

# Descripción de redes musicales y composición pseudo-aleatoria

Lucio García, Lucas Longo, María Luz Vercesi

Redes Complejas  
12 de diciembre de 2018

## 1. Introducción

Desde la antigua Grecia, Platón y Aristóteles tuvieron interés en entender y explicar a la música como algo más que un simple sonido agradable al oído. Desde ese entonces, se han inventado distintos métodos de notación musical para caracterizar el proceso creativo, representando las escalas e instrumentos que existen desde la prehistoria.

Pero ¿qué es la música? y ¿por qué hay canciones más pegadizas y que nos gustan más que otras? Para poder responder esa pregunta tenemos que introducir los conceptos más básicos del análisis. La percepción musical está basada en el procesamiento de información acústica: implica el análisis de patrones espaciales a lo largo del órgano auditivo receptor generado por sonidos aislados o superposiciones sonoras, y también el análisis de patrones temporales de largo plazo generado por líneas melódicas. El cerebro humano instintivamente procesa sonidos incluso cuando las circunstancias ambientales no lo requieren, como instinto de supervivencia en su entorno humano. La respuesta a la música está determinada, además de por estos mecanismos nerviosos innatos, por las asociaciones evocadas por comparación con información almacenada en experiencias previas, es decir que está condicionada culturalmente.[1] Por esta razón, limitamos el análisis a géneros occidentales, como la *música clásica* (o *música académica*) y el *rock*. Como punto de partida a la pregunta ¿qué es la música?, decidimos tomar la frase del músico argentino, Charly García, quien en una entrevista responde ante la misma pregunta: “[...] para mí la música es melodía, armonía y ritmo.”

### 1.1. Ritmo

La música es un fenómeno temporal y para representarla se utilizan diferentes figuras que indican la duración de un sonido, en relación a una duración patrón. En la Fig.1 están representadas las figuras más utilizadas y sus respectivas duraciones en relación a la unidad, en este caso representada por el valor de una redonda. Así por ejemplo en un tiempo de redonda pueden sonar: 2 blancas, 4 negras, 8 corcheas, etc. Para cada una de estas figuras existe un silencio de igual tiempo de duración, y con igual nombre. Así un silencio de blanca dura lo que dura una blanca. En Fig.2 se muestra la notación musical utilizada para los silencios. El ritmo puede definirse como la combinación de figuras de distinta duración. Podemos encontrar patrones rítmicos que caracterizan a un determinado tipo de música, como rock, jazz, bossanova, candombe, carnavalito, etc. En general para describir el ritmo es suficiente contar con un único timbre o frecuencia del sonido. Cuando al ritmo se le agregan además notas con distintas frecuencias es cuando nace la melodía.

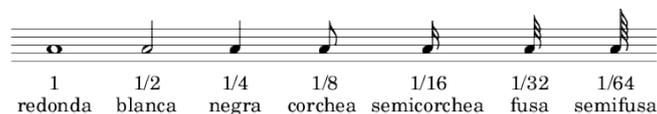


Figura 1: Pentagrama con los símbolos que representan las distintas figuras o duraciones de las notas.



Figura 2: Pentagrama con los símbolos que representan las distintas duraciones de los silencios.

## 1.2. Melodía

La melodía es el ejemplo más simple de mensaje musical, una secuencia de sonidos sucesivos, cada uno con cierto tono o frecuencia. Una característica de las melodías es que la secuencia de tonos se da en forma de saltos discretos, seleccionando valores de frecuencias finitos (de los infinitos valores disponibles). Esta selección se da instintivamente al buscar la sensación dinámica de urgencia a resolver en sonidos “placenteros” (*consonantes*) a partir de sonidos “molestos” (*disonantes*).

El mecanismo nervioso que procesa un mensaje musical sólo analiza transiciones de altura y no la “altura absoluta” (excepto en individuos con *oído absoluto*). En análisis musical, para prescindir de la altura absoluta, cada nota se analiza según su posición en la escala (*grado musical*), y se representa mediante un número romano. Además, cada grado posee un nombre que se relaciona con la función que cumple dentro de la escala. Por ejemplo, el grado de V o *dominante* es el que genera tensión y necesidad de resolución en la nota que le da el nombre a la escala, que es el grado I o *tónica*. En la Fig. 3 se pueden ver todas las notas correspondientes a la octava 4, con el nombre del tono y el grado en la escala de Do Mayor.

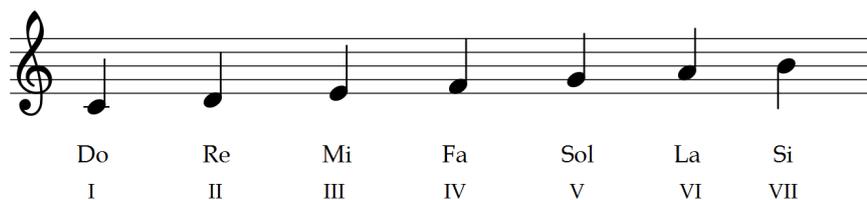


Figura 3: Pentagrama que presenta todas las notas de la escala de Do Mayor dentro de una octava, mostrando su nombre y también su grado en la escala.

Por la capacidad humana de procesar y recordar secuencias de sonidos, las obras musicales suelen estar caracterizadas por motivos. El motivo es una frase musical corta, la unidad mínima con sentido musical e identidad, que funciona como elemento generador de elaboraciones. Está construido por organizaciones rítmico-melódicas mínimas, llamadas células. Caracteriza a una composición por ser una figura recurrente que tiene cierta importancia.

## 1.3. Armonías

Retomando las ideas de consonancia y disonancia, sensaciones subjetivas asociadas con dos o más sonidos que suenan simultáneamente, se puede hablar de armonía, el estudio de las notas simultáneas (acordes) y del enlace entre ellos. <sup>1</sup> Un acorde consiste en un conjunto de hasta 7 notas distintas, aunque los más frecuentes son los acordes de 3, 4 y 5 notas, que suenan simultáneamente y que se encuentran entre sí a intervalos de tercera. Todo acorde posee una nota que le da su nombre y es llamada nota fundamental, aunque a veces se le da el nombre del grado de la nota fundamental en la escala de la tonalidad. Por ejemplo, si estamos en la tonalidad de Do Mayor, el acorde de Do Mayor es el acorde de I grado, el acorde de Fa Mayor es el acorde de IV grado y el acorde de Sol Mayor es el acorde de V grado.

De acuerdo a la relación de intervalos (distancias entre tonos) de las demás notas del acorde con su fundamental, es que pueden existir distintas clases de acordes para crear diferentes sensaciones: mayores, menores, disminuidos, aumentados, de 7ª menor, de 7ª mayor, etc. Los acordes se van a ir sucediendo a lo largo de una canción y formando lo que se llama una progresión armónica. Ésta se utiliza para generar diferentes sensaciones a lo largo de una canción como puede ser la tensión o la relajación. En la Fig. 4 se muestra una progresión de cuatro acordes correspondientes a los grados I, IV, V y nuevamente I.

## 2. Armado de las redes

Todos los grafos y el análisis de ellos se realizaron utilizando Python 3, en particular los paquetes NetworkX, MultinetX y Music21. A su vez, fue necesario un lector y editor de partituras, en cuyo caso utilizamos el software libre MuseScore, que también nos permitió descargar de forma gratuita las partituras hechas por sus usuarios.

En el presente trabajo se construyeron 5 tipos de grafos: de ritmo, de melodía por nota absoluta, de melodía por grado, de armonías dirigido y de armonías no-dirigido. Para las redes de melodía, nos basamos en la forma de representación de las redes musicales de los trabajos de Tse (2008)[2], Liu (2009)[3] y Useche Ramírez (2012)[4]. En dichos trabajos, los nodos de las redes melódicas representan a las notas por su tono y su duración. De esta

<sup>1</sup>Se puede decir que la armonía hace referencia al aspecto vertical de la música (notas simultáneas, que en la partitura se escriben una sobre otra), mientras que la melodía lo hace al aspecto horizontal (sucesión de notas, que se escriben una detrás de otra).

