

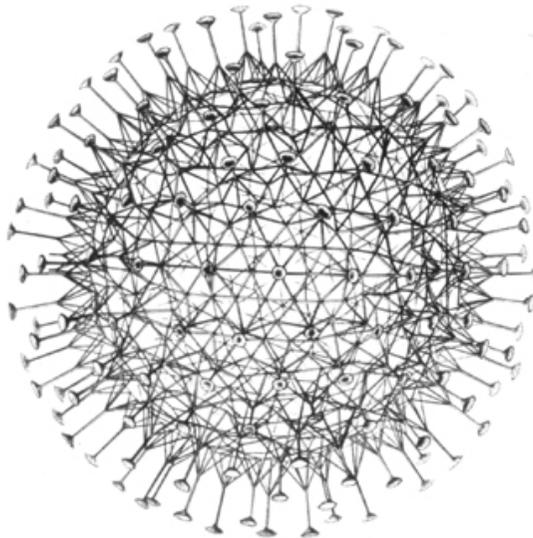
## Teoría de Sistemas Musicales

### 1ª Parte

**Ignacio Pecino**

Novars Research Centre, University of Manchester, UK

E-mail: [info@ignaciopecino.com](mailto:info@ignaciopecino.com)



#### Introducción

Una de las características esenciales de nuestro Universo, de la realidad que nos rodea, es la universalidad de las leyes o principios básicos que rigen el comportamiento de los sistemas que lo componen, ya sean estos materiales o conceptuales. De esta forma, la música, con todo lo que conlleva de sistema formal y complejo, no es una excepción y, como veremos a continuación, se ve sometida a muchos de los mismos principios.

En concreto, dada su naturaleza comunicativa, son las leyes de la termodinámica las que probablemente ejerzan una mayor influencia sobre la evolución de los sistemas musicales, debido en parte a la estrecha relación que parece existir entre información y energía. Si el siglo XX trajo de la mano de Einstein la famosa ecuación  $E=mc^2$ , que establecía la equivalencia entre masa y energía, la física cuántica está aún por demostrar y formalizar esta relación entre información y energía, aunque ya se han dado pasos importantes en esa dirección<sup>1</sup>. Ello podría arrojar luz sobre uno de los fenómenos más fascinantes y asombrosos que, en mi opinión, es posible observar: el hecho de que algo como la

propia consciencia humana, y concretamente la música (fruto de esa capacidad intelectual) tengan su origen último en una singularidad espacio-temporal acontecida hace unos 14.000 millones de años, en la que lo único que inicialmente existió fueron unas pocas leyes físicas fundamentales y una ingente cantidad de energía/información.

En otras palabras, y desde un punto de vista ontológico, las ideas y todos los sistemas abstractos que éstas representan son tan reales como cualquier objeto material observable, dado que todo puede ser potencialmente reducido a bits de información, los bits necesarios para describir la estructura más o menos compleja de dicho objeto. Esta idea es llevada a su máxima expresión por los simu-  
listas<sup>2</sup>, quienes defienden que nuestro universo no es más que una simulación o sistema computacional ejecutado dentro de una realidad de orden superior. En ese contexto, la separación entre idea y objeto material o energía deja de ser relevante, pues todo es una misma cosa: información; y como tal, puede ser tratada de manera similar.

---

1. <http://www.nature.com/nphys/journal/v6/n12/full/nphys1821.html>

2. [http://es.wikipedia.org/wiki/Realidad\\_simulada](http://es.wikipedia.org/wiki/Realidad_simulada)

### La música como sistema

En general, un sistema puede definirse como un “conjunto de elementos interrelacionados que interactúan entre sí para contribuir a un determinado objetivo”. En el caso de los sistemas musicales, éstos están compuestos por conceptos o ideas abstractas, que al igual que ocurre en numerosos sistemas físicos materiales (como los propios seres vivos), son de naturaleza abierta, dado que intercambian energía, materia o información con el medio ambiente que los rodea. En cuanto al objetivo, se trata por lo general de asegurar la supervivencia y estabilidad del sistema.

Por otra parte, cabe señalar que la música funciona en base a un sistema formal, que tradicionalmente ha sido de índole matemática, pues las alturas o tonos empleados por ésta surgen de las relaciones armónicas existentes entre los modos de vibración de un cuerpo resonante (sin tener en cuenta aquí las diferentes afinaciones o temperamentos). Dicha gramática formal establece por lo tanto cuáles son los elementos y expresiones permitidos dentro del sistema.

Pero volviendo a la naturaleza abierta de los sistemas musicales, es importante señalar que el lenguaje resultante de este sistema formal no es estático, sino que evoluciona a lo largo del tiempo, como resultado de los procesos de adaptación que se dan en la mayoría de los sistemas complejos. Este fenómeno, aunque evidente al observar por ejemplo el desarrollo de la música occidental a lo largo de los últimos siglos, puede ser estudiado desde una perspectiva sistémica, gracias a las ideas y postulados propuestos por destacados científicos y filósofos como Ludwing von Bertalanffy (Teoría de Sistemas) o Norbert Wiener/Stafford Beer (Cibernética) y a los avances en Teoría de la Información, fruto de las investigaciones de Claude.E.Shannon sobre eficiencia en las comunicaciones. Veremos, cómo dichas teorías son a su vez compatibles con las leyes fundamentales de la termodinámica, que describen los procesos de intercambio de energía y los estados de equilibrio de un sistema.

La Teoría General de Sistemas surge entre los años 1950 y 1968, y es interesante cómo más allá de tratar solucionar problemas concretos, establece una clara tendencia hacia la integración de las ciencias naturales y sociales, buscando principios unificadores que puedan ser aplicables a cualquier campo del conocimiento.

Dentro de dicha teoría juegan un papel importante los conceptos de entropía y homeostasis. El primero es la tendencia de los sistemas a desgastarse, disminuyendo el orden interno y aumentando su grado de aleatoriedad, mientras que la homeostasis puede describirse como una fuerza opuesta, que busca mantener el equilibrio existente entre las partes del sistema (el objetivo de supervivencia antes mencionado), a pesar del desgaste producido por la interacción con el entorno, o a los cambios en el propio medio interno. Ello se consigue a través de procesos de autorregulación, que son especialmente característicos de los seres vivos, pero que ocurren de manera similar en otro tipo de sistemas como los musicales.

