 = 1760.00 □ A#6 = 1864.66 □ B6 = 1975.53 □ C7 = 2093.00 □ C#7 = 2217.46 □ D7 = 2349.32 □ D#7 = 2489.02 □ E7 = 2637.02 □ F7 = 2793.83 □ F#7 = 2959.96 □ G7 = 3135.96 □ G#7 = 3322.44 □ A7 = 3520.00 □ A#7 = 3729.31 □ B7 = 3951.07	C10 = 16744.04 Hz □ C#10 = 17739.68 □ D10 = 18794.56 □ D#10 = 19912.16 □ E10 = 21096.16 □ F10 = 22350.64 □ F#10 = 23679.68 □ G10 = 25087.68 □ G#10 = 26579.52 □ A10 = 28160.00 □ A#10 = 29834.48 □ B10 = 31608.56 □ C11 = 33488.08

ANEXO 2. CÓDIGO DEL COEFICIENTE CROMÁTICO DEL SIKU BLANCO

```
//
(
~coeficiente=(
(
//Conversión a cents de las frecuencias
~t1t1= [185/180.5].frcents.round(0.01);
~t2t2= [207.65/203.6].frcents.round(0.01);
~t3t3= [225.2/220.00].frcents.round(0.01);
~t4t4= [246.94/ 244 ].frcents.round(0.01);
```

```

~t5t5= [293.66/286.2].frcents.round(0.01);
~t6t6= [335.4/329.63].frcents.round(0.01);
~t7t7= [356/349.23 ].frcents.round(0.01);
~t8t8= [375.2/369.99].frcents.round(0.01);
~t9t9= [402.2/392.00].frcents.round(0.01);
~t10t10= [440.3/440].frcents.round(0.01);
~t11t11= [493.88/490.4].frcents.round(0.01);
);
(
// convierte cents en porcentajes (cents*2)
~porcentajes1= ~t1t1*2;
~porcentajes2= ~t2t2*2;
~porcentajes3= ~t3t3*2;
~porcentajes4= ~t4t4*2;
~porcentajes5= ~t5t5*2;
~porcentajes6= ~t6t6*2;
~porcentajes7= ~t7t7*2;
~porcentajes8= ~t8t8*2;
~porcentajes9= ~t9t9*2;
~porcentajes10= ~t10t10*2;
~porcentajes11= ~t11t11*2;
);
//
(
convierte cents en porcentajes (cents*2)
~porcentajes1= ~t1t1*2;
~porcentajes2= ~t2t2*2;
~porcentajes3= ~t3t3*2;
~porcentajes4= ~t4t4*2;
~porcentajes5= ~t5t5*2;
~porcentajes6= ~t6t6*2;
~porcentajes7= ~t7t7*2;
~porcentajes8= ~t8t8*2;
~porcentajes9= ~t9t9*2;
~porcentajes10= ~t10t10*2;
~porcentajes11= ~t11t11*2;
);
//
(
//Función
//sumatoria de porcentajes, cantidad del grupo, etc.
c= [~porcentajes1,~porcentajes2,~porcentajes3, ~porcentajes4, ~porcentajes5, ~porcentajes6, ~porcentajes7,
~porcentajes8, ~porcentajes9, ~porcentajes10, ~porcentajes11];
c.value;
n=c.size;
t=c.sum;
("porcentajes =" ++ c.value).postln;
);
//función del coeficiente, en el grupo.
~coef2={ |c| (( t/n)/100)};
("coeficiente =" ++ ~coef2.value. round(0.001))
);
);

```

1 Vocablo propuesto por el compositor norteamericano Ivor Darreg. Denomina instrumentos o música cuyo sistema de afinación difiere de la escala 12TET.

2 SuperCollider es un poderoso lenguaje de programación, específico para la síntesis de audio y la composición algorítmica. Sin embargo, su utilidad se extiende también a otros ámbitos que van por ejemplo, desde lo generativo multimedial a lo musicológico. Para una completa revisión de las posibilidades del programa SuperCollider véase: Cottle (2011) y Zannos (2011). Para la descarga de SuperCollider visite: <http://supercollider.github.io/download.html>

3 Ellis (1884).

4 12TET.Twelve Tone Equal Temperament.

5 La diferencia apenas perceptible (DAP) en relación al tono es aproximadamente 5 o 6 Cents. Responde a la ley Webern-Fechner, la cual estipula que la intensidad en la percepción de un estímulo es siempre proporcional al logaritmo de la intensidad de dicho estímulo: $S=K \cdot \log_e E+C$. Siendo S=sensación, E=estímulo y K La constante de Webern, diferente para cada modalidad sensorial.

6 El sistema Cents es una unidad logarítmica de medida, dando cuenta a la manera en que percibimos el sonido los seres humanos. Otro sistema logarítmico de medición frecuencial es la escala mel, utilizada ampliamente en el procesamiento de señales y en acústica del habla.