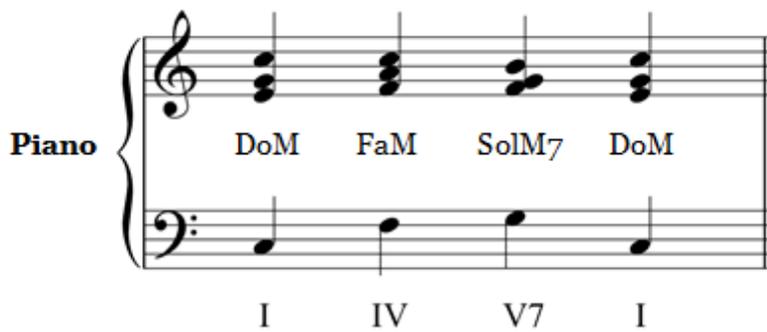


Figura 4: Progresión armónica en piano frecuentemente utilizada en canciones populares. El pentagrama de arriba contiene acordes de tres notas, y el pentagrama inferior, las notas fundamentales de los mismos. En números romanos se indica el grado en la tonalidad de Do Mayor. El acorde de V crea tensión mientras que el de I crea relajación. Todos son acordes Mayores, y el de V es un acorde de 7ª (la nota Re está omitida).

forma una nota La de frecuencia 440Hz y duración de negra es un nodo diferente a una nota La de la misma frecuencia pero de duración de corchea.

En los tres primeros grafos (el de ritmo y los dos de melodía) se utilizó el criterio de co-ocurrencia para enlazar las notas. Este criterio consiste en crear un enlace entre dos notas cuando una suena después de la otra y el enlace es dirigido en la dirección de avance de la música. En las Figs. 5 y 6 puede verse la forma de enlace para una voz rítmica (sin tono, sólo duraciones) y otra melódica (varias notas) respectivamente.

En el caso del grafo de ritmos (R), el nombre de los nodos se refiere únicamente al valor de la duración de la figura, utilizándose en nuestro caso como referencia el valor de tiempo de una negra (duración de una negra = 1 unidad). En cuanto a los grafos melódicos y de grado (M y G) existe una diferencia en cuanto al etiquetado de los nodos. En el grafo M, los nodos contienen como información el nombre de la nota y su duración, mientras que en el grafo G, las notas están etiquetadas por su distancia a la nota tónica, que depende de la tonalidad de la canción. Si bien esta diferencia es irrelevante a la hora de analizar una sola canción, cobra importancia al unir los grafos de dos canciones que se encuentren en dos tonalidades diferentes. La forma de evitar una transposición melódica de todos los temas a una misma tonalidad es la de etiquetar a los nodos por su grado musical en vez de por el nombre de la nota, con lo cual el grafo G será importante a la hora de unificar canciones y, por ejemplo, crear grafos de un solo artista.<sup>2</sup>

Al considerar la visualización, parametrizamos las posiciones de los nodos en forma de espiral, de manera tal que a medida que la frecuencia de la nota aumenta, también lo hace su radio. El ángulo con el eje  $x$  se tomó de manera tal que nodos que representan las mismas notas en distintas octavas tengan el mismo ángulo, y entre ellas sólo se diferencian por el radio. Un ejemplo de esto se puede ver en la Fig. 7 donde se representan todas las notas de la escala de Do Mayor para dos octavas distintas, diferenciadas entre sí por el color; en el mismo, la nota La está ubicada siempre sobre el semieje  $y$  negativo, y la nota Do está ubicada siempre sobre el semieje  $x$  positivo; la distancia al centro de ambas depende de la octava, ya que a medida que aumenta la octava también lo hace la frecuencia.

Los enlaces son dirigidos y además pesados según la frecuencia de aparición.

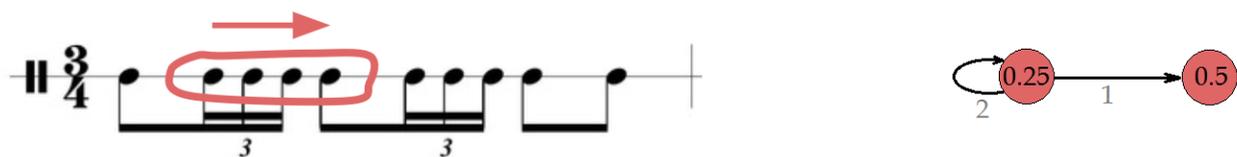


Figura 5: Esquema demostrativo de cómo fueron armados los nodos y enlaces para los grafos de ritmo. Cada nodo lleva como nombre la duración únicamente. Los números en los enlaces dirigidos son los pesos, dados por la frecuencia de aparición.

En el caso del armado de las redes de armonía, el primer paso es moverse a lo largo de una cierta voz con contenido armónico, y realizar una recolección de todas aquellas notas que aparecen sonando en simultáneo; estas notas se agrupan y cada grupo se ordena de la nota más grave a la más aguda. Ya que cada conjunto puede tener distinta cantidad de notas, los vamos a llamar una  $k$ -armonía, donde el  $k$  identifica el tamaño. En

<sup>2</sup>Se podría realizar un grafo en el cual no importe la distancia a la tónica sino únicamente el grado, pero en este caso sólo habría 7 nodos para cada duración, y esto no permite realizar estadística.

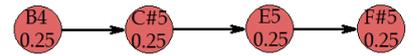


Figura 6: Esquema demostrativo sobre cómo fueron armados los nodos y enlaces para los grafos de melodía y grado. Cada nodo lleva como nombre la nota y la duración. Los enlaces son dirigidos según la progresión musical, y además pesados según la frecuencia de aparición.

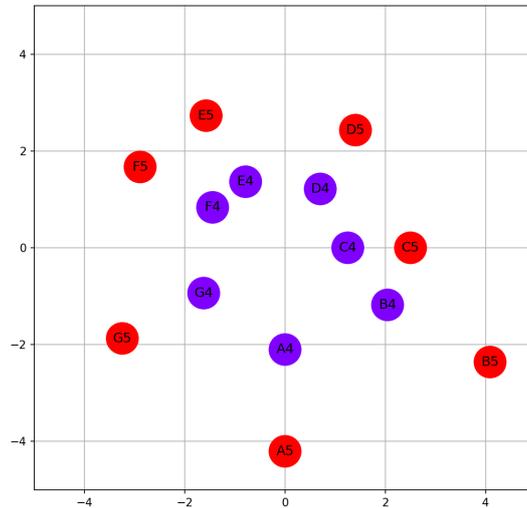


Figura 7: Ejemplo de cómo se ubican los nodos de una escala de Do Mayor con la parametrización en espiral. Los colores identifican el número de octava.

la Fig.8 podemos encontrar conjuntos de notas que suenan simultáneamente y que pertenecen a una 2-armonía y a una 3-armonía.

Existen dos tipos de grafos que son posibles armar dependiendo de la elección de los nodos, pudiéndose elegir entre usar notas o conjunto de notas como nodos. El primer tipo de grafo es un grafo de armonía no dirigido (AuD), en el cual los nodos son notas y las mismas están enlazadas cuando suenan simultáneamente. Además, para mantener la información de si dos notas sonaron en armonías de distinto tamaño, el grafo es multienlace, de manera tal que entre dos notas pueden haber enlaces distintos si sonaron dentro de distintas k-armonías. Además estos enlaces se encuentran pesados por la frecuencia de aparición a lo largo de la obra.

El otro tipo de grafo que se puede realizar es un grafo de armonías dirigido (AD). Este grafo es el que más difiere de los anteriores, ya que los nodos son k-armonías, es decir, cada nodo contiene a un conjunto de notas. En este caso el enlace entre dos nodos se realiza por co-ocurrencia, es decir, cuando un acorde suena un tiempo inmediatamente posterior a otro. Además los enlaces son dirigidos en la dirección de avance de la música. La Fig. 8 muestra las dos formas de construir grafos de armonías. El caso violeta corresponde a la construcción del grafo AuD y el caso verde al grafo AD. En la sección 5.2 *Armonías* explicaremos más en detalle cómo poder construir estos grafos.