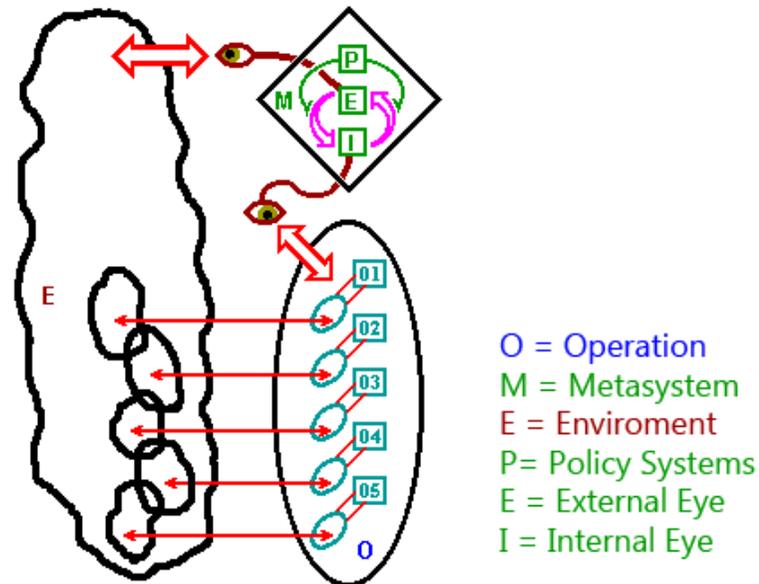
Se trata pues de mantener una situación de orden interno a costa de crear desorden en el medio exterior y mantener así un valor de entropía reducido. Por poner un ejemplo, cuando un ser humano se come una manzana lo que hace en realidad es destruir la organización estructural de dicha manzana para nutrirse de la energía que contiene, manteniendo así su propia estructura. Análogamente, cada vez que escuchamos una pieza musical estamos contribuyendo al desgaste (aumento de entropía) del sistema musical que la ha generado dado que, como veremos posteriormente, los sistemas musicales evolucionan, en parte, como resultado del proceso comunicativo bidireccional entre el compositor (parte del sistema) y su audiencia (medio exterior).

Desde un enfoque cibernético, el citado proceso de autorregulación aparece en forma de control realimentado o feedback. El feedback es un mecanismo que conduce a la regulación del sistema tras la ruptura de equilibrio, es decir, cuando el estado ideal del sistema no coincide con su estado actual. En ese caso, el sistema reacciona produciéndose una nueva búsqueda de la situación de equilibrio interno.

Para entender dicho proceso en el caso de los sistemas musicales, veamos primero cuáles son los elementos y mecanismos de intercambio de información que caracterizan a los sistemas cibernéticos. Es lo que Wiener/Beer denomina “Modelo de los Sistemas Viables”, y que representa un punto de partida importante para el desarrollo de lo que posteriormente se conocería como Teoría de la Comunicación (no confundir con la teoría matemática de la información de Shannon). En la siguiente imagen se pueden observar dichos elementos o subsistemas y cuál es la relación existente entre ellos.

**VSM(Viable System Model)**

*Norbert Wiener/Stafford Beer*



- Elementos operacionales (Operation units). Son los elementos que interactúan directamente con el medio ambiente (a la izda.). En el caso de los sistemas musicales estos elementos son las propias piezas musicales representativas de la gramática del sistema; o lo que es lo mismo, el corpus de todas las obras producto de dicho sistema.
- Entorno (Environment). Es el medio externo al sistema e interactúa con éste recibiendo y enviando información al mismo (feedback). Las flechas de color rojo representan dichos transvases de información. En los sistemas musicales este medio queda representado por el público o audiencia que tiene acceso a las citadas piezas a través de los diversos canales de comunicación (conciertos en directo, grabaciones, etc.).
- Metasistema (Metasystem). Es la parte del sistema encargada de las tareas de control interno y externo. Se compone a su vez de tres elementos:
  - a) Sistemas reguladores (Policy Systems). Son el conjunto de normas que rigen el funcionamiento interno del sistema. En el caso musical, este sistema regulador queda constituido por las reglas o pautas compositivas (gramática) que se aplican a un determinado lenguaje musical.
  - b) Observador interno (Internal Eye). Es el encargado de intercambiar información con los elementos operacionales antes descritos conforme a las reglas dadas. Parece claro que dicha actividad es la que se produce durante el proceso compositivo, en el que el compositor plasma sus ideas en obras concretas de acuerdo con las reglas del sistema (policy systems).
  - c) Observador externo (External Eye). Es el elemento que permite al metasistema recoger la información proveniente del medio exterior. En el caso que nos ocupa, es el propio compositor el que recibe dicha información procedente del público (ya sea directa o indirectamente) o del contacto con otros sistemas musicales diferentes al considerado.

Por lo tanto, el estado ideal para un sistema musical es aquel en el que el grado de aceptación o feedback positivo por parte del medio (oyentes) es el adecuado, permitiendo aunque sólo sea temporalmente, la continuidad del sistema actual. En ese caso, la gramática o lenguaje del sistema pare-

ce funcionar, dado que la audiencia disfruta de los elementos operacionales (piezas musicales) y el compositor (observador interno y externo) logra pagar sus facturas con el fruto de su trabajo. Pero por desgracia, esta situación no puede mantenerse por mucho tiempo debido al desgaste que sufre el sistema en su relación con el medio. Ello se debe a que la suma del sistema musical más el medio exterior es a su vez un sistema, esta vez cerrado, en el que el grado de desorden o entropía no puede más que aumentar a medida que el tiempo transcurre. Es lo que conocemos como segundo principio de la termodinámica<sup>3</sup> Esto es algo que podremos entender mejor una vez profundicemos en el concepto de entropía, pero que a grandes rasgos se puede explicar de manera intuitiva: a medida que la audiencia va conociendo mejor la gramática del lenguaje propuesto, la información recibida empieza a ser menos significativa, pues el oyente empieza a sentir que lo que escucha es más de lo mismo y es fácilmente predecible. Llegados a ese punto, el sistema habrá de iniciar un proceso homeostático de adaptación a las nuevas necesidades de la audiencia, mutando ligeramente las reglas y el uso que hace del sistema formal, y permitiendo así el restablecimiento de la situación comunicativa ideal. De otra forma, su música podría dejar de ser escuchada. Este es en mi opinión, y de manera muy simplificada, el verdadero motor de la evolución de los sistemas musicales.

