



FACULTAD DE ARTES Y CIENCIAS MUSICALES

CENTRO DE ESTUDIOS ELECTROACÚSTICOS

## EL ESPACIO TÍMBRICO COMO ESTRUCTURA DE CONTROL MUSICAL

David L. Wessel

*Traducción del inglés de Pablo Cetta*

### INTRODUCCION

La investigación sobre el timbre musical busca, en general, obtener representaciones de la estructura perceptual de un conjunto de sonidos, que tenga implicancias en el control expresivo sonoro, tanto para la composición como para la interpretación. A partir de la síntesis digital basada en el análisis, y de experimentos sobre la calidad de la percepción tonal, podemos obtener representaciones del sonido que sugieran modos de proveer un control dimensional de pocas variables sobre las propiedades perceptualmente importantes.

En este artículo describiremos un sistema para la medición del contraste perceptual entre objetos sonoros y el uso de estos datos en programas de computación. Programas que usan algoritmos de escalamiento multidimensionales para generar representaciones geométricas de los datos. En los espacios tímbricos que resultan de los programas de escalamiento, los sonidos son representados como puntos, y a partir de sus distancias es posible buscar relaciones estadísticas interesantes y establecer juicios sobre el contraste de los distintos tonos. La representación espacial nos brinda una interpretación psicoacústica, relacionando sus dimensiones con las propiedades acústicas de los sonidos. Luego, estas propiedades pueden ser directamente controladas en la síntesis. Los esquemas de control que vamos a describir sirven para síntesis aditiva y permiten la manipulación de la distribución de la energía espectral y diversas características temporales de los sonidos. Los esquemas de control han sido probados en contextos musicales. Se dará aquí un particular énfasis en la construcción de líneas melódicas en las cuales el timbre es manipulado nota por nota. También se discutirá el diseño de interfaces de control adaptadas al ser humano y de software para sintetizadores digitales en tiempo real.

### TIMBRE MUSICAL

El timbre se refiere al “color” o calidad de los sonidos, y en general se encuentra conceptualmente divorciado de la altura o la sonoridad. La investigación perceptual sobre el timbre ha demostrado que la distribución de la energía espectral y la variación temporal de esta distribución, provee los determinantes acústicos de nuestra percepción de la calidad sonora (Grey : 1975). Con una excepción notable (Erickson : 1975), los teóricos musicales han dirigido poca atención al control compositivo del timbre. El énfasis primario ha sido puesto sobre la armonía o el contrapunto. La razón de esto se debe probablemente a que la mayoría de los

instrumentos musicales proveen un control muy preciso de la altura, pero no de la manipulación del timbre. A partir del potencial de los instrumentos electroacústicos la situación se torna distinta. Efectivamente, podemos pensar ahora en términos de determinaciones precisas para, a modo de ejemplo, secuencias de notas que cambian de timbre una después de otra. Este artículo trata precisamente sobre este cambio tímbrico de nota a nota.

## **TECNOLOGÍA DE LA SÍNTESIS**

La tecnología digital ofrece sintetizadores poderosos y flexibles. Cantidad de sintetizadores ya han sido construidos y han producido resultados musicales importantes. Como ejemplos notables se incluyen el sistema de síntesis y procesamiento digital diseñado por Peter Samson (1977) en operación en el CCRMA de la Universidad de Stanford, el banco de 256 osciladores digitales diseñado y construido por G. Di Giugno (1976) y el sintetizador digital de Hal Alles y Di Giugno (1977), ambos en operación en el IRCAM; el sintetizador de Alles (1977) en los laboratorios Bell; el sintetizador digital Darmouth (Alonso : 1975). Varios de estos dispositivos ofrecen la posibilidad de realizar una aproximación por “fuerza bruta” a la síntesis de espectros variables en el tiempo, y ricos en valor musical. En este informe trataremos la síntesis aditiva, dada su generalización, pero concentrados en el problema asociado de proveer un control directo sobre las propiedades perceptuales de los sonidos sintetizados.

Antes de comenzar una descripción del procedimiento para el desarrollo de controles que faciliten la manipulación musicalmente expresiva de espectros dinámicos complejos, examinaremos la naturaleza de los datos base acústicos y perceptuales involucrados. La síntesis aditiva requiere una cantidad considerable de información explícita, y exploraremos formas de reducir la cantidad de datos sin perder riqueza en el resultado sonoro. Por otra parte, los datos que podemos obtener de nuestra experiencia perceptual del timbre tienen un carácter bastante distinto al de los datos físicos de la acústica, y es por eso debemos examinar las nociones sobre escalas subjetivas, dimensiones perceptuales, y representaciones estructurales de datos subjetivos. Buscamos información psicoacústica del timbre que tenga implicancias en su control dentro de los contextos musicales.