### 3. Análisis

El análisis fue realizado utilizando principalmente los grafos R, M y G (ritmo, melodía, grado).

Para poder realizar un análisis efectivo, a lo largo de este trabajo se tuvieron que crear distintas funciones para el armado y el análisis de las redes. Como se mencionó en la introducción, se analizaron géneros occidentales como la música clásica y el rock. Se consideraron alrededor de 20 obras para los siguientes compositores y cantautores: W. A. Mozart y J. S. Bach, Charly García y The Beatles. Debido a la poca disponibilidad de partituras de estos últimos dos artistas no se pudo realizar un análisis correspondiente a las etapas musicales de cada uno.

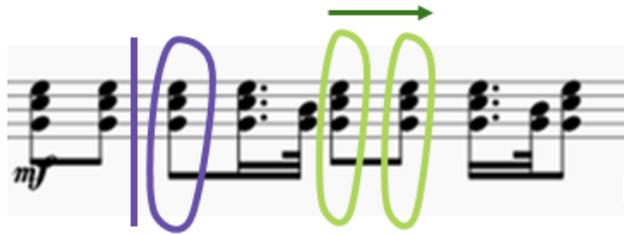


Figura 8: Esquema demostrativo de como fueron armado los nodos para los grafos de armonía. En violeta la construcción del grafo no-dirigido AuD y en verde del grafo dirigido AD.

A su vez, el análisis está dividido en dos partes: un análisis para todas las voces que componen las obras, en donde se aglomeraron los instrumentos para la construcción de los grafos, y un análisis para la voz principal, en donde fueron seleccionadas cuidadosamente las voces melódicas de cada obra y unidas para armar las redes.

### 3.1. Análisis todas las voces

Se comenzó realizando los grafos de melodía, ritmo y grado uniendo todas las voces de cada partitura. Para ello se utilizó la función *f-compose* que se encuentra en el repositorio del trabajo. Su función consiste en crear una nueva red apilando los nodos de la intersección dos grafos manteniendo y sumando los pesos de los enlaces de ambos, al mismo tiempo que agrega los nodos y enlaces complementarios. Luego se unieron todos los grafos correspondientes a distintas canciones. Este proceso fue realizado para cada artista, en donde se obtuvieron las redes que se muestran en las Figs. 9, 10 y 11

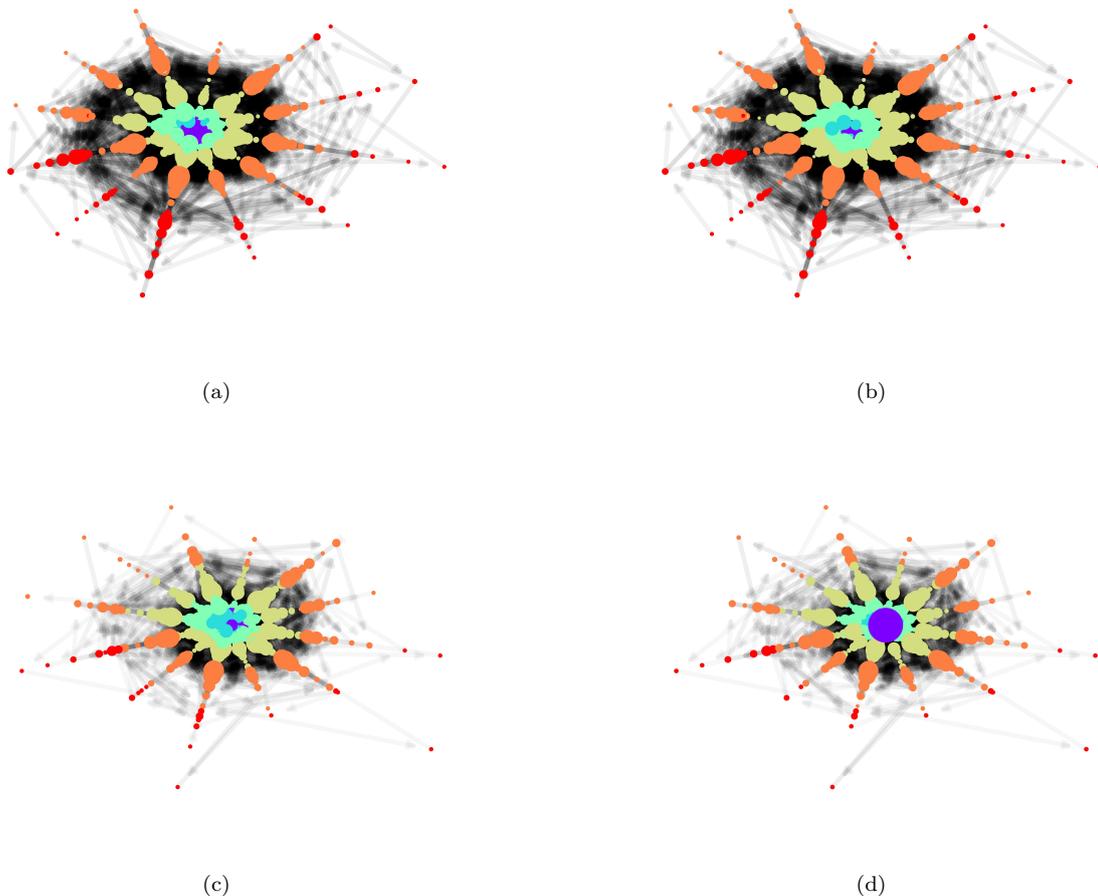


Figura 9: Grafos de melodía para todas las voces. a) Mozart; b) Bach; c) Charly García; d) The Beatles.

A simple vista se puede apreciar en la Fig. 9 que los grafos correspondientes al mismo género poseen estructuras sumamente similares: a con b (clásica) y c con d (rock), llegando incluso a generar los mismos

enlaces en ambos casos.

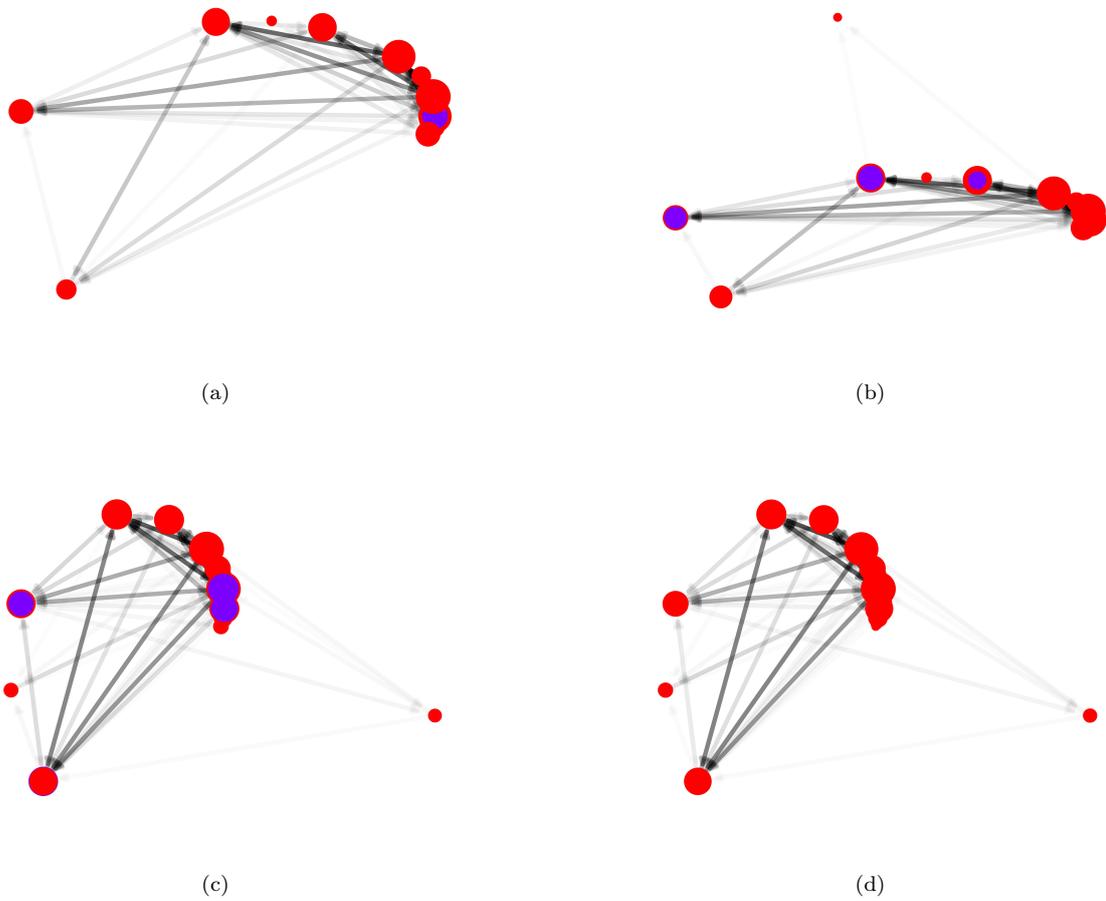


Figura 10: Grafos de los ritmos para todas las voces. a) Mozart; b) Bach; c) Charly García; d) The Beatles.