Es decir, el sistema ha de ofrecer los productos que el medio exterior necesita o crear de manera más o menos artificial, una necesidad de dichos productos (cosa que podemos observar a diario en gran parte de la música comercial). Aunque por diversas razones, no siempre esto ocurre así y el compositor prefiere a veces ignorar al medio o no dispone de los medios adecuados para recibir tan necesaria retroalimentación.

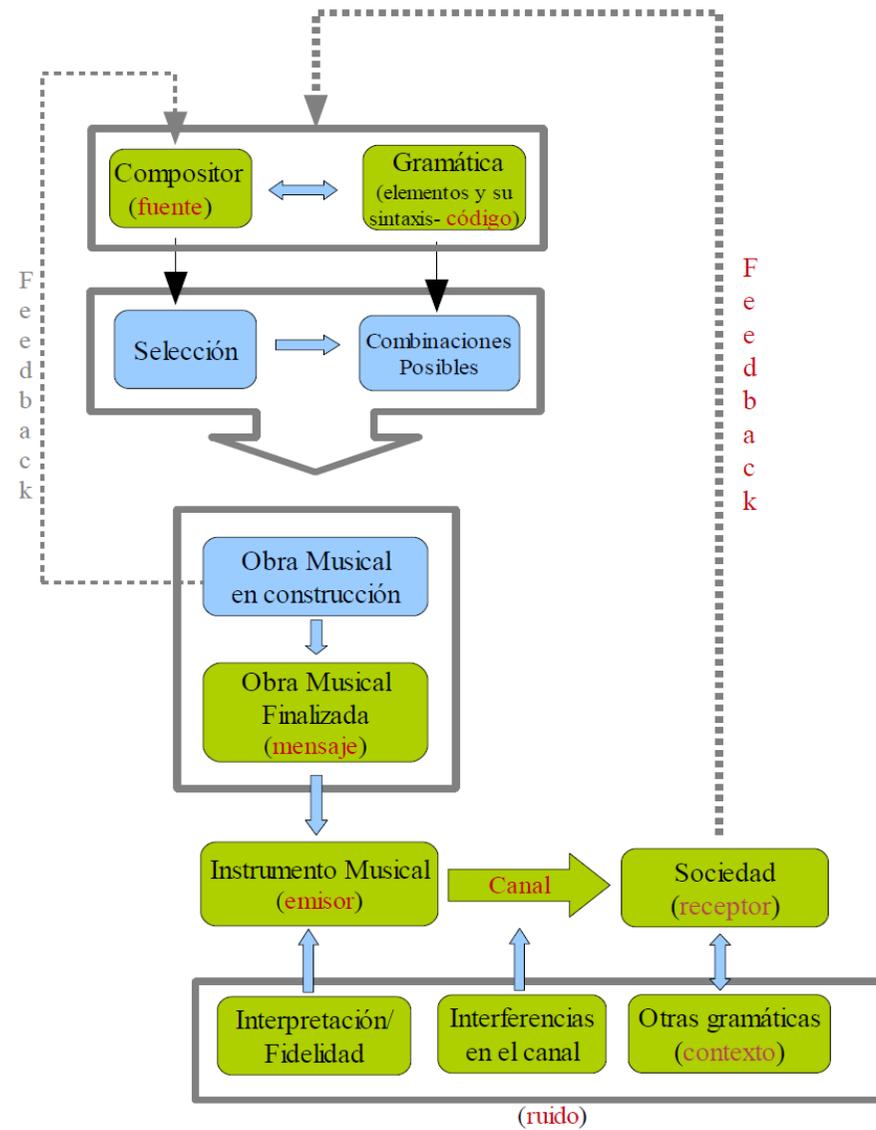
---

3. [http://es.wikipedia.org/wiki/Segundo\\_principio\\_de\\_la\\_termodinámica](http://es.wikipedia.org/wiki/Segundo_principio_de_la_termodinámica)

Señalar, por otra parte, que el metasistema puede también integrar a un “conjunto de compositores” adscritos a un mismo lenguaje. Ésta es, de hecho, la situación más habitual. En tal caso se podría a su vez considerar a cada uno de los compositores como un subsistema dentro del sistema, de manera que los demás miembros constituyan su medio externo. Dado que existiría intercambio de información entre ellos, el sistema podría, en cierta medida, ser viable al margen del resto del medio exterior (público general). Personalmente me pregunto si no será esto lo que ocurre hoy en día con gran parte de la música contemporánea (especialmente en entornos académicos). ¿No habremos hecho viables nuestros sistemas a fuerza de limitar nuestro medio exterior al propio gremio de los profesionales de la música? ¿Estamos cumpliendo con ello el verdadero objetivo? ¿O quizás el problema sea que la gramática empleada está muy por delante, evolutivamente hablando, de las expectativas del público general? ¿Ha ocurrido esto siempre a lo largo de la historia de la música?

Preguntas a parte, y más allá del enfoque cibernético, la teoría de la información de Shannon, nos proporciona una visión distinta de este proceso comunicativo, aunque como veremos a continuación, presenta analogías importantes.

La siguiente figura muestra los elementos que caracterizan dicho proceso para el caso de la comunicación musical. Veamos cuáles son:



- Fuente: Es la encargada de generar la información a transmitir. En nuestro caso este papel lo desempeña el compositor como generador de las ideas musicales.
- Código: Es el conjunto de reglas que rigen la combinación de los símbolos del sistema. Estas reglas definen una gramática, y por lo tanto un lenguaje, ya sea formal o natural. Las reglas de la armonía tonal funcional son un claro ejemplo de código.
- Mensaje: Es la secuencia concreta fruto de la aplicación del código y que contiene la información a transmitir. Para la elaboración de un mensaje musical (obra o pieza musical) el compositor aplica un proceso de selección sobre los materiales posibles y los organiza conforme a una gramática concreta (reglas del sistema musical).
- Emisor: Es el agente encargado de transmitir los datos codificados a través del canal. Se trata pues del intérprete que opera sobre un instrumento musical o los altavoces en el caso de la música electroacústica.
- Canal: Es el medio físico por el que transcurre el mensaje hasta llegar al receptor. En el caso del sonido este medio es el aire a través del cual se propagan las ondas de presión sonoras.
- Receptor: Es quien recibe la información. En nuestro caso es el oyente de la pieza musical. En un sentido más amplio puede considerarse al conjunto de la sociedad o a una parte de ella.
- Ruido: Es cualquier perturbación que pueda interferir en la señal durante el proceso comunicativo, provocando a veces, pérdidas de información. Para evitar dichas pérdidas se recurre normalmente a la redundancia (repetición recurrente de la información). La música hace uso extensivo de la redundancia (repetición) no sólo como método para asegurar la

asimilación de los materiales (debido a las limitaciones de nuestra percepción y memoria a corto plazo) sino como una característica propia del sistema de jerarquización y estructuración del lenguaje.

