

INSTRUMENTO MUSICAL CONTROLADO POR ORDENADOR

Por: Jorge Alonso, Fernando Blasco, Florentino Briones, Juan Pablo Fernández, José Felipe Flores, Purificación Guerra, J.A. Gutierrez de Mesa y Horacio Vaggione del Seminario de Análisis y Generación Automática de Formas Musicales.

INTRODUCCION

Una vibración del aire con frecuencia comprendida entre 20 y 20.000 ciclos por segundo es percibida por el oído humano como un sonido. Un instrumento musical es un aparato capaz de producir ondas de este tipo, aunque generalmente comprendidas entre límites más estrechos.

El instrumento musical controlado por ordenador que describiremos a continuación consta esencialmente de unos osciladores de alta frecuencia, a partir de los que, por división, se obtiene con un pequeño margen de error cualquier frecuencia audible deseada. El ordenador controlará precisamente el número por el que hay que dividir la frecuencia base.

El timbre de un instrumento viene dado por la forma que tiene la onda emitida. Esta forma es posible descomponerla en una suma de ondas más sencillas cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Son los llamados armónicos.

En los estudios clásicos estas ondas más sencillas en las que se descompone la onda emitida, son ondas senoidales. Nosotros utilizaremos ondas cuadradas, que son las que podemos producir más fácilmente. De esta forma una nota tendrá un timbre u otro según la intensidad relativa entre las distintas ondas cuadradas que la componen. Estas intensidades relativas serán también controladas por el ordenador.

Otra característica importante de las notas generadas por un instrumento es la variación de su intensidad a lo largo del tiempo. Es lo que se llama envolvente de la nota y que, en nuestro caso, también será controlada por ordenador.

La gran capacidad de control de un ordenador nos permitirá que el instrumento sea polifónico, es decir, capaz de producir varias notas simultáneas, cada una con timbres y envolventes diferentes. Además, dando a las frecuencias variaciones aleatorias, se podrán producir ruidos coloreados de distinto tipo.

El instrumento podría ser controlado directamente por el ordenador, o, como que-

remos, por una cinta magnética preparada de antemano por él.

GOB - Generador de ondas básicas

Las ondas que hay que producir inicialmente para que, por división, nos den las ondas deseadas, habrán de ser de alta frecuencia para poder obtener una precisión aceptable.

Sea F la frecuencia básica, f , la frecuencia deseada y N , el número por el que hay que dividir F para obtener f . Es decir

$$f = \frac{F}{N}$$

Dada la constitución digital de los circuitos del aparato, sólo podremos utilizar divisores enteros, que además, tendrán que ser múltiplos de una cierta constante K que dependerá de los armónicos que queramos producir, como veremos más adelante. Tendremos pues:

$$f + \delta f = \frac{F}{K \cdot n}$$

donde δf es el error con que obtendremos la frecuencia f , y n es el número entero que habrá de suministrar el ordenador.

Si pudieramos dividir por un número cualquiera, no entero, podríamos obtener exactamente la frecuencia f

$$f = \frac{F}{K(n + \delta n)}$$

donde δn es la diferencia entre el número por el que habría que dividir, y el entero más próximo. Por tanto

$$\delta f = \frac{F}{K \cdot n} - \frac{F}{K(n + \delta n)} = \frac{F}{K} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n + \delta n} \right) = \frac{F \delta n}{K n(n + \delta n)} = f \frac{\delta n}{n}$$

El error relativo será

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\delta n}{n}$$

Como $|\delta_n| \leq 0.5$

$$\left| \frac{\delta f}{f} \right| \leq 0.5 \frac{1}{n} = 0.5 \frac{(f + \delta f) K}{F}$$

Si queremos un mínimo de armónicos, K tendrá que ser 120, como veremos más adelante. Por tanto

$$\left| \frac{\delta f}{f} \right| \leq \frac{60 (f + \delta f)}{F}$$

como la máxima frecuencia que queremos obtener es 20.000, tendremos que

$$\left| \frac{\delta f}{f} \right| \leq \frac{1200000}{F}$$

Si queremos que el error relativo sea menor que un 0.5% habrá de ser

$$\frac{1200000}{F} < 0.005$$

o sea

$$F > \frac{1200000}{0.005} = 240.000.000$$

Como esta frecuencia es excesivamente alta, lo que acarrearía problemas tanto técnicos como de coste, se ha optado por construir el GOB a base de varios osciladores de más baja frecuencia:

Supongamos que tenemos ocho osciladores tales que sus frecuencias son $F, Ft, Ft^2, Ft^3, \dots, Ft^7$, donde t , es un número menor que 1. Dado un número n , cada uno de los osciladores producirá una frecuencia dividida

$$\frac{F}{Kn}, \frac{Ft}{Kn}, \frac{Ft^2}{Kn}, \dots, \frac{Ft^7}{Kn}$$

Cualquier frecuencia comprendida entre estas la podremos reproducir mediante una de ellas con un error relativo máximo de $(1-t)/2t$

La siguiente frecuencia que podremos producir será la $\frac{F}{K(n+1)}$. Si queremos que esta frecuencia esté separada de la $\frac{Ft^7}{Kn}$ por un intervalo menor o igual que los anteriores, bastará obligar a que

$$\frac{F}{K(n+1)} \geq \frac{Ft^8}{Kn}$$

de donde

$$t \leq \sqrt[8]{\frac{n}{n+1}}$$

Para que esta relación sea válida para todo n , habremos de escoger la menor relación $n/(n+1)$, o, lo que es lo mismo, el menor n posible.

Suponiendo que la frecuencia F sea 36 Megaciclos, tendremos que para obtener los 20 Kilociclos habrá que poner

$$20.000 = \frac{16.000.000}{120 n}$$

$$n = 15$$

$$\sqrt[8]{\frac{15}{16}} = 0.991965$$

y tomando este valor como valor de t , el error relativo máximo será

$$\frac{1 - 0.991965}{2 \cdot 0.991965} = \frac{0.008035}{1.98393} = 0.00405$$

y los 8 osciladores deberán tener las siguientes frecuencias:

36.000.000	c/s
35.710.740	c/s
35.423.804	c/s
35.139.174	c/s
34.856.831	c/s
34.576.756	c/s
34.298.936	c/s
34.023.340	c/s

Suponiendo que estas frecuencias se obtengan con una precisión de un 0.1%, el resultado tendrá el 0.5% máximo deseado.

Hay que observar además que, para frecuencias más pequeñas, el recubrimiento será mayor, por lo que, en general, se tendrá más precisión.

La calculadora deberá suministrar para cada nota el número n por el que hay que dividir, y un número que indique que frecuencia de base es la que hay que utilizar.

Como el número n valdrá a lo sumo

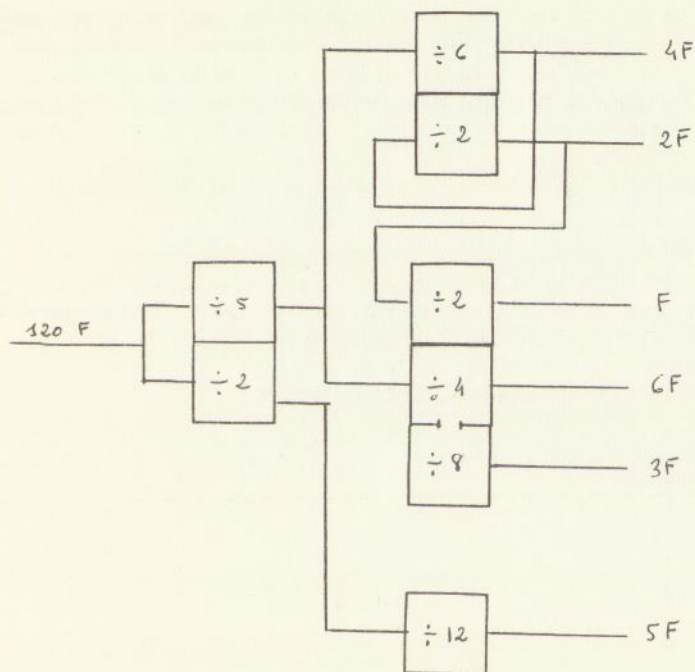
$$n \leq \frac{36.000.000}{120 \times 20} = 15.000 < 2^{16}$$

el ordenador habrá de suministrar 19 bits por cada nota (16+3 del indicador de oscilador básico).

GA - Generador de armónicos

Como ya hemos dicho, la frecuencia fundamental de cada nota deberá ir acompañada de algunos armónicos a fin de tener una suficiente variedad de timbres. Estos armónicos tendrán frecuencias múltiplos de la fundamental.