Para los grafos rítmicos (Fig. 10), Bach y Mozart presentan más diferencias en los ritmos utilizados, y Bach muestra un uso más variado en los silencios. Estos grafos no presentan ninguna semejanza a nivel topológico con los del rock. Para estos, se puede apreciar inmediatamente que a nivel estructural la red es nuevamente muy similar entre los Beatles y Charly García.

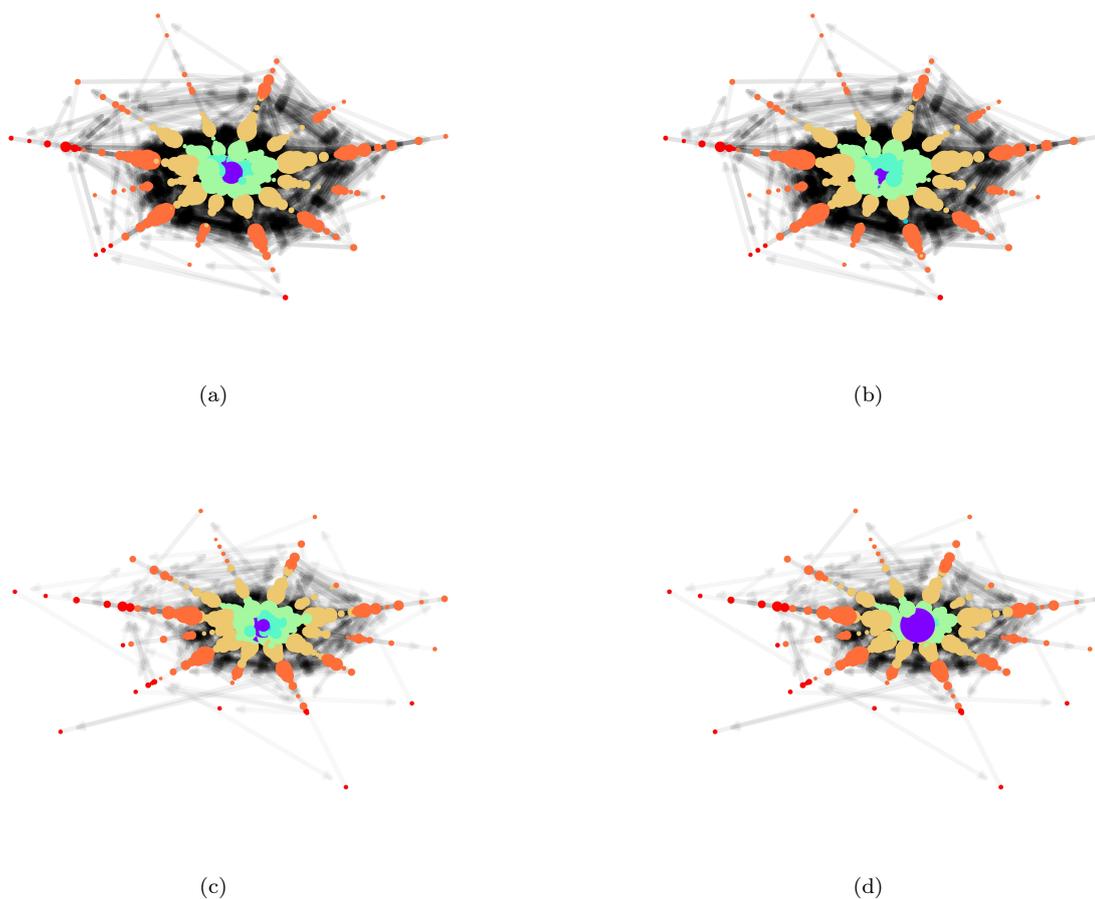


Figura 11: Grafos de los grados para todas las voces. a) Mozart; b) Bach; c) Charly García; d) The Beatles.

Como era de esperar los grafos de los grados de la Fig. 11, presentan las mismas características discutidas para los grafos melódicos.

Habiendo hecho los grafos para todas las voces de los artistas, se realizó también un análisis para obtener las características básicas de las redes para poder realizar una mejor comparación entre los artistas. Algunos valores se presentan en la tabla 1.

Allí, lo que primero se observa es que los únicos grafos que presentan una diferencia sustancial en la cantidad de nodos son los de ritmo, lo cual resulta coherente, ya que cada nodo representa al símbolo asignado a la duración de la nota. Debido a esta baja cantidad de nodos, es normal esperar que sus valores de densidad, clustering local medio y clustering global sean mayores a los obtenidos en los otros grafos.

A su vez, los grafos de grados presentan menos cantidad de nodos (y de enlaces) que los grafos de melodías, lo cual resulta coherente con la idea de su construcción. Recordamos que la idea del grafo  $G$  es unificar las diferentes tonalidades. En concordancia con estos valores, también se observa un aumento en el valor medio del grado y el aumento del clustering global, al mismo tiempo que una disminución en la distancia mínima media entre los nodos, dando a entender que la red está más conectada que en el caso del grafo de melodías. El coeficiente de clustering local también aumenta para todos los grafos de grados, excepto para el caso de Charly García.

A pesar de las diferencias estructurales de las redes para distintos géneros, la tabla 1 no revela ninguna diferencia notoria.

Mozart							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	657	6237	9.493	0.014	0.293	0.207	3.60
Ritmo	26	222	8.538	0.341	0.723	0.520	1.86
Grados	537	5521	10.281	0.019	0.311	0.231	3.55
Bach							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	677	6846	10.112	0.015	0.296	0.224	3.52
Ritmo	27	229	8.481	0.326	0.733	0.525	1.80
Grados	549	6066	11.049	0.020	0.324	0.250	3.46
Charly							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	565	4692	8.304	0.015	0.283	0.210	3.52
Ritmo	523	4497	8.598	0.016	0.283	0.229	3.53
Grados	284	1700	5.986	0.021	0.257	0.259	3.76
Beatles							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	496	3399	6.853	0.014	0.249	0.173	3.58
Ritmo	29	250	8.621	0.308	0.646	0.536	1.91
Grados	458	3255	7.107	0.015	0.259	0.199	3.58

Cuadro 1: Datos de los grafos de todas las voces y todas las obras analizadas para cada artista.

Otra característica que se analizó para cada una de las redes es si son libre de escala, para lo cual es necesario ver si sus respectivos gráficos de  $\log(P(K))$  corresponden a una ley de potencias. Se pueden ver en la Fig. 12. También se realizaron los gráficos de *densidad vs cantidad de nodos*, que se muestran en la Fig. 13.