- **Feedback (retroalimentación):** Es la respuesta al mensaje que recibe el emisor por parte del receptor. Puede ser positiva (cuando fomenta la comunicación) o negativa (cuando se busca cambiar el tema o terminar la comunicación). Si no hay retroalimentación, entonces puede decirse que se da un proceso de información pero no una verdadera comunicación. El fenómeno de la retroalimentación fue tratado ya desde la perspectiva de la cibernética.

Podemos apreciar por lo tanto, cómo el esquema del proceso comunicativo que acabamos de presentar, presenta importantes conexiones con el esquema sugerido por Wiener/Beer para los sistemas viables. Se puede decir que son dos formas de ver un mismo fenómeno. Lo que antes era los operadores (operation) es ahora el mensaje; el medio ambiente exterior no es más que el/los receptor/es; el código se conocía antes como “policy systems” (sistema de reglas) y el “external eye” (control externo) e “internal eye” (control interno) están ahora representados por ambas líneas de retroalimentación.

Una vez identificados los elementos del proceso comunicativo, es el momento de pasar a caracterizar el concepto de información en sí.

La información, conjunto organizado de datos, es tratada como una magnitud física y se emplea la entropía (H) -grado de desorden de un sistema-, para caracterizar la información de una determinada secuencia de símbolos. Se puede comprobar que es la misma entropía que tiene en cuenta la teoría general de sistemas o la termodinámica de los procesos físicos.

Una fuente de información (x) es pues un elemento que entrega una señal (mensaje); siendo la señal una función de una o más variables que contiene información acerca de la naturaleza o comportamiento de algún fenómeno.

Existen varios tipos de fuente según el tipo de señal que entregan. Se pueden clasificar, según el tipo de variable independiente en:

- Fuentes de variable continua. Cuando la función está definida para cualquier valor de la variable independiente. Esta variable independiente suele ser el tiempo para un gran número de fuentes.
  
- Fuentes de variable (tiempo) discreta. La función sólo está definida para un conjunto contable de valores de la variable. También se pueden clasificar según el rango de valores que cubre la señal:
  - a) Fuentes continuas. El valor de la función toma un rango continuo de valores.
  
  - b) Fuentes discretas. El valor de la función sólo toma un conjunto finito de valores.

A cada uno de estos valores lo llamamos “símbolo” ( $S_i$ ) y al conjunto de todos estos símbolos se le suele llamar “alfabeto”. La elección del alfabeto es, en cierto modo, arbitraria, y el número de símbolos disponibles ( $n$ ) dependerá de la naturaleza de la fuente o sistema formal considerado.

Finalmente, una última clasificación se establece según la relación que tenga un símbolo con los que le preceden:

- Fuentes sin memoria. Los símbolos son estadísticamente independientes entre sí. O sea, los símbolos que hayan aparecido hasta el momento no van a condicionar al signo presente ni a los posteriores.
  
- Fuentes con memoria. La aparición de los símbolos no es estadísticamente independiente. El símbolo presente está condicionado por los que han aparecido con anterioridad.

En el caso de las fuentes discretas sin memoria, cada símbolo poseerá una determinada probabilidad de aparición. Esto es de vital importancia a la hora de medir la cantidad de información útil que es capaz de proporcionar una determinada fuente de información.

Se define la información que aporta un símbolo en función de su probabilidad de aparición como:

$I(S_i) = \log_2(1/p_i)$ , siendo  $p_i$  la probabilidad de aparición del signo  $S_i$ .  $I(S_i)$  se medirá en bits (al tomar logaritmos en base 2).

Si  $p_i = 1$  (100%), entonces la información que proporciona es  $I(S_i) = 0$  (a mayor sorpresa mayor información).

Por otra parte, puede existir una probabilidad condicionada  $p_{(ij)}$ , es decir, cuál es la probabilidad de que aparezca el signo  $S_j$  previa aparición de  $S_i$ .

Si bien en la mayoría de los sistemas musicales la probabilidad no condicionada es suficiente para caracterizar el grado de jerarquía/orden del sistema, este valor condicionado añade información adicional sobre el tipo de sintaxis empleada.

Imaginemos por ejemplo un pasaje de una pieza musical tonal del siglo XVIII. El hecho de estar asentado sobre una tonalidad concreta, hará que, dado el estilo, la probabilidad de encontrar notas del primer, segundo, cuarto o quinto grado de la escala sea mayor que la de otros grados de la misma, por no decir mayor que aquellas que no pertenecen a la escala de la tonalidad y modalidad empleada. Por lo tanto, un cálculo estadístico de dichas frecuencias serviría para caracterizar la época a la que pertenece dicho fragmento (cosa que haremos posteriormente). Pero si además consideramos que tras la aparición de una subdominante, la secuencia subdominante-dominante-tónica es la más probable entonces estaríamos estableciendo probabilidades condicionadas de primer y segundo orden. Es decir, cuál es la probabilidad de que dada una nota le siga cualquier otra. Esta información es útil pues para conocer las leyes gramaticales del sistema considerado.

La propia creación de motivos musicales supone en sí un ejercicio de condicionamiento estadístico entre los símbolos del sistema. Imaginemos por ejemplo el motivo breve “Do-Sol-Fa#-Re-Mi”. La repetición (redundancia) de dicho motivo hará que poco a poco se conformen unas probabilidades condicionadas para cada una de las notas del mismo en función de las notas precedentes. Esto es, la probabilidad de Sol previa a la aparición de Do, la probabilidad de Fa# previa aparición de Do y Sol, y así sucesivamente. Dichas probabilidades harán que dadas dos o más notas del motivo, “esperemos” lo que ha de seguir hasta completar el motivo. Cuando no ocurre así, al cambiar por ejemplo el Mi final por un Mib, lo esperado no acontece, y dado que un Mib era mucho menos probable que un Mi natural, la información que recibimos a cambio en ese instante será considerablemente mayor.

En resumen, a medida que la probabilidad de un símbolo aumenta, la información asociada al mismo disminuye, y viceversa, cuando esta probabilidad se acerca a cero, la información que transmite dicho símbolo crece exponencialmente.