## **SÍNTESIS ADITIVA Y REDUCCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

En el modelo de síntesis aditiva, un sonido es representado como la suma de componentes sinusoidales, cada una de las cuales varía en el tiempo su frecuencia y amplitud. Moorer (1977) nos brinda un excelente detalle de esto. Para sintetizar un sonido especificamos un número determinado de osciladores por software o hardware, cada uno con sus envolventes de frecuencia y amplitud. Este tipo de síntesis aditiva tiene dos ventajas importantes. Primero, con un número suficientemente grande de osciladores controlables de forma independiente podemos generar una altísima variedad de señales. Sacrificando la eficacia en el procesamiento y con un incremento en la cantidad de datos destinados a las envolventes, podemos imitar la síntesis por FM (Chowning : 1973) u otras técnicas de síntesis no lineales (Arfib :1977; Beauchamp : 1975); Le Brun : 1979; Moorer : 1976). Pero además, podemos producir efectos que no son posibles con estas técnicas. En segundo lugar, podemos analizar sonidos existentes y obtener datos que pueden servir para resintetizar exactamente la señal analizada. Moorer (1976) describió la aplicación del phase vocoder (Potnoff : 1976) en el análisis y síntesis de sonidos musicales. El phase vocoder resultó un avance sobre otros métodos, como el filtro heterodino (Beauchamp : 1969; Moorer : 1975), permitiendo el análisis de sonidos de altura variable o inarmónicos como los de los instrumentos de percusión. Este método también garantiza que cuando el análisis no se modifica, la recuperación de la señal original es exacta.

Propongámonos sintetizar, partiendo de un análisis realizado con un phase vocoder, el timbre de un instrumento musical con 25 armónicos. En este caso son necesarias 25 envolventes de

amplitud y 25 de frecuencia. Almacenar estas funciones en detalle demanda una cantidad considerable de memoria, y si usamos uno de los sintetizadores descritos al principio del artículo, la transferencia de las envolventes puede exceder el ancho de banda del vínculo entre la computadora y el sintetizador. Más aún, si las formas de las envolventes van a ser modificadas, el tiempo de procesamiento puede exceder las capacidades de operación en tiempo real. Claramente se desprende que debemos reducir los datos para poder trabajar en tiempo real.

Un procedimiento particularmente atractivo que produce una reducción significativa en los datos es aproximar a las funciones de envolvente curvilíneas con funciones compuestas por fragmentos de rectas (Moorer : 1977). Tales aproximaciones pueden ser almacenadas en términos de las coordenadas de los puntos de quiebre de las rectas. Estos segmentos permiten, además, la modificación de las funciones variando simplemente las coordenadas de los puntos. Pero, ¿qué obtenemos luego de una reducción tan drástica?. ¿La calidad de audio y la riqueza del timbre se mantienen?.

El método de los segmentos de recta ha producido resultados satisfactorios en sonidos sintetizados de bronce (Risset y Mathews : 1969), (Beauchamp : 1969). Grey (1975) realizó un experimento cuidadosamente controlado para determinar si era posible discriminar entre ambos tipos de envolventes. Usó 16 sonidos de instrumentos orquestales y concluyó en que la discriminación era sumamente difícil.

## **REPRESENTACIÓN DE LAS DIFERENCIAS TÍMBRICAS**

En las próximas secciones describiremos un método de caracterización de la estructura de relaciones de un conjunto de sonidos que difieren en su timbre. Mostraremos luego cómo tales representaciones pueden ser relacionadas con las propiedades acústicas de los sonidos. También mostraremos que las representaciones pueden ser empleadas para componer esquemas tímbricos cuyas propiedades perceptuales puedan predecirse a partir de la estructura de la representación. Finalmente, discutiremos que al haber logrado esto, habremos diseñado un esquema para el control sistemático de las características acústicas más importantes del sonido.

Desde un punto de vista cuantitativo, los datos provenientes de los juicios subjetivos poseen un estado peculiar de incertidumbre (Luce : 1972). La noción de unidad de medida tal como el decibel o el hertz resulta difícil, o casi imposible de establecer para las escalas subjetivas. Podemos desde ya elegir unidades de escalas subjetivas como los sonos o los mels, como ha hecho Stevens (1959), pero dichas unidades en el contexto de un experimento pueden no permanecer estables en otros contextos. De hecho, el son, la unidad de sonoridad, no es invariante para los dos oídos de un sujeto con audición normal (Levelt : 1972). Estas unidades son útiles en el sentido que proveen un lenguaje común en la discusión de las habilidades de una población de oyentes, pero no es posible tratarlas con el álgebra del análisis dimensional que sirve de fundamento a las mediciones en las ciencias físicas. Creo correcto ser pesimista en cuanto a la posibilidad de que las escalas subjetivas puedan ser elevadas a la altura de las mediciones físicas. Pero los juicios subjetivos, si son recolectados de un número suficiente de objetos, en este caso sonidos, pueden brindar una estructura representable, y esta estructura puede ser relacionada con diversos parámetros acústicos.