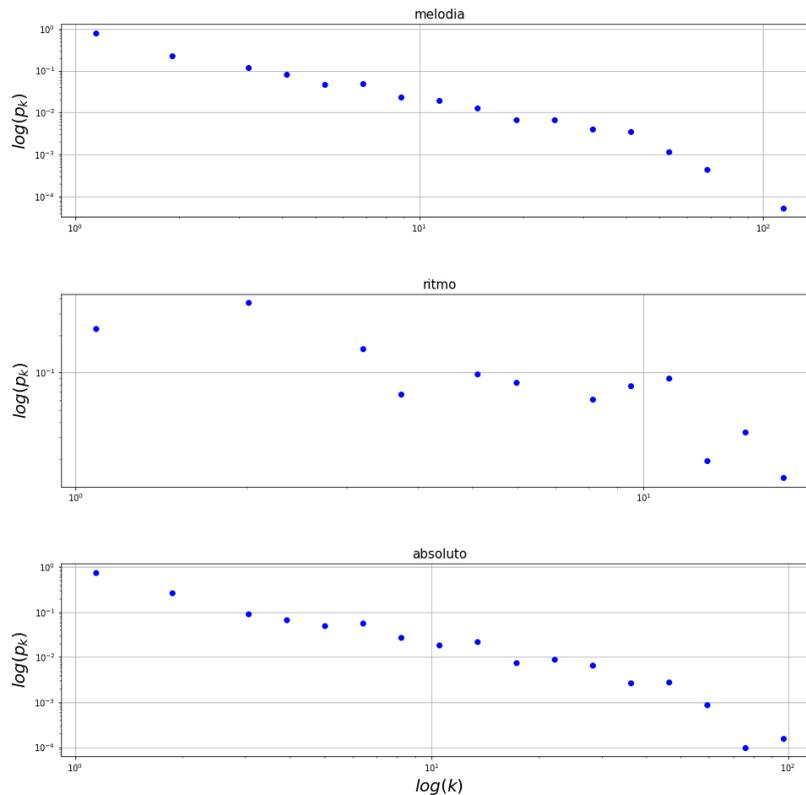


Figura 12: Distribuciones de los grados para las redes de melodía, ritmo y grado, para todas las voces de las obras de Mozart. Los resultados para Bach, Charly García y The Beatles se omitieron ya que no reportaban ninguna diferencia. Todos estos gráficos presentan binneado logarítmico.

En la Fig. 12, se puede observar que tanto para las redes de melodía como de grados ambos pareciera que

prestan un comportamiento lineal revelando un posible comportamiento libre de escala, lo cual coincide con trabajos previos[2][3]. Sin embargo, debido a la poca cantidad de nodos que presentan los grafos rítmicos no se puede deducir ningún comportamiento en lo que respecta a esta característica.

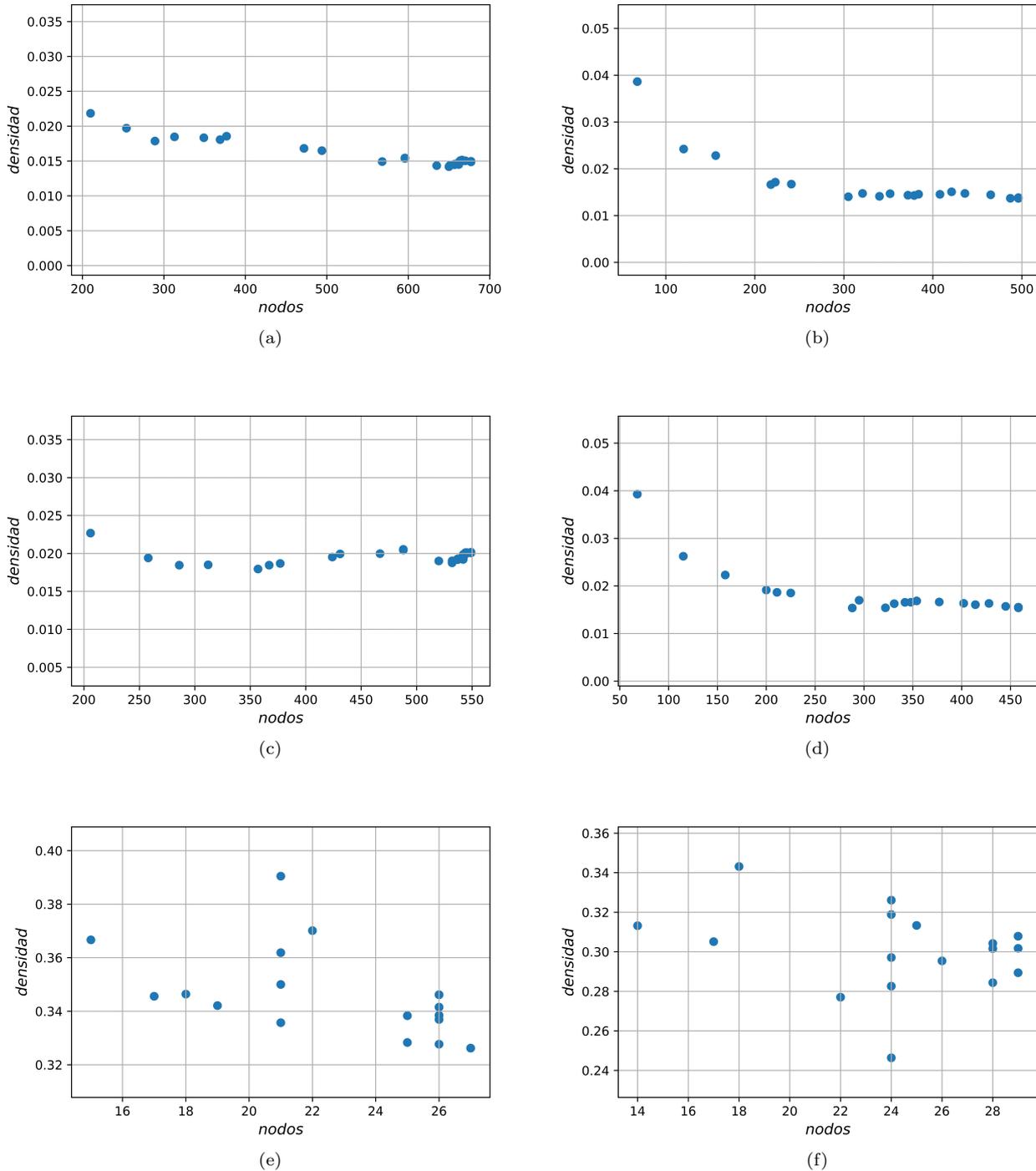


Figura 13: Densidad en función de la cantidad de nodos para todas las voces. Los gráficos a) Melodía c) Grado e) Ritmo (izquierda) corresponden a Bach mientras que los b), d) y f) (derecha) a los Beatles, respectivamente. Los gráficos de Charly García y Mozart fueron omitidos debido a que nos presentaban diferencias respecto de los de su mismo género musical.

Otro resultado interesante se obtuvo al analizar la figura 13. La red melódica de la música clásica parece no decrecer al mismo ritmo que la del rock. Esto se hace más notorio cuando se observan las redes de los grados. Allí incluso se hace más notorio esta velocidad de decrecimiento en la densidad. Sin embargo, debido a la falta de estadística no podemos determinar si las redes son ralas o densas, ya que ambas parecen estancarse en valores de densidad cercanos a 0,015. Esta falta de nodos se hace notar aún más en las figuras c y d, correspondientes

a los ritmos de Bach y los Beatles.

### 3.2. Análisis voz principal

Nuevamente, se realizaron los grafos de melodía, ritmo y grado, pero esta vez se tuvieron en cuenta únicamente todas las voces principales de las obras al momento de unir los grafos. Esta selección consistió en tomar la voz melódica más representativa o que contuviera la mayor información en cada una de las obras.

Otra vez, se pudo apreciar inmediatamente que los grafos correspondientes al mismo género poseen estructuras sumamente similares. Sin embargo, para este caso los artistas del mismo género llegaron a ser prácticamente indistinguibles, debido a que no se aprecia ninguna diferencia en la cantidad de silencios que se utilizan. Para el caso de los grafos rítmicos, estos no presentaron ninguna diferencia con los vistos para todas las voces, excepto el de Mozart que posee más silencios. Esto se debe a que, al agregar más voces no aumenta considerablemente la cantidad de nodos, sino lo que cambia es el peso de los enlaces. Al igual que para el análisis de todas las voces y los grafos melódicos, los grafos de los grados para este caso, no presentan ninguna diferencia estructural notoria entre artistas del mismo género.