La información que entrega la fuente será el valor medio de la información que entrega cada símbolo individualmente cada vez que aparece. Este parámetro se llama Entropía de la fuente, y se puede expresar como:

$$H(x) = \sum_{i=1}^n p(i) \log \left( \frac{1}{p(i)} \right).$$

La entropía de una fuente estará acotada entre los siguientes valores:

$0 < H(x) < \log_2(n)$ , siendo n el número total de símbolos.

Podemos definir también una entropía normalizada:

$H_N(x) = H(x) / (\log_2 n)$ , de manera que  $0 < H_N(x) < 1$

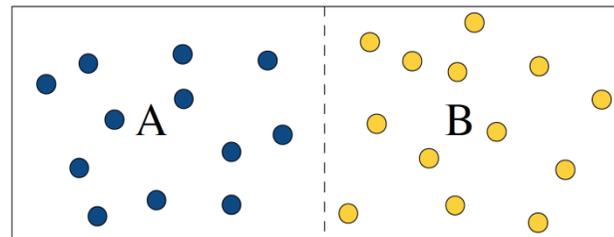
Cuando todos los símbolos sean equiprobables, la entropía del sistema alcanzará su valor máximo:  $\log_2(n)$ .

**Entropía y evolución de los sistemas musicales**

Para entender mejor qué es la entropía, propongamos el siguiente ejemplo sencillo.

Supongamos un sistema consistente en un recipiente que contiene dos gases A y B separados por una membrana que divide en dos el recipiente. A continuación procedemos a retirar dicha membrana divisoria de manera que en el instante inicial, el sistema permanece aún en ese estado “ordenado”. Es decir, las partículas del gas A se encuentran en una mitad del recipiente y las del gas B en la otra mitad.

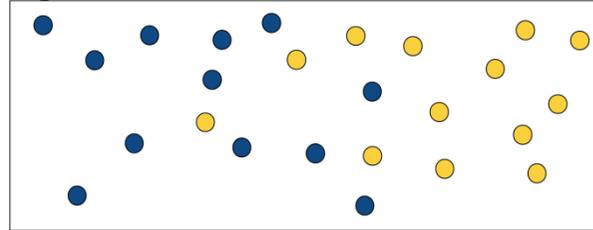
Fig. 1



A esta situación inicial se le asocia pues una baja entropía, dado que el grado de desorden del sistema es mínimo. Las partículas del gas A por un lado y las del gas B por el otro.

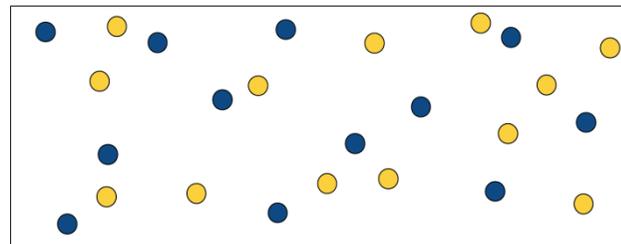
Dado que las partículas de ambos gases poseen cierta cantidad de movimiento, seguidamente, las partículas del gas A comenzarán a penetrar en la región derecha del recipiente y viceversa. Es decir, los gases comenzarán a mezclarse.

Fig. 2



Este proceso de mezcla llegará a su fin cuando dicha mezcla sea homogénea a lo largo del recipiente. Se considerará entonces que el orden existente al inicio del proceso de mezcla habrá desaparecido y la entropía habrá aumentado hasta su valor máximo para el sistema y restricciones dados. Igualmente se puede afirmar que el sistema habrá alcanzado un estado de equilibrio termodinámico, puesto que las diferencias de temperatura y presión entre ambos gases se habrán disipado y con ello, los posibles intercambios de calor (energía) entre ambos gases.

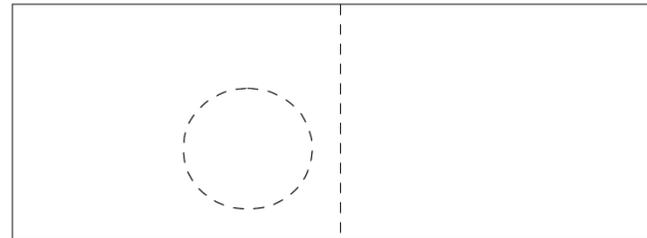
Fig. 3



Desde la perspectiva estadística de la teoría de la información este proceso se podría explicar de la siguiente manera:

Dado un punto o región del espacio perteneciente al recipiente, ¿cuál es la probabilidad de encontrar partículas del gas A o el gas B a lo largo del proceso de mezcla?

Sea esta la región a considerar:



Una vez definida nuestra muestra de estudio, volvamos a la situación inicial de la Fig.1.

La pregunta entonces es la siguiente:

¿Cuál sería la probabilidad de encontrar partículas del gas A? Evidentemente, si el número de partículas es suficientemente alto, obtendremos un valor próximo a 1 (esto es un 100% de probabilidad) ¿y de encontrar partículas del gas B? Absolutamente cero.

Sin embargo, en la situación intermedia (Fig.2) observaríamos como la probabilidad de encontrar partículas del gas A disminuiría en mayor o menor medida (dependiendo de en qué momento del proceso de mezcla nos encontremos) en favor de la probabilidad de encontrar partículas del gas B, que dejaría de ser cero. Una resultado posible sería algo como  $p(A)= 0.8$  y  $p(B)= 0.2$ . Al calcular la entropía del sistema mediante la ecuación dada por Shannon obtendríamos entonces un valor mayor que el de la situación de la figura 1. El sistema se ha desordenado, y lo seguirá haciendo a medida que el tiempo transcurre.

Finalmente comprobaríamos como en el estado de equilibrio termodinámico correspondiente a la fig.3, la probabilidad de encontrar partículas del gas A o del gas B en la región definida, sería prácticamente la misma (0.5). La ecuación de Shannon arrojaría entonces un valor máximo para la entropía del sistema.

Veamos a continuación cómo este ejemplo es extrapolable al estudio de la evolución de la entropía en un sistema musical. En concreto, analizaremos el sistema de la música tonal occidental en base a los grados de la escala, como elemento estructural más significativo.

Para ello, tomaremos nuevamente tres muestras, que ahora no se corresponden a una región espacial del sistema sino a una obra característica de cada período. Por lo tanto, el mensaje que contiene cada una de estas piezas estará codificado a través de 12 posibles símbolos o notas musicales.