Los juicios perceptuales tienden a ser relativos por naturaleza. Con pocas excepciones, tendemos a juzgar un objeto en términos de relaciones con otros objetos. Los juicios relacionales son de gran interés en la música, dado que esta involucra esquemas compuestos de varios sonidos. Los juicios sobre el grado de similitud o disimilitud entre dos sonidos puede realizarse de un modo intuitivo. Podemos decir que el sonido *A* es más similar al sonido *B* que el *C* sin tener que nombrar o identificar explícitamente los atributos que participaron del juicio. Grupos de investigación del IRCAM, la Universidad Estatal de Michigan y del CCRMA de Stanford han realizado experiencias de juicios sobre las similitudes de una variedad de

contextos musicales y sonoros. Una de las técnicas más generales es representar las disimilitudes perceptuales como distancias en una configuración espacial. Se comienza con juicios de diferencias entre todos los pares de sonidos tomados del conjunto. Esta matriz de diferencias luego se procesa con algún programas de escalamiento multidimensional, como KYST (Krushal : 1964). El programa produce una matriz espacial de  $n$  dimensiones con puntos que representan a los objetos sonoros.

Tal vez en este punto sería mejor mostrar cómo se realizan los experimentos de escalamiento multidimensional. Hemos desarrollado recientemente en el IRCAM un conjunto de programas que facilitan el diseño, ejecución e interpretación de los experimentos. En el ejemplo siguiente empleamos el mismo conjunto de sonidos usados por Grey (1975) y Gordon (Grey y Gordon : 1978), y los presentados en la serie “Lexicon of Analyzed Tones” (Moorer :1877, 78). Este conjunto consiste de 16 sonidos de instrumentos orquestales sintetizados y de un grupo de 8 instrumentos híbridos producidos intercambiando las envolventes espectrales entre los miembros del primer grupo. El objetivo de nuestro experimento será el de proveer una representación de estos 24 timbres como puntos de un espacio euclidiano, y la interpretación de esta representación en términos de las propiedades acústicas de los sonidos.

## **METODOLOGÍA GENERAL**

El procedimiento que provee una representación interpretada de los sonidos involucra los siguientes cinco pasos:

1. Selección de los materiales de estudio
2. Recolección de juicios sobre disimilitudes
3. Representación de los juicios con esquemas espaciales y gráficos
4. Interpretación psicoacústica de la estructura
5. Verificación de las interpretaciones en situaciones musicales

## **SELECCIÓN DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO**

En la preparación de los sonidos que deseamos representar debemos prestar atención a (A) el número de elementos sonoros, (B) el problema de la ecualización de los sonidos respecto a los parámetros que deseamos ignorar, y (C) el rango de variación dentro del conjunto de sonidos.

### **A – El número de elementos sonoros**

Un número mínimo de elementos sonoros es requerido para obtener una representación significativa, que permita apreciar la ubicación de los puntos en el espacio con eficacia. En la mayoría de las investigaciones psicológicas que emplean escalamiento multidimensional suelen emplearse 10 puntos en dos dimensiones y 15 en tres. En nuestras investigaciones recientes hemos usado de 20 a 30 puntos para espacios de dos a tres dimensiones, respectivamente.

### **B – Ecualización del sonido respecto a parámetros extraños**

De ser posible, los sonidos deben ser ecualizados respecto a las propiedades que no deben influir sobre el juicio. Cuando estudiamos el timbre, el procedimiento usual es ecualizar la altura, la duración subjetiva, la sonoridad y aspectos informativos del ambiente. Por otra parte, si estudiamos la información del ambiente (reverberación), probablemente empleemos una fuente estándar y trabajemos sólo sobre los parámetros de la reverberación. Debemos prestar atención a aquello que es ecualizado. Si ecualizamos respecto a la sonoridad, por ejemplo, y los sonidos del conjunto poseen distintas envolventes espectrales y tiempos de ataque, no será

suficiente con igualar el nivel de presión sonora (en términos de decibeles). En este caso no obtendremos un modelo satisfactorio para la percepción de la sonoridad de los espectros dinámicos (Moorer : 1975) y deberemos recurrir a factores empíricos. Grey (1975) provee buenos ejemplos de procedimientos de corrección subjetiva para la altura, la duración y la sonoridad.

### **C – Control del rango de variación dentro del conjunto**

El rango de variación de los timbres de los sonidos seguramente puede diferir de un tipo de estudio a otro. Algunas veces deseamos investigar el dominio del timbre a partir de un amplio rango de variación que incluya percusión inarmónica y sonidos con mayor o menor contenido armónico. En otras situaciones se imponen mayores restricciones, como en el estudio descrito en este artículo, donde empleamos sonidos que derivan de los instrumentos de la orquesta ejecutados de modo convencional. Aún sería posible restringir más el grado de variación con el propósito de detectar matices todavía más sutiles.