Para una mejor contrastación de estos resultados, se volvió a realizar una tabla con algunas de las propiedades básicas de las redes graficadas. Dichos valores se presentan en la tabla 2. Nuevamente, debido a la baja cantidad de nodos presentes en los grafos rítmicos, sus valores de densidad, clustering local medio y clustering global resultan mayores a los obtenidos con el resto de los grafos. Además, las diferencias de los valores que se presentan aquí, respecto de la tabla 1 se deben a la disminución en la cantidad de los nodos y enlaces. A pesar de esto, las observaciones realizadas en la tabla anterior siguen valiendo para esta. En ambos casos, las tablas no aportan información reveladora sobre el parecido o diferencias entre los géneros.

Mozart							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	393	2633	6.700	0.017	0.022	0.221	3.85
Ritmo	26	184	7.077	0.283	0.715	0.499	2.00
Grados	323	2418	7.486	0.023	0.254	0.023	3.65
Bach							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	405	2850	7.037	0.017	0.226	0.229	3.80
Ritmo	27	190	7.037	0.271	0.688	0.503	1.93
Grados	328	2598	7.921	0.024	0.272	0.246	3.59
Charly							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	299	1781	5.956	0.020	0.253	0.234	3.68
Ritmo	28	219	7.821	0.290	0.635	0.538	1.99
Grados	284	1700	5.986	0.021	0.257	0.259	3.76
Beatles							
Redes	Nodos	Enlaces	$\langle K_{in} \rangle$	Densidad	$\langle C_{loc} \rangle$	C global	$\langle Min.dist. \rangle$
Mel.	255	1367	5.361	0.021	0.242	0.200	3.69
Ritmo	27	189	7.000	0.269	0.576	0.475	2.03
Grados	246	1320	5.366	0.220	0.246	0.232	3.74

Cuadro 2: Datos de los grafos de las voces principales

Se observó otra vez, para el análisis de los grafos de las distribuciones. Que para los grafos de melodía como de grados un posible comportamiento libre de escala, debido a su comportamiento lineal. Además, debido a la poca cantidad de nodos para el ritmo vuelve a causar que este estudio no sea concluyente, para determinar alguna tendencia.

Se volvieron a realizar los grafos de la densidad en función de la cantidad de nodos para las voces principales. Para este caso, la red melódica de la música clásica vuelve a presentar el mismo comportamiento, previamente mencionado, al igual que la red correspondiente al rock. Pero nuevamente, la falta de estadística no permite determinar el comportamiento de las redes, ya que para este caso pareciera que ambas quedan estancadas con densidades cercanas a 0,024.

A pesar de que este análisis no aporta resultados diferentes, tener separada la voz principal de las otras puede cambiar mucho los resultados al momento de componer nueva música.

## 4. Composición pseudo-aleatoria

La composición de nueva música a partir de los grafos fue realizada con una caminata al azar: creamos una función que recibe como input un grafo y un entero que se refiere a la cantidad de notas deseadas en la nueva obra. Esta cantidad sirve como estimativo para la duración de las canciones, con un margen de error debido a las diferentes duraciones de las figuras.

El nodo de inicio fue elegido de forma aleatoria y a partir de allí se utilizaron las filas normalizadas de la matriz de adyacencia de la red para pesar los enlaces. Ese peso se convirtió en la probabilidad de salto con la que se movió la función entre puntos. De esta manera, se pudo asegurar una transición relativamente “suave” entre notas, esto quiere decir que las series de notas usadas en la composición son notas usuales y que no deberían presentar ningún salto disruptivo. Sin embargo, esta caminata, al no tener memoria, no puede reconocer la “intencionalidad” de las distintas notas. Por ejemplo, se puede tener una serie de notas que debería terminar en la tónica, pero al realizar la caminata tal vez culmine con un dominante. Esta puede ser una causa de generación de notas espúreas en la nueva canción.

Habiendo aclarado estos puntos, se realizaron 4 caminatas diferentes todas correspondientes a las redes de las voces principales: dos en los grafos de melodía y dos en el grafo de grados. Para el primer caso, se realizó una caminata tomando las notas de los nodos pero considerando un único ritmo fijo con duración de una figura de “negra”. Para la otra, se les agregaron a las notas sus ritmos correspondientes. Se hizo el mismo tratamiento para el caso de la caminata en el grafo de grados. Estas canciones se pueden obtener accediendo al link en la subsección del Anexo, Canciones.

## 5. Mejoras de la caminata

Una forma para mejorar los resultados obtenidos en las caminatas es teniendo en cuenta otros elementos que aparecen en la música como el tempo, las repeticiones, la variedad de instrumentos y la superposición de voces, las armonías y los motivos, entre muchos otros.

### 5.1. Motivos

Los motivos son combinaciones de notas con tono y duración los cuales tienen una cierta recurrencia a lo largo de una canción. Para comenzar con el análisis de los motivos uno puede en principio realizar una búsqueda de los mismos y dividirlos en motivos tonales y motivos rítmicos. La Fig. 14 muestra la línea de bajo tocada por John Deacon en la canción *Under Pressure* del disco *Hot Space* de Queen. En esta línea existe un motivo musical de 7 notas, el cual podríamos descomponerlo en dos partes. Por un lado un motivo rítmico en el cual nos olvidamos de los tonos de las notas y sólo tenemos en cuenta la combinación de duraciones de los sonidos. Por otro lado un motivo tonal en el cual nos olvidamos de las duraciones de los sonidos y sólo nos quedamos con los tonos de las notas. Es así como podemos obtener dos motivos, uno rítmico y otro tonal, dados por las combinaciones  $[c, c, c, s, s, c, c]$  ( $c$ =corchea,  $s$ =semicorchea) y  $[D, D, D, D, D, D, A]$  ( $D$ =re,  $A$ =la).

Buscar motivos en una canción o línea melódica es importante ya que los mismos pueden ser utilizados en las composiciones. Una hipótesis que quisimos ver es si el motivo puede considerarse como aquello que se repite con mayor frecuencia. Realizamos una búsqueda de motivos a lo largo de la línea de bajo. Para ello nos paramos en la primera nota y de allí nos movemos de a un lugar y en cada paso nos quedamos con 7 notas del entorno. Guardamos la combinación de los ritmos y por otro lado los datos de la combinación de los tonos. Seguimos el proceso hasta llegar al final de la partitura. A continuación realizamos un histograma de las distintas combinaciones encontradas.

En la Fig. 15 podemos ver los histogramas de los motivos rítmicos y tonales de tamaño 7 que fueron encontrados. Para esta canción en particular se puede ver que el motivo es el segundo más frecuente en el histograma de motivos rítmicos y el primero en frecuencia en la línea de motivos tonales. Así es que en este tema podríamos decir que un motivo ocurre por ser el que más frecuente aparece. Esto es un primer comienzo en el análisis de motivos y quedaría por probar si esto se mantiene para otros géneros musicales, es decir, si el motivo es aquello que aparece con mayor frecuencia o si bien esto no es una condición necesaria y además existen otros factores que lo convierten en tal.

En relación con el análisis de redes, y si se cumple esta hipótesis, los motivos deberían corresponder a los enlaces más pesados entre notas. Además, la existencia del grafo de grado permite, utilizando distancias en lugar de notas, encontrar más fácilmente motivos que pueden darse repitiendo una secuencia rítmica y de intervalos pero comenzando a partir de distintas notas, como es el caso de la Sinfonía No. 5 de Beethoven.