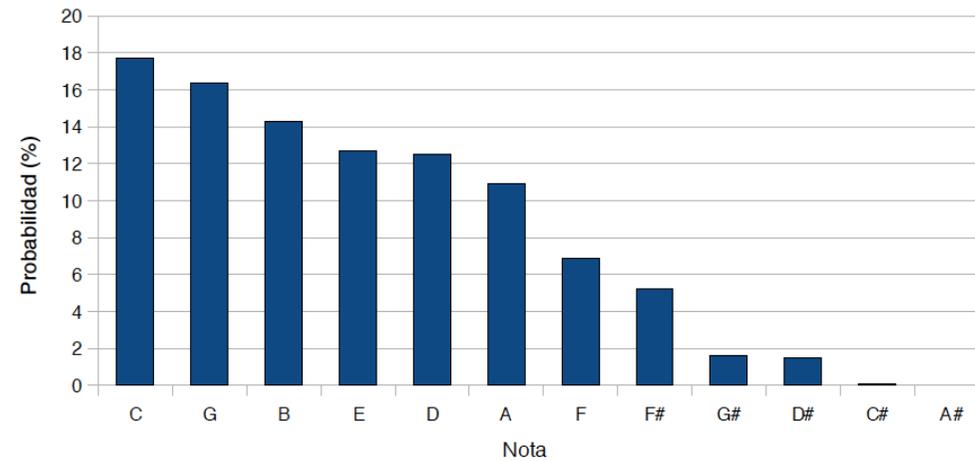
El procedimiento consiste entonces en contar el número de apariciones de cada una de las 12 notas de la escala, de manera que seamos capaces de calcular sus respectivas probabilidades de aparición, cantidad de información asociada y entropía media de la fuente. Esta entropía será característica de cada período y nos permitirá comparar el grado de jerarquización del lenguaje empleado en cada época.

Considerando que nuestro sistema emplea un máximo de 12 posibles símbolos, la ecuación de la entropía propuesta por Shannon arroja un valor máximo de la entropía de 3.585, correspondiente a la situación en la que las 12 notas poseen la misma probabilidad de aparición  $p(i) = 0.083$ .

La primera obra a analizar es la Sonata 201 de Domenico Scarlatti (S.XVIII). Los resultados son los siguientes:

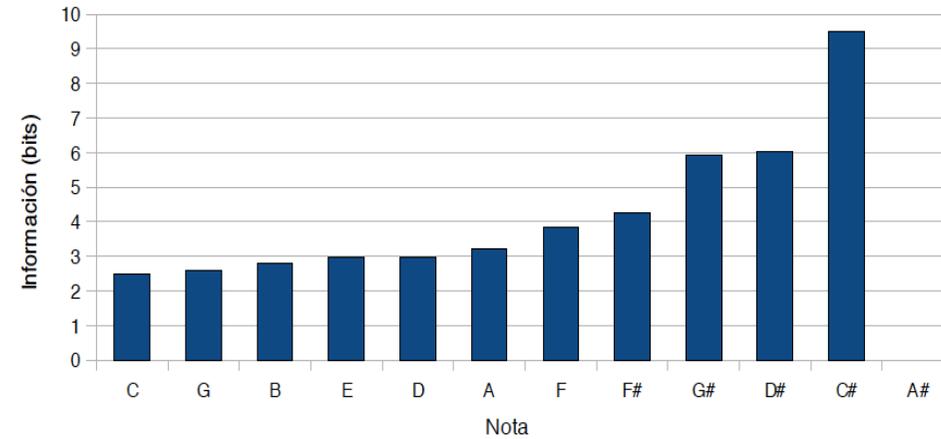
NOTA	Probabilidad p(i)	Información I(i)
C	17,7 %	2,49 bits
C#/Db	0,1 %	9,5 bits
D	12,5 %	2,99 bits
D#/Eb	1,5 %	6,04 bits
E	12,7 %	2,98 bits
F	6,9 %	3,86 bits
F#/Gb	5,2 %	4,25 bits
G	16,4 %	2,6 bits
G#/Ab	1,6 %	5,92 bits
A	10,9 %	3,2 bits
A#/Bb	0%	-
B	14,3 %	2,8 bits
<b>Entropía (Sonata Scarlatti)= 3,064</b>		<b>Rango= 7.01</b>

Al representar en una gráfica las probabilidades de cada nota (ordenadas de mayor a menor) obtenemos:



Es fácil adivinar sin necesidad de ver la partitura, que la obra está escrita en la tonalidad de Do Mayor, pues las dos notas que más se repiten son Do (la tónica) y Sol (dominante).

La información asociada a cada nota será por lo tanto inversamente proporcional a su frecuencia de aparición en la obra:

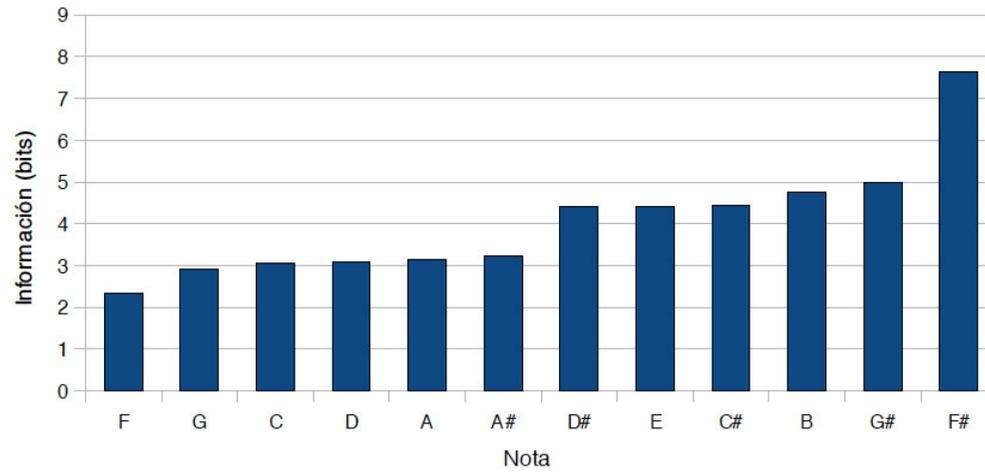
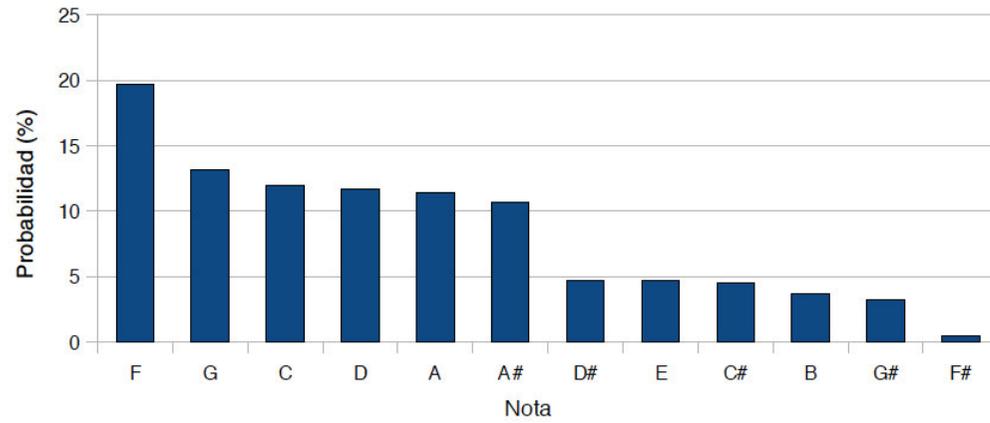