Una vez establecido el rango de variación, debemos tener presente que la variación sea homogénea. Consideremos el siguiente ejemplo. Si elegimos ocho sonidos percusivos y otros ocho no percusivos, sin considerar un vínculo entre los de cada categoría corremos el riesgo de segmentar la información por la simple comparación de un grupo con el otro. En situaciones como esta, los programas de escalamiento multidimensional podrán dar respuestas denominadas soluciones degeneradas, con ausencia del análisis interno de cada grupo. Shepard (1974) aporta una discusión a este problema y líneas de solución.

Para facilitar la selección visual y auditiva de los sonidos, desarrollamos un programa de ejecución en la computadora DEC-10 del IRCAM. Este programa se denomina KEYS y fue escrito por Bennet Smith (Wessel y Smith : 1977). Permite visualizar nombres de archivos y ejecutarlos con acceso aleatorio. Esto ayuda a una rápida comparación auditiva de un gran número de sonidos distintos.

### **RECOLECCIÓN DE JUICIOS SOBRE DISIMILITUDES TÍMBRICAS**

Si bien existe una gran variedad de formas de recolectar los resultados de las disimilitudes perceptuales, encontramos que un simple puntaje ayuda en el momento de realizar los juicios. En el IRCAM hemos usando estimaciones directas de la disimilitud entre dos sonidos. Empleamos un programa escrito por Bennett Smith denominado ESQUISSE, donde se ubica al oyente en la terminal, y a través del teclado puede ejecutar los sonidos, repetirlos y poner un puntaje del 0 al 9. La secuencia llega al oyente de forma aleatoria, y contempla todos los pares posibles ( $n(n-1)/2$ , donde  $n$  es el número de sonidos del conjunto). Luego que todos los juicios son emitidos se forma la matriz de disimilitudes.

### **REPRESENTACIÓN BIDIMENSIONAL DE 24 TIMBRES DE INSTRUMENTOS ORQUESTALES**

Servi de jurado usando un conjunto de 24 instrumentos orquestales de John Grey. Estos sonidos fueron sintetizados usando envolventes de segmentos de recta y ecualizados subjetivamente en altura, sonoridad y duración. La representación generada por el programa KYST se observa en la figura 1. El eje vertical refleja la *distribución de la energía espectral* de los sonidos, y el horizontal la *naturaleza del transiente de ataque*. Los sonidos de la parte superior del gráfico son brillantes en carácter, y si nos desplazamos hacia abajo, los timbres se vuelven más dulces. En varios estudios sobre espacios tímbricos (Wedin y Goude : 1972; Wessel : 1973; Grey : 1975; Ehresman y Wessel : 1978; Grey y Gordon : 1978; Wessel y Grey : 1978) aparece esta

dimensión relativa a la distribución de la energía espectral. Utilizando el modelo de sonoridad de Zwicker (Zwicker y Scharf : 1965) se obtuvo una interpretación acústica consistente, calculando un esquema de excitación del espectro. La transformación del espectro acústico compensa ciertas propiedades del sistema auditivo, como la banda crítica y la distribución asimétrica del enmascaramiento desde las bajas hasta las altas frecuencias. El promedio de la distribución de la energía espectral compensada es luego calculada y correlacionada con las proyecciones de los puntos sobre el eje relativo al brillo. En todos estos estudios estas correlaciones han sido muy altas.