### 5.2. Armonías

Como dijimos en la sección 2, es posible construir dos grafos para visualizar las armonías de la canción. Nuestro algoritmo recorre una cierta voz (armónica) y encuentra los tiempos en que hubo notas que sonaron

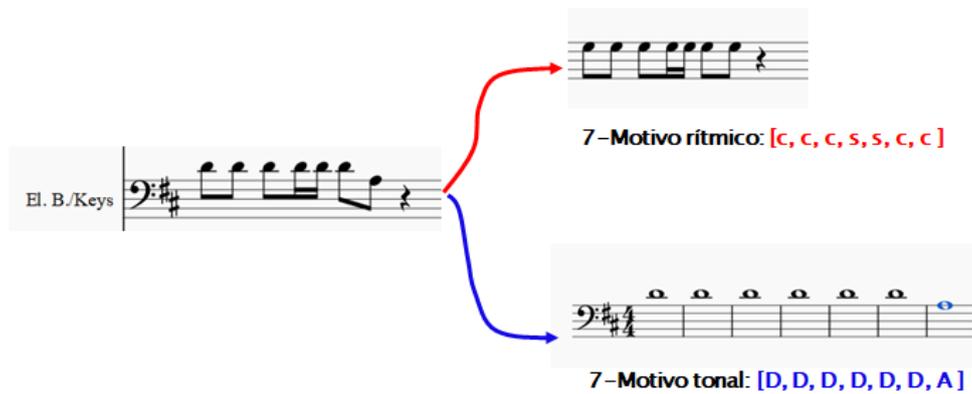


Figura 14: Motivo de siete notas en la línea de bajo de 'Under Pressure' de Queen. Un motivo puede descomponerse en un motivo rítmico y un motivo tonal.

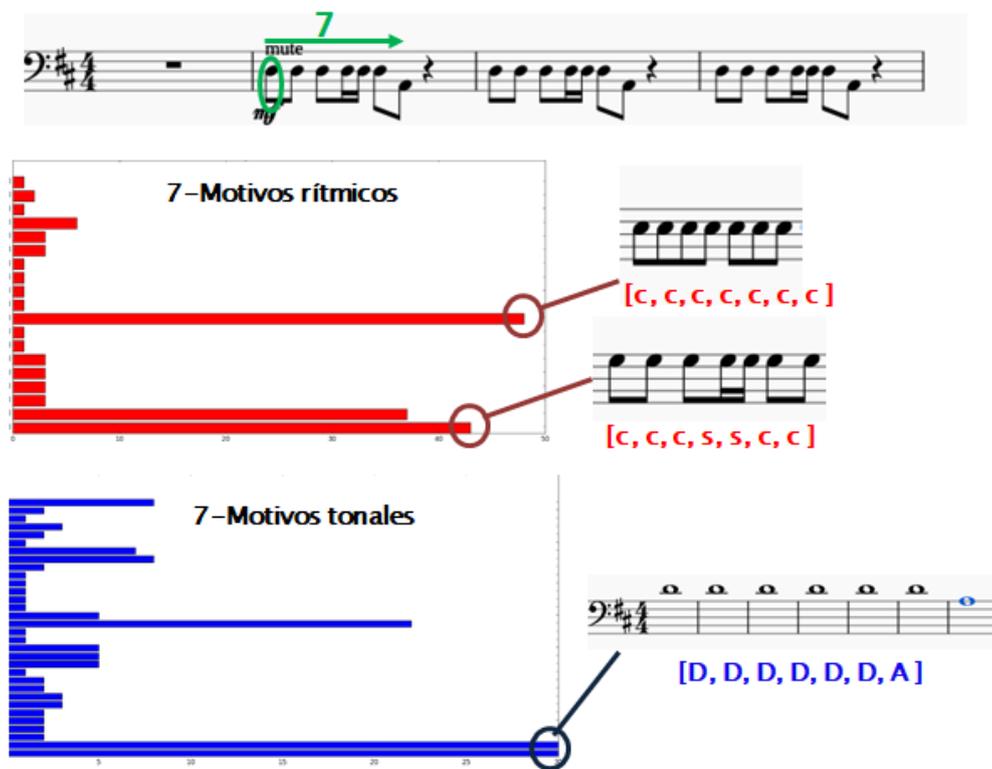


Figura 15: Búsqueda de motivos de siete notas en la línea de bajo de 'Under Pressure'. En rojo el histograma correspondiente a los motivos rítmicos y en azul los motivos tonales de tamaño 7 que fueron encontrados. El motivo rítmico que buscábamos resultó el segundo en frecuencia de aparición mientras que el motivo tonal resultó el primero en frecuencia.

simultáneamente y crea paquetes de notas de diferente tamaño. A estos paquetes los llamamos k-armonías, donde k es el número de notas que componen a esa armonía. En la Fig. 16 se muestra una progresión de 8 acordes la cual fue elegida como ejemplo para mostrar la forma de construir los grafos. La nomenclatura de colores indica de qué tamaño es la armonía que se encontró en cada tiempo.

El primer tipo de grafo es el grafo de armonía no dirigido o grafo AuD. En este grafo los nodos son cada una de las notas del acorde y las mismas son enlazadas por simultaneidad, es decir, cuando esas notas suenan en un mismo instante. De esta forma si el acorde que sonó está formado por las notas Sol, Si, Re, Fa se crea un 4-clique (las notas se enlazan todas con todas), mientras que si el acorde está formado por las notas Sol, Si, Re, Fa, La se crea un 5-clique. Por esta razón este tipo de grafo contará con multienlaces, es decir, entre dos notas pueden existir mas de un enlace, los cuales son pintados con un determinado color, en base al tamaño de

la armonía en la cual esas notas sonaron. Es así como en estos dos acordes el 4-clicke creado tendrá enlaces de color rojo mientras que el 5-clicke enlaces de color verde. En la Fig. 17 se muestra a la izquierda el grafo de armonías no dirigido (AuD).

El segundo tipo de grafo es el grafo de armonía dirigido o grafo AD. En este grafo los nodos son armonías, es decir, conjuntos de notas. Es así como en este grafo vamos a tener 7 nodos, ya que el primer y último acorde de la progresión del ejemplo son los mismos. Además este es un grafo dirigido por co-ocurrencia, es decir un acorde se une con el siguiente en el orden temporal. La Fig.17 muestra el grafo de armonía dirigido (AD) para la secuencia de acordes utilizada.

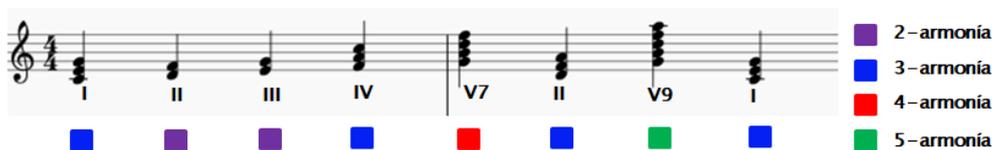


Figura 16: Secuencia simple de acordes utilizada para la construcción de los grafos de armonía no dirigido y dirigido. A un conjunto de notas que sonó en un mismo instante le llamaremos armonía. A su vez de acuerdo a la cantidad de notas podrán existir 2-armonías, 3-armonías, 4-armonías etc. Notar que dos notas que sonaron en una i-armonía pueden también aparecer en una j-armonía. Por ejemplo: las notas Sol y Re en el quinto y séptimo acorde de la secuencia, pertenecen a una 4-armonía y a una 5-armonía.