Seguidamente, tomaremos como segunda muestra el Preludio I para piano de Claude Debussy, de carácter impresionista y escrito a principios del siglo XX (1909-1910).

La frecuencia de aparición de cada nota de la escala queda reflejada en la siguiente tabla:

NOTA	Probabilidad p(i)	Información I(i)
C	12%	3,05 bits
C#/Db	4,5%	4,45 bits
D	11,7 %	3,08 bits
D#/Eb	4,7 %	4,41 bits
E	4,7 %	4,41 bits
F	19,7 %	2,34 bits
F#/Gb	0,5 %	7,63 bits
G	13,2 %	2,92 bits
G#/Ab	3,2 %	4,98 bits
A	11,4 %	3,13 bits
A#/Bb	10,63 %	3,23 bits
B	3,67 %	4,77 bits
<b>Entropía (Preludio Debussy)= 3,267</b>		<b>Rango= 5.29</b>

Las gráficas correspondientes a la probabilidad y cantidad de información asociada se muestran a continuación:



Como podemos comprobar, el grado de contraste entre las probabilidades de las distintas notas es menos pronunciado que en la obra de Scarlatti. Se observa claramente una nota (Fa) cuya probabilidad sobresale notablemente sobre las demás y que efectivamente coincide con el centro tonal de la obra.

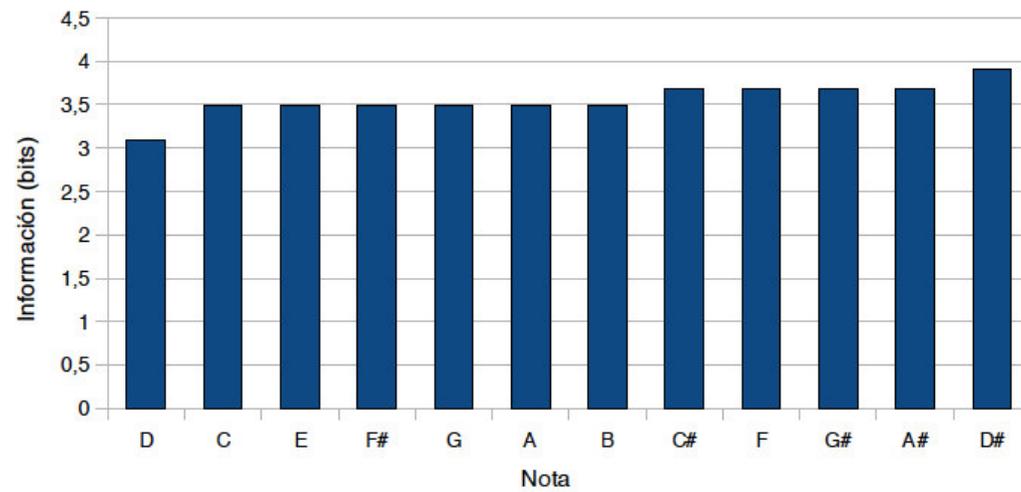
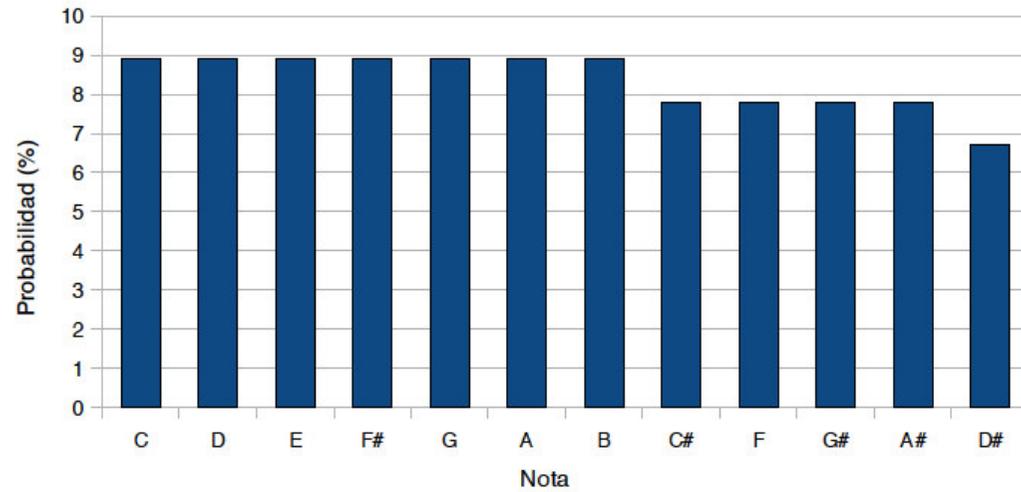
La entropía experimenta consecuentemente un aumento apreciable desde los 3,064 del primer ejemplo, a los 3,267 de esta pieza de Debussy. Nótese que el valor máximo de la entropía para nuestro sistema era de 3,585 y que bastan pequeñas variaciones de unas pocas décimas para que el lenguaje experimente cambios considerables.

He de señalar que las obras se han escogido sin criterio alguno más que el de ser suficientemente representativas de un determinado período evolutivo de nuestro sistema. Si las obras escogidas para cada período hubiesen sido otras, los resultados obtenidos probablemente hubiesen sido muy similares (salvo contadas excepciones).