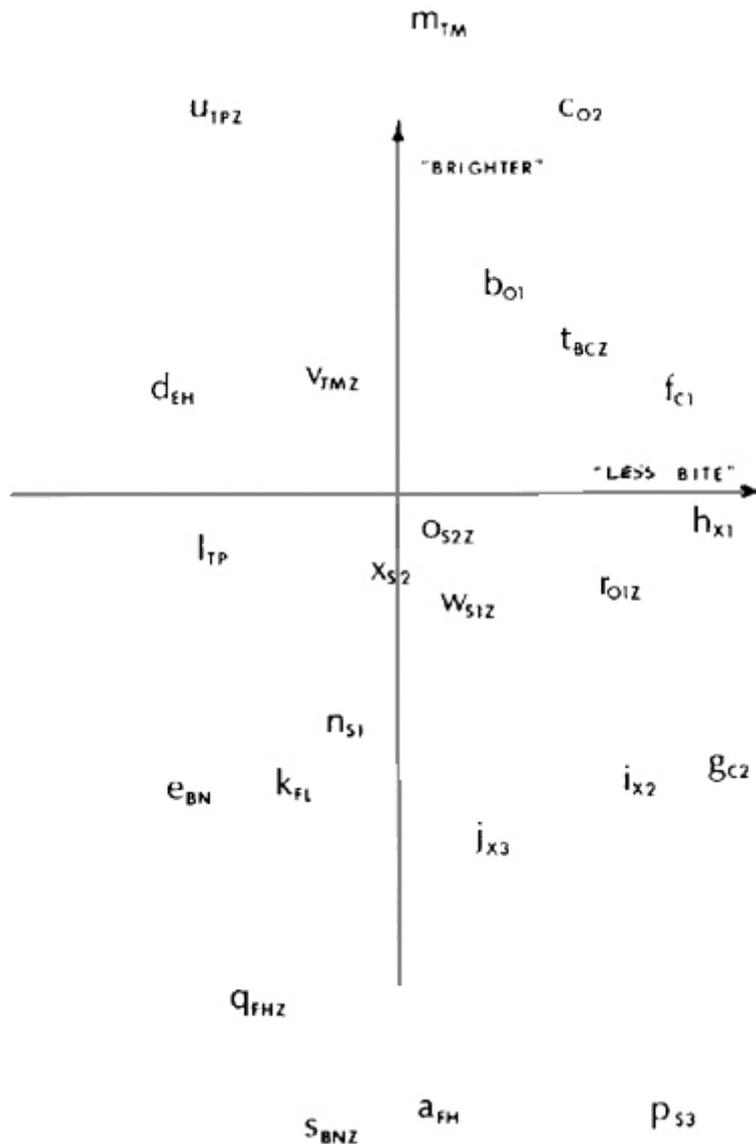


Figura 1

Representación bidimensional de 24 sonidos pseudo instrumentales de Grey. El espacio fue producido usando el programa KIST. Las letras en minúscula identifican los sonidos grabados que acompañan este artículo, distribuido por el IRCAM. Las mayúsculas identifican los sonidos según (Grey : 1975, 1977), (Grey y Gordon : 1978) y (Gordon y Grey : 1978). Los sonidos originales sobre los cuales están basadas estas versiones sintetizadas fueron presentados en las serie "Lexicon of Analyzed Tones" del Computer Music Journal.

Abreviaturas : O1, O2 = oboes, FH = trompa, BN = fagot, C1 = clarinete en mib, C2 = clarinete bajo, FL = flauta, X1, X2, X3 = saxofones, TP = trompeta, EH = corno inglés, S1 = cello sul ponticello, S2 = cello normal, S3 = cello con sordina sul tasto, FHZ = FH modificado en su envolvente espectral, BNZ = BN modificado, S1Z = S1 modificado con envolvente espectral de S2, S2Z = S2 modificado con S1, TMZ = TM modificado con TP, BCZ = C2 modificado con O1, O1Z = O1 modificado con C2.

La dimensión horizontal se relaciona con la calidad del ataque. En la sección siguiente discutiremos posibilidades de cuantificación de esta dimensión.

## PREDICCIONES SOBRE ESQUEMAS TIMBRICOS

En un sentido amplio, la música se conforma de esquemas sintácticos. Es la naturaleza de las relaciones entre los elementos de los esquemas la que resulta de gran importancia para la percepción. En las próximas series de ejemplos deseo mostrar que cuando se organizan cambios en el espacio tímbrico de nota a nota, es posible predecir esquemas perceptuales de organización.

Examinaremos primero algunos efectos auditivos que se relacionan con las dimensiones del espacio y sus distancias. En los esquemas siguientes, la secuencia de notas alternará entre dos timbres diferentes mientras la secuencia de alturas y el tiempo rítmico permanecerán iguales. La secuencia de alturas es simple y repetitiva : tres notas ascendentes, como se observa en la figura 2. La secuencia tímbrica en alternancia está representada por las notas marcadas con “O” y “X”. Cuando la distancia tímbrica entre notas adyacentes es pequeña, las líneas de altura ascendentes repetidas dominan nuestra percepción. No obstante, cuando la diferencia tímbrica crece a lo largo del eje de “distribución de la energía espectral”, la percepción de la organización del modelo se altera drásticamente. La línea se divide ahora por los amplios intervalos tímbricos, y para muchos oyentes, se forman dos líneas descendentes entrelazadas, cada una con su propia identidad tímbrica. Este tipo de efecto es conocido como “fisión melódica” o “segregación del flujo auditivo” en la literatura psicoacústica (Bergman and Campbell : 1971; Van Noorden : 1975), y es consecuencia de la gran diferencia en la distribución de energía entre los timbres en alternancia.



Figura 2

Modelos ascendentes de altura en “tres” con dos timbres en alternancia (“O” y “X”). Si la diferencia tímbrica entre notas adyacentes es grande, tendemos a percibir líneas descendentes formadas por las notas de igual timbre.