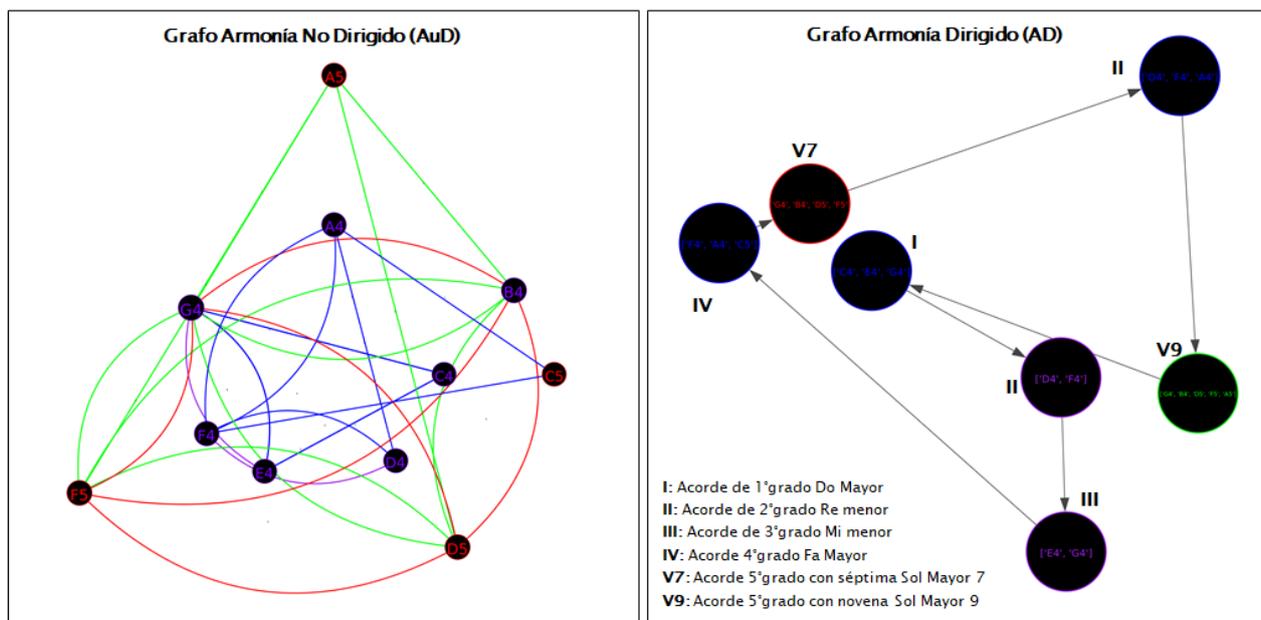


Figura 17: Grafos de armonía para la secuencia simple de acordes de la fig. 16. A la izquierda el grafo de armonía no dirigido (AuD) el cual acepta multienlaces entre dos notas. El color de los enlaces entre dos notas corresponde al tamaño de la armonía en la que esas dos notas aparecieron (Ver fig. 16). A la derecha el grafo de armonía dirigido (AD). Los nodos corresponden ahora a conjuntos de notas, y se encuentran coloreados de acuerdo a la cantidad de notas presentes en cada nodo, es decir, al tamaño de la armonía.

La importancia de ambos tipos de grafos creemos que está justificada en dos razones. Por un lado un grafo del tipo no dirigido (AuD) serviría para ver la estructura de acordes como así también su tamaño y la importancia de algunas notas por sobre otras en la formación de los mismos. El segundo tipo de grafo dirigido (AD) es importante porque permitiría observar la forma en que el compositor utiliza la sucesión de acordes y así podría ser útil para distinguir pasajes de tensión y/o pasajes de relajación entre otras cosas. Por último si bien nuestro algoritmo funciona bien para este tipo de secuencias de acordes creadas a manera de test, es importante hacer una aclaración, y es que rara vez los acordes aparecen así escritos en una canción, en el sentido de que a veces existe una nota del acorde faltante, o bien una nota del acorde se repite, etc. Al momento, nuestro algoritmo es capaz de encontrar notas que suenan simultáneamente (armonías) pero todavía no le es posible reconocer de qué tipo de acorde se trata. La tarea es compleja puesto que para reconocer un determinado acorde de un pasaje a veces no sólo importan las notas que sonaron en simultáneo sino también las notas de la melodía. El objetivo a futuro sería incorporar esta funcionalidad, es decir, ir desde la detección de armonías hasta el reconocimiento

de acordes.

## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se introdujo una forma para graficar redes musicales tanto para melodía, grado y ritmo. Este método posee ventajas, como una determinación muy rápida de las notas, tonos y duraciones que presentan las canciones.

También se analizaron 4 artistas correspondientes a los géneros de música clásica y Rock and Roll. Para estos se encontraron que sus grafos de melodías y de grados son prácticamente idénticos para artistas dentro de un mismo género, lo cual resulta coherente, si consideramos que un género musical está definido por las notas que se usan.

Otro resultado interesante fue que para la música clásica, la diferencia entre los artistas se reveló en la topología del grafo de ritmos. Mientras que esto no ocurrió para el Rock and Roll. Incluso, para ambos casos, el uso de los silencios fue sumamente relevante para la distinción entre los artistas.

Además, se llevó a cabo un estudio de las magnitudes básicas de las redes, pero no se logró establecer ninguna característica en común ni diferencia entre artistas ni entre los géneros que sea apreciable.

Se pudo observar una tendencia a un comportamiento libre de escala, para las redes musicales. Y si bien se trató de establecer el comportamiento de las redes para el aumento en la cantidad de nodos, debido a la poca cantidad de datos este análisis quedó inconcluso.

Se lograron componer canciones mediante caminatas pseudo aleatorias, para los cuatro artistas sobre un solo instrumento el cual fue el piano. Entendemos que aún existen otros componentes en la música que pueden enriquecer estas caminatas, como pueden ser los motivos y las armonías y que a futuro es posible incorporar otras voces mediante la confección de grafos 3d donde cada instrumento esté representado por una espiral en una determinada capa, y las voces se unan por interenlaces entre las mismas por el criterio de simultaneidad.

Vimos que se pueden extraer motivos de las canciones y una de las formas de realizar esto es realizando un histograma en frecuencia de los mismos. Estos motivos pueden utilizarse para mejorar las caminatas y agregar otros componentes presentes en la música.

Por último vimos que es posible dar un paso más e incorporar el análisis de las armonías. Esto permitiría estudiar la composición de los acordes pero también mejorar nuestro entendimiento de cómo los acordes se suceden en el tiempo y así ver cómo el compositor crea momentos de relajación y momentos de tensión a través de ellos. Con respecto a las caminatas, se podría utilizar una determinada secuencia de acordes como punto de partida para la composición de la melodía. Creemos que esto lograría mayor coherencia en la melodía al tiempo que nos permitiría dotar a la composición de un carácter cíclico en la línea armónica al volver siempre sobre la misma secuencia de acordes pero con variaciones en la línea melódica.

## Referencias

- [1] Roederer Juan G. *Acústica y psicoacústica de la música*. Ricordi (1997)
- [2] Chi K. Tse, Xiao Fan Liu, Michael Small, *Analyzing and composing music with complex networks: finding structures in Bach's, Chopin's, and Mozart's*. (2008)
- [3] Xiao Fan Liu, Chi K. Tse, Michael Small, *Complex network structure of musical compositions: Algorithmic generation of appealing music*. (2009)
- [4] Useche Ramírez J.E. *Aplicación del análisis de redes, el formalismo de las redes complejas y la mecánica estadística al estudio de la música clásica* Tesis de Maestría en Ciencias-Física, Universidad Nacional de Colombia (2012)

## A. Anexo

### A.1. Canciones

En este trabajo se crearon melodías sencillas, sin armonía y sobre un único instrumento que fue el piano, a partir de las redes de los artistas analizados. Dentro de estas canciones encontramos algunas con mayor sentido musical que otras, pero en general el resultado creemos que fue bueno y que estos resultados pueden mejorarse con las propuestas presentadas en este trabajo. Para acceder a las canciones y al repositorio de la materia: [https://github.com/Redes2018/TP\\_esp/tree/master/musica\\_informe](https://github.com/Redes2018/TP_esp/tree/master/musica_informe)

## A.2. Funciones

El análisis de las obras fue llevado a cabo con una serie de funciones creadas por el mismo grupo y que pueden encontrar en nuestro repositorio. Estas funciones se utilizaron para: leer partituras en formato xml y crear grafos; graficar grafos en 2d y en 3d; buscar motivos en una obra; buscar cliques con dirección en un grafo; recablear un grafo dirigido, crear una caminata al azar a partir de un grafo; etc. En nuestro repositorio encontrarán el archivo *funciones\_readme.pdf* con la documentación de las funciones, qué hace cada una, sus variables de entrada y de salida, con su nombre y tipo, y el archivo *funciones.py* con la implementación de cada una de ellas en lenguaje python: [https://github.com/Redes2018/TP\\_esp/blob/master/funciones.py](https://github.com/Redes2018/TP_esp/blob/master/funciones.py)