Finalmente, estudiaremos una pieza característica del período atonal. Concretamente, la Variación II para piano de Anton Webern (1936).

Lo interesante aquí es que, desde este punto de vista, la atonalidad no se presenta como un sistema aparte, distinto del sistema tonal anterior, sino que es consecuencia directa del mismo como resultado de la evolución natural del sistema. Las reglas han cambiado, pero los símbolos empleados siguen siendo los mismos (las 12 notas de la escala cromática).

NOTA	Probabilidad p(i)	Información I(i)
C	8,9 %	3,49 bits
C#/Db	7,8 %	3,68 bits
D	8,9 %	3,49 bits
D#/Eb	6,7 %	3,91 bits
E	8,9 %	3,49 bits
F	7,8 %	3,68 bits
F#/Gb	8,9 %	3,49 bits
G	8,9 %	3,49 bits
G#/Ab	7,8 %	3,68 bits
A	8,9 %	3,49 bits
A#/Bb	7,8 %	3,68 bits
B	8,9 %	3,49 bits
<b>Entropía (Variación Webern)= 3,579</b>		<b>Rango= 0,42</b>



En consecuencia, el proceso de aumento de entropía acontecido, es cualitativamente análogo al que se producía en el ejemplo de la mezcla de dos gases, salvo que ahora, el tiempo necesario para aproximarnos el equilibrio termodinámico (equiprobabilidad de los símbolos del sistema para una muestra dada), es dramáticamente superior. Lo que antes llevaba unos pocos segundos o minutos, se extiende ahora a lo largo de tres siglos. Ello es, a mi modo de ver, un bello ejemplo más de cómo la naturaleza emplea los mismos principios universales a diferentes niveles de escala (fractalidad).

Estos resultados son además consistentes con lo expuesto anteriormente desde el punto de vista cibernético. El sistema evoluciona como resultado de los procesos de adaptación homeostática que se producen en su interacción con el medio. Más concretamente, los sistemas reguladores modifican o incorporan nuevas reglas al código que se traducen en variaciones en la probabilidad de los símbolos disponibles. Inicialmente la jerarquía existente es fuerte, y el sistema se encuentra en un estado mayormente ordenado: unos símbolos son muy probables y otros bastante improbables (un gas a la izda., y el otro a la dcha. del recipiente). Más tarde, se hace necesario incrementar el uso de ciertos símbolos, inicialmente poco probables, con el fin de contrarrestar el mencionado proceso de desgaste producido debido al intercambio de información con el medio.

El orden en el que se van incorporando los diferentes símbolos es algo que veremos en una futura entrega de esta publicación, pero que está íntimamente relacionado con la complejidad de los mismos dentro del sistema formal empleado (fenómeno físico-armónico).

Por último, tras múltiples reiteraciones de este mecanismo de adaptación, el resultado es que todos los símbolos disponibles son utilizados prácticamente con la misma frecuencia, y la jerarquía, o contraste (rango estadístico) en la probabilidad de los mismos, es prácticamente nula, tal y como predecía la segunda ley de la termodinámica.

Las consecuencias de este inevitable estado último de equilibrio termodinámico son múltiples y trascendentales.

El sistema como tal, pierde su capacidad de transmitir información significativa, puesto que a todos los efectos, en lo que a esa variable se refiere, resulta indistinguible de un discurso totalmente aleatorio. La equiprobabilidad de los símbolos presentes en el discurso hace imposible la repetición de patrones, y sin ellos, es difícil comunicar idea alguna.

Sin embargo, el sistema serial dodecafónico<sup>4</sup> propuesto por Schönberg, aporta una solución parcial a esta limitación al incorporar relaciones de segundo orden en la probabilidad de aparición de los símbolos gramaticales; es lo que anteriormente definimos como probabilidad condicionada  $p_i(j)$ . La serie y sus transformaciones, reducen la entropía del sistema y posibilitan, en cierta manera, el proceso de comunicación.

En cualquier caso, más allá de los múltiples experimentos seriales, parece que muchos otros compositores optarían por instaurar sistemas nuevos, ya sea por ampliación de los símbolos disponibles (p.ej. microtonalidad) o mediante el empleo de nuevas variables estructurales que posibiliten otro tipo de discurso con renovado potencial comunicativo (caso del timbre en géneros como la electroacústica/acusmática, el espectralismo, etc.).

Valga de ejemplo la siguiente cita de Iannis Xenakis (1971) acerca de la música estocástica:

*“Como resultado del punto muerto en la música serial, así como de otros motivos, en 1954 originé una música construida en base al principio de la indeterminación; dos años más tarde la llamé “música estocástica”. Las leyes del cálculo de probabilidades entraron en la composición por pura necesidad musical. Pero otros caminos también llevaron a la misma encrucijada, el más importante: los acontecimientos naturales, tales como la colisión del granizo o la lluvia sobre superficies duras, o el canto de las cigarras en un campo veraniego. Estos acontecimientos sonoros están constituidos por miles de sonidos aislados; esta multitud de sonidos, vista como una totalidad, es un nuevo acontecimiento sonoro. Este aconte-*

---

4. <http://es.wikipedia.org/wiki/Dodecafonismo>

*cimiento masivo está articulado y forma un molde temporal flexible, que de por sí sigue las leyes aleatorias y estocásticas. Si alguien desea formar una gran masa a partir de notas puntuales, como con pizzicati de cuerdas, debe saber estas leyes matemáticas, que, en cualquier caso, no son más que una estricta y concisa expresión de cadenas de razonamiento lógico”.*

#### Referencias bibliográficas

- Espejo R, *The viable system model: a briefing about organizational structure*. Syncho, Ltd, Lincoln, UK, 2003.
- Claude E. Shannon, *A Mathematical Theory of Communication*. Bell System Technical Journal, 1948, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
- Ludwig von Bertalanffy, *General system theory - A new approach to unity of science* (Symposium), Human Biology, Dec 1951, Vol. 23, p. 303-361.

### Formato Documento Electrónico (Norma ISO 690-2)

PECINO, Ignacio. *Teoría de Sistemas Musicales. 1ª parte* [online]. Madrid: Sul Ponticello, III época, n. 3, marzo 2014. Disponible en World Wide Web: <<http://www.sulponticello.com/teoria-de-sistemas-musicales/>>. ISSN: 1697-6886



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).