Moviéndonos sobre el eje que interpretamos como las características de ataque de los sonidos obtenemos un efecto diferente. Percibimos un ritmo irregular aún cuando los tiempos de ataque de las notas son los mismos. Esta observación tiene implicancias importantes en el control de la síntesis sonora. Cuando alteramos las propiedades del ataque de un sonido, probablemente influenciamos la percepción de la ubicación temporal de ese ataque. Esta pérdida de sincronía entre el tiempo de ataque físico y el tiempo de ataque subjetivo ha sido observada con sonidos del habla por Morton y otros (1976). El procedimiento experimental de Morton ofrece la posibilidad de determinar los tiempos de ataque percibidos para un grupo de notas. Emplea una secuencia en alternancia *ABAB...AB* similar a la antes descrita. El oyente ajusta el corrimiento en el ataque para todas las *B* de la secuencia, hasta que ésta es percibida de forma regular. Tal vez podamos aplicar un método semejante al timbre musical, para predecir con más precisión cuándo los ataques percibidos de los sonidos con diferentes evoluciones espectrales van a ocurrir.

Con los ejemplos anteriores hemos verificado la interpretación del espacio tímbrico y hemos demostrado que para el dominio sonoro, las propiedades del espacio retienen su validez frente a situaciones ricas musicalmente. En el próximo ejemplo, que involucra a las analogías tímbricas,

deseo demostrar que otras propiedades de la geometría del espacio tímbrico nos permiten hacer predicciones acerca de la percepción de esquemas.

## ANALOGÍAS TÍMBRICAS

Con frecuencia los compositores realizan transposiciones de esquemas de alturas. Parece natural preguntar si las *transposiciones de secuencias tímbricas* también funcionan. En virtud de esto, David Ehresman y yo (Ehresman y Wessel : 1978) probamos un modelo del paralelogramo de analogías desarrollado por Rumelhart y Abramson (1973). La idea básica se ilustra en la figura 3. Si realizamos un esquema tímbrico de dos sonidos (secuencia *A-B* de la figura) y nos proponemos obtener una secuencia análoga (transpuesta, para nuestros propósitos) comenzando con el timbre *C*, la respuesta ideal será *D*, que es la que mejor completa el paralelogramo en el espacio.

Para probar esta idea, presentamos a un grupo de oyentes cuatro soluciones diferentes de analogías tímbricas de la forma *A->B* es a *C->D*. Se les solicitó que ordenaran las opciones comenzando por la mejor. La idea era probar si el puntaje atribuido era proporcional a las distancias entre los sonidos.

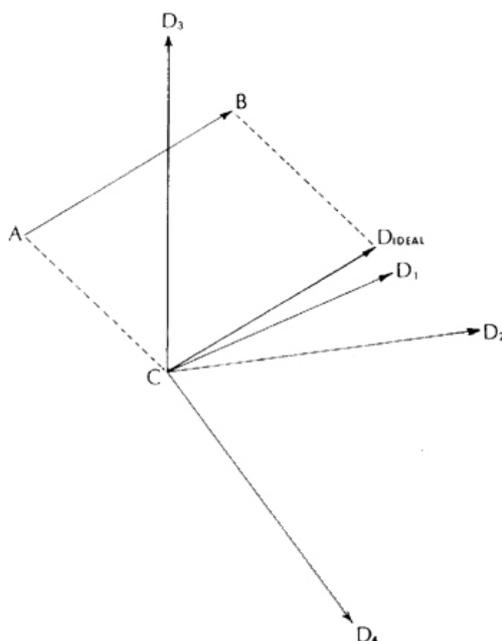


Figura 3

Modelo del paralelogramo de analogías tímbricas. *A->B* es un cambio en el timbre; *C->D* es la analogía deseada, *C* es dado; *D* es la solución ideal y *D1*, *D2*, *D3* y *D4* son las soluciones ofrecidas a los oyentes.

La tabla 1 muestra el resultado del experimento para nueve oyentes, que ordenaron las soluciones de 40 problemas de analogía distintos. Las entradas en la tabla muestran la proporción de juicios, promediada sobre oyentes y analogías, donde la alternativa *I* más cercana al punto de analogía ideal (*J*) fue calificada como la mejor solución. *I* es el índice de la fila y *J* el de la columna. La columna 1 muestra que la predicción fue exitosa. De hecho, la distancia

entre una alternativa y el punto de analogía ideal predice no sólo la mejor solución sino el ordenamiento del puntaje para las otras alternativas.

Distancia entre la alternativa y la mejor solución	Puntaje asignado por el oyente			
	1	2	3	4
1	.422	.303	.159	.119
2	.322	.283	.217	.178
3	.169	.267	.358	.206
4	.086	.147	.269	.497

Tabla 1

## DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL PARA LAS REPRESENTACIONES PERCEPTUALES

La representación del espacio tímbrico sugiere esquemas relativamente directos para el control del timbre. La idea básica es especificar coordenadas en un espacio particular. Si estas coordenadas caen entre tonos existentes en el espacio, lograr el nuevo timbre a partir de la interpolación. La consistencia de este método ha sido probada por Grey (1975), quien utilizó pares de timbres y formó secuencias de sonidos interpolados, modificando los puntos de las envolventes a partir de un esquema de interpolación lineal. Estas secuencias eran percibidas de manera suave, sin exhibir sobresaltos en los cambios. Estos conjuntos de sonidos eran luego empleados como material de base para la realización de mediciones subjetivas destinadas a determinar un nuevo espacio perceptual. Ambos espacios resultaron ser coincidentes.