7 Vid: Loy (2006:45), Rasch (2002:210) y Ellis, en Helmholtz (1954: 446).

8 Dicha asociación interválica incorrecta es encontrada en la literatura etnomusicológica ocasionalmente. Por ejemplo; en Olsen (2002: 41). Este autor, en el estudio de cuatro flautas prehispánicas de la cultura Nasca en Perú, expone que la primera de estas posee un tono Fa#5 más 60 cents, proponiendo que su relación con los tonos inmediatamente anterior y posterior se expresa por una interválica de terceras cuando dicha relación cambia completamente si se tiene en cuenta que el tono Fa#5 más 60 cents en realidad se encuentra en mayor cercanía a Sol5 y estaría mejor expresado de esta manera en el sistema de Ellis.

9 Algunos programas de análisis espectral que permiten la definición frecuencial de las fundamentales: Spear, AudioSculpt, SuperCollider, Lara y Pratt.

10 Para su utilización es necesario implementar dicho método en la librería de SuperCollider que maneja las colecciones secuenciales: **SequenceableCollection**. Para dicha operación se escribe **SequenceableCollection** y se resalta dicha frase. Acto seguido se utiliza **command i** para buscar las librerías, se abre la librería de **SequenceableCollection** (que debe aparecer resaltada), se adjunta a la librería el método (tal como está escrito en la sintaxis) y se aplica **command shift l** para releer dicha librería.

11 En el ejemplo se utilizan tonos que poseen frecuencias superiores a los de escala cromática. Las comparaciones pueden ser realizadas también con frecuencias inferiores a las encontradas de la escala cromática, siempre y cuando estos representen los puntos de mayor cercanía con respecto a los tonos del instrumento. En este caso, por consecuencia con la fórmula que nos permite expresar los intervalos en cents, es necesario utilizar las frecuencias de la escala cromática primero (como f2). También es posible utilizar el método de manera conjunta, es decir, tonos con relación inferior y superior a la escala cromática, sin que esto altere el porcentaje de dicho intervalo ya que el porcentaje es absoluto.

12 Se pueden utilizar los valores de la escala cromática 12 TET en Hz, los cuales son referidos en el anexo 1.

13 La denominación siku proviene de la lengua Aymara, sin embargo, también son conocidos como antaras en quechua y zampoñas en español. "La voz sico aparece ya en el vocabulario que el padre Bertonio formó en 1612. 'Unas flautillas atadas como ala de órgano' —dice Bertonio... La flauta de pan tiene, además, muchos otros nombres: ayarichic, pfucu, arca, ira, sanja, hampa, taica hirpa, malta, chiru, tuto, huayra-puhura"(Vega, 1946:203).

14 Véase por ejemplo: Gruszczyńska-Ziółkowska (2009).

15 Sachs (1947:187-188) propone que las flautas pánicas suramericanas pueden tener algún tipo de influencia de oriente, resaltando similitudes constructivas y tonales que estas tienen con las flautas pánicas de melanesia y del este asiático.

16 La escala del siku fue extraída por medio del análisis espectral del instrumento realizado en el programa AudioSculpt. Este análisis permitió la extracción de las frecuencias fundamentales y sus parciales principales. Los sikus poseen espectros donde los armónicos impares demuestran mayor amplitud que los armónicos pares. Las octavas del espectro —al menos en los registros bajos— pierden

relevancia, siendo superadas en amplitud por la quinta existente en el tercer armónico y la tercera en el quinto. A pesar de esto, las amplitudes de los armónicos pares son considerables y juegan un rol importante en la definición general de su complejo sonido. Fletcher (2005) propone que existe una diferencia considerable en el timbre de las flautas pánicas cuando estas son interpretadas en el estilo que denomina "percusivo", o cuando se intenta mantener los sonidos por largos períodos de tiempo. Fletcher expone también que el modo de interpretación percusivo es el más común en la Región Andina, mientras que en Europa los tonos en las flautas pánicas son interpretadas con mayor sostenimiento. En el primer caso, los armónicos parecen fluctuar de manera más errática, generando mayor inarmonicidad y un mayor componente de ruido. Esto sucede en parte por la "ampliación" de las resonancias debido al efecto de la turbulencia de la corriente de aire (Fletcher, 2005:374). En el segundo caso los armónicos se vuelven un poco más estables y la componente de ruido pierde algo de preponderancia en el timbre. A pesar de estas particularidades los espectros de los sikus parecen mantener su estructura impar con armónicos más o menos bien definidos, aproximadamente hasta el armónico siete, en donde el espectro parece perder energía y definición. Para información sobre el programa AudioSculpt, véase: <http://anasynth.ircam.fr/home/english/software/audiosculpt>

17

<http://anasynth.ircam.fr/home/english/software/audiosculpt>"); onmouseout="tooltip.hide();">16

<http://supercollider.github.io/download.html>, consultado el 20 de mayo del 2010.