La manera más natural de moverse en el espacio tímbrico es a través de controles relacionados a la representación del espacio. He podido probar un tipo de control similar, en tiempo real (Wessel : 1976) en el IRCAM. El mismo utiliza una computadora que controla el banco de osciladores de Di Giugno. Una dimensión del espacio controla la distribución de la energía espectral, mientras que el otro controla los tiempos de ataque, o bien, el sincronismo entre las componentes. Para facilitar esta tarea, deberíamos desarrollar un lenguaje de computación específico que nos permita tratar las envolventes con mayor eficacia. Grey y sus colegas de Stanford han desarrollado un lenguaje para este propósito (Kahrs : 1977), y nuestro grupo del IRCAM está trabajando en algo similar. La idea básica del lenguaje es proveer una estructura de control flexible que permita especificar parámetros, secuenciar y combinar distintos procedimientos de creación o modificación de envolventes. Estos procedimientos deben incluir el acortamiento o estiramiento de la duración, cambiar alturas, cambiar envolventes espectrales, sincronizar o desincronizar las componentes, etc. Con un lenguaje de estas características sería posible unir directamente las operaciones sobre la colección de envolventes a las propiedades de la representación perceptual del material.

## AGRADECIMIENTOS

Desearía Agradecer a John Grey y a John Gordon por el aporte de sus sonidos y sus comentarios, a Gerald Bennett, Andy Moorer, Wayne Slawson y a John Strawn por sus comentarios y por la lectura crítica del manuscrito.

*Este texto fue publicado en el Volumen 3 Numero 2 de Computer Music Journal, en Junio de 1979. El Computer Music Journal se publica actualmente por M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts.*

## REFERENCIAS

- Alles, H. G. (1977a) "A Portable Digital Sound Synthesis System." *Computer Music Journal*, Vol. 1, N° 4, pp. 5 -6.
- Alles, H. G.(1977b) "A Modular Approach to Building Large Digital Synthesis Systems." *Computer Music Journal*, Vol. 1, N° 4, pp. 10-13.
- Alles, H. G., and DiGiugno, G. (1977c) "A One Card, 64 Channel Digital Synthesizer." *Computer Music Journal*, Vol.1, N° 4, pp. 7-9.
- Alonso, S., Appleton, J. H., Jones, C. (1975) "A Special Purpose Digital System for the Instruction, Composition, and Performance of Music." *Proc. of the 1975 Conference on Computers in Undergraduate Curricula*, 6,17-22.
- Arfib, D. (1977) "Digital Synthesis of Complex Spectra by Means of Non-Linear Distortion of Sine Waves an Amplitude Modulation." Paper presented at the 1977 International Computer Music Conference, Center for Music Experiment, University of California et San-Diego, La Jolla.
- Beauchamp, J. W. (1969) "A computer System for Timbre Variant Harmonic Analysis and Synthesis of Musical Tones", in *Music by Computers*, edited by H. von Foerster and J. W. Beauchamp. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Beauchamp, J. W. (1975) "Analysis and Synthesis of Cornet Tones Using Nonlinear Interharmonic Relationships." *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 23. pp.778-795.
- Bregman, A. S., and Campbell, J. (1971) "Primary Auditory Stream Segregation and Perception of Order in Rapid Sequences of Tones." *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 89, pp. 244-249.
- Carroll, J. D., and Chang, J. J. (1972) "Simules : Simultaneous Linear Equation Scaling." *Proceedings, 80th Annual Convention of American Psychological Association*.
- Chowning, J. M. (1973) "The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation." *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 21, pp. 526-534. Reprinted in *Computer Music Journal*, Vol.1 N° 2, pp. 46-54, 1977.
- DiGiugno, G. (1976) "A 256 Digital Oscillator Bank." Paper presented at the 1976 International Computer Music Conference, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Ehresman, D., and Wessel, D. L. (1978) "Perception of timbral Analogies." IRCAM Technical Report N° 13.
- Erickson, R. (1975) *Sound Structure in Music*. University of California Press, Berkeley and Los Angeles.
- Grey, J. M. (1975) *Exploration of Musical Timbre*. Stanford Univ. Dept. of Music Tech. Rep. STAN-M-2.
- Grey, J. M., and Moorer, J. A. (1977) "Perceptual Evaluations of Synthesized Musical Instrument Tones." *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 62, pp. 454-62,1977.
- Grey, J. M. (1977) "Multidimensional Perceptual Scaling of Musical Timbre." *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 61, pp. 1270-1277, 1977.
- Gordon, J., and Grey, J. M. (1978) "Perceptual Effects of Spectral Modifications on Orchestral Instrument Tones." *Computer Music Journal*, Vol. 2, N° 1, pp. 24-31.
- Kahrs, M. (1977) "A Computer Language for Psychoacoustic Study and Musical Control of Timbre." Paper presented at the 1977 International Computer Music Conference. Center for Music Experiment, University of California at San Diego, La Jolla.
- Kruskal, J.B. (1964a) "Multidimensional Scaling by Optimizing Goodness of Fit to a Nonmetric Hypothesis." *Psychometrika*, Vol. 29, pp. 1 -27.
- Kruskal, J.B. (1964b) "Nonmetric Multidimensional Scaling A Numerical Method." *Psychometrika*, Vol. 29, pp. 115-129.
- Le Brun, M. (1979) "Waveshaping Synthesis," *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 27, N° 4, pp. 250-266.
- Levelt, W.J. M., Riemersma, J.B., and Bunt, A.A. (1972) "Binaural Additivity of Loudness," *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, Vol. 25, pp. 51-68.

- Luce, R. D. (1972) "What Sort of Measurement is Psychophysical Measurement ?" *American Psychologist*, February, pp. 96-106.
- Moorer, J.A. (1975) "On the Loudness of Complex, TimeVariant Tones." Stanford University, Department of Music, Tech Report STAN-M-4.
- Moorer, J.A. (1976) "The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Discrete Summation Formulae." *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol.24, pp.717-727.
- Moorer, J. A. (1976) "The Use of the Phase Vocoder in Computer Music Applications." Presented at the 55th Convention of the Audio Engineering Society ; available as Preprint N° 1146 (E1).
- Moorer, J. A. (1977) "Signal Processing Aspects of Computer Music -- A Survey." *Proceeding of the IEEE*, Vol. 65, N° 8, pp. 1108-1137, and *Computer Music Journal*, Vol.1, N° 1, pp. 4-38.
- Moorer, J.A., Grey, J.M., and Snell, JAI., (1977) "Lexicon of Analyzed Tones (Part I : Violin Tone)", *Computer Music Journal*, Vol. 1, N° 2, pp. 39 -45.
- Moorer, J.A., Grey, J.M., and Strawn, J. (1977) "Lexicon of Analyzed Tones (Part II :Clarinet and Oboe Tones)", *Computer Music Journal*, Vol. 1, N° 3, pp. 12-29.
- Moorer, J.A., Grey, J.M., and Strawn, J. (1978) "Lexicon of Analyzed Tones (Part III: the Trumpet)", *Computer Music Journal*, Vol. 2, N° 2, pp. 23-31.
- Morton, J., Marcus, S., and Frankish, C. (1976) "Perceptual Centers (P-Centers)" *Psychological Review*, Vol. 83, N° 5, pp. 405-408.
- Portnoff, M.R. (1976) "Implementation of the Digital Phase Vocoder Using the Fast Fourier Transform." *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-24, pp. 243- 248.
- Risset, J. C. and Mathews, M.V. (1969) "Analysis of Musical Instrument Tones." *Physics Today*, Vol. 22, pp. 23-30.
- Rumelhart, D.E., and Abrahamson, A.A. (1973) "Toward a Theory of Analogical Reasoning." *Cognitive Psychology*, Vol. 5, pp. 1-28.
- Samson, Peter (1977) "Systems Concepts Digital Synthesizer Specifications." Available from Systems Concepts, 520 Third Street, San Francisco, California 94107.
- Shepard, R. N. (1966) "Metric Structures in Ordinal Data." *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 3, pp. 287 315.
- Shepard, R. N. (1972) "Psychological Representation of Speech Sounds," in *Human Communication*, edited by EX. Davis and P.B. Denes. Mc Graw -Hill, New York.
- Shepard, R.N. (1974) "Representations of Structure in Similarity Data : Problems and Prospects." *Psychometrika* 39, 373-421.
- van Noorden, L. (1975) "Temporal Coherence in the Perception of Tone Sequences." Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven, Holland.
- Wedin, L. and Goude, G. (1972) "Dimension Analysis of the Perception of Instrumental Timbre." *Scandinavian Journ. Psych.*, Vol.13, pp. 228-240.
- Wessel, D.L. (1973) "Psychoacoustics and Music : A Report from Michigan State University." *PAGE : Bulletin of the Computers Arts Society*, Vol. 30.
- Wessel, D.L. and Grey, J.M. (1978) "Conceptual Structures for the Representation of Musical Material." IRCAM Technical Report #14.
- Wessel, D.L. and Smith, B. (1977) "Psychoacoustic Aids for the Musician's Exploration of New Material." Paper presented at the 1977 International Computer Music Conference, Center for Music Experiment, University of California at San Diego, La Jolla.
- Wessel, D.L. (1976) "Perceptually Based Controls for Additive Synthesis." Paper presented at the 1976 International Computer Music Conference, Massachusetts Institute of Technology.
- Zwicker, E. and Sharf, B. (1965) "A Model of Loudness Summation." *Psych. Review*, Vol. 72(1), pp. 3-26.