Dividiendo la frecuencia del oscilador básico por n tenemos 120 veces la frecuencia que queremos obtener. Dividiendo esta frecuencia por $K = 120$ tendremos dicha frecuencia y dividiendo por 60, 40, 30, 24 y 20 obtendremos los armónicos de frecuencias 2, 3, 4, 5 y 6 veces la fundamental. Las divisiones pueden hacerse según el siguiente esquema:



donde todos los divisores son contadores que cada vez que el número de impulsos que le llegan, alcanzan la cifra indicada, se ponen a cero y emiten un impulso que es el contabilizado por el siguiente contador.

La última división por dos lo que hace es cambiar el signo de la salida cada vez que le llega un impulso, con lo que las ondas de salida serán ondas cuadradas simétricas.

Hay que observar que si quisieramos incluir más armónicos, habría que aumentar K en proporción, con el consiguiente aumento en el número de osciladores del GOB. Por ejemplo si queremos tener el armónico $7f$, habría que multiplicar K por 7; si queremos el $8f$, por 2; si queremos el $9f$, por 3; si queremos el $11f$, por 11 ...

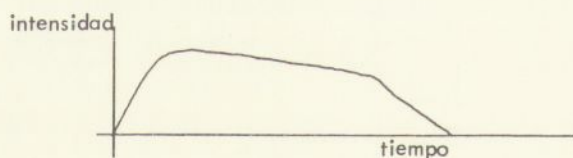
Los armónicos $10f$, $12f$, $15f$, $20f$, $30f$, y $60f$ son los únicos que se pueden obtener sin aumentar K , pero de todas maneras, incluirlos haría que aumentara la cantidad de información que debería suministrar el ordenador, como veremos a continuación, por lo que pensamos que con los cinco primeros armónicos es suficiente.

El timbre de un instrumento viene dado por las intensidades relativas de cada armónico, por lo que las 6 ondas de salida deberán pasar por 6 potenciómetros controlados por ordenador, que permitan darles independientemente dichas intensidades antes de sumarlas. Suponiendo que cada potenciómetro permitiera una variación de 16 intensidades distintas, el ordenador necesitaría proporcionar 4 bits de control para cada uno ($16 = 2^4$), o sea, un total de 24 bits para cada nota.

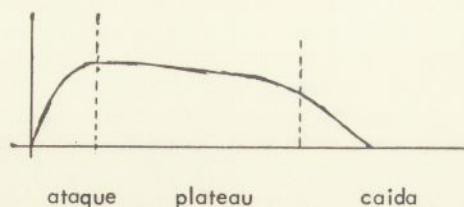
GE.- Generador de envolvente

Hemos dicho ya que otra característica de las notas emitidas por un instrumento es su envolvente, o lo que es lo mismo, la variación de su intensidad a lo largo del tiempo.

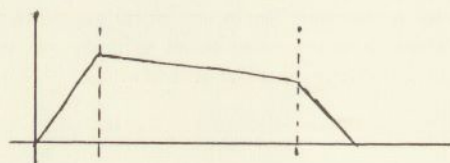
Esta variación puede ser dibujada en una gráfica en la forma



Distinguiremos tres tramos: ataque, plateau y caída:

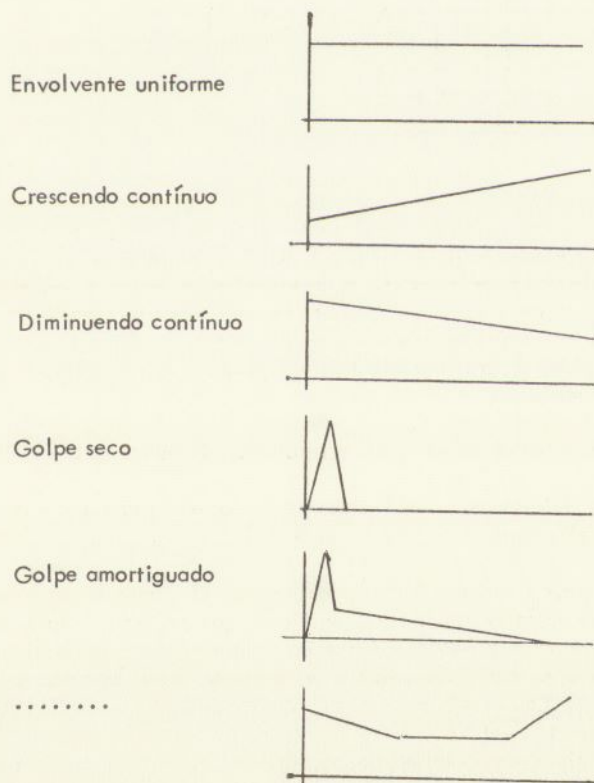


y supondremos que estos tres tramos están constituidos por líneas rectas

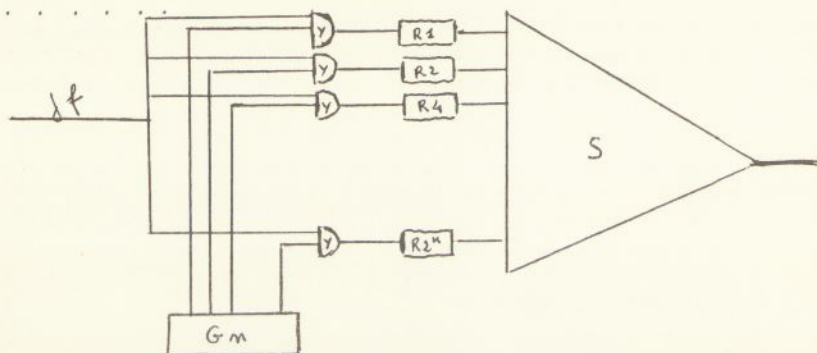


de las que son fijas para cada tipo de envolvente el valor inicial (que no tiene por qué ser nulo), el tiempo que dura el ataque y las pendientes de los tres tramos. El momento en que comienza la caída dependerá de la duración de la nota prolongándose o acortándose el plateau.

Esta aproximación, aunque parezca simple, permite una gran variedad de envolventes. Por ejemplo:



Para conseguir una envolvente de este tipo se utilizarán unos sumadores analógicos controlados digitalmente, colocados entre las distintas salidas del GA y los potenciómetros correspondientes, según el siguiente esquema:



donde la señal de frecuencia f ($J = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) se introduce en una serie de puertas "y" que están activadas o desactivadas por un generador de números binarios (G_n). Fijado un número n , las puertas que queden abiertas dejarán pasar la señal a las resistencias, quedando dividida la intensidad de la señal por $R2^i$ ($i = 1, 2, \dots$), con lo que al sumar dichas señales, la salida tendrá la misma frecuencia que a la entrada y tendrá una intensidad f proporcional al número n .

Haciendo variar n de forma controlada, obtendremos la envolvente deseada.

El valor inicial de n será proporcional a la intensidad que queremos que tenga la nota al comenzar el ataque.

Para producir mayor o menor pendiente en el ataque bastará incrementar n de unidad en unidad a mayor o menor velocidad hasta que se llegue a la intensidad final del ataque. Una vez alcanzada ésta habrá que incrementar, mantener o disminuir n a la velocidad necesaria para obtener la pendiente del plateau. En el momento en que haya de comenzar la caída habrá que cambiar de nuevo la velocidad de variación de n .

En principio podría generarse una envolvente distinta para cada amónico, pero esto supondría una gran cantidad de información, por lo que hemos adoptado la solución de que haya dos envolventes distintas por nota, correspondiendo una u otra envolvente a un determinado amónico según el valor (0 ó 1) de un número de sus cifras binarias. Esto quiere decir que aunque hacen falta seis circuitos sumadores por nota, sólo hacen falta dos generadores de números (G_n).

Supuesto que entre la intensidad mínima y la máxima de una envolvente distinguieramos 128 intensidades y que, con suficiente aproximación pudieramos distinguir la intensidad inicial y final del ataque 16 valores solamente, la cantidad de información necesaria sería:

- 4 bits para la intensidad inicial
- 4 bits para la final del ataque
- 10 bits para el tiempo en el que se incrementa n durante el ataque (contados en 100.000-avas partes de segundo)
- 1 bit para indicar si hay que incrementar o disminuir n
- 11 bits para los mismos objetivos en el plateau
- 11 bits para lo mismo en la caída
- 4 bits para indicar cuanto tiempo (contado en milésimas de segundo) antes del final, comienza la caída

Total = 45 bits para cada envolvente

Como cada instrumento tendrá dos envolventes, y además necesitamos 6 bits para indicar que armónico va a cada generador de envolvente, un instrumento necesitará, en este concepto, 96 bits.

Si en vez de generar el número n , generásemos el producto de n por la intensidad relativa del armónico correspondiente, podrían eliminarse los potenciómetros, que por su constitución podría presentar problemas con el tiempo, a costa de aumentar a seis los G_n aunque no aumentaría la cantidad de información necesaria.

IN - Instrumento normal

Si para cada nota hubiera que dar los 19 bits necesarios para producir su frecuencia fundamental, los 24 que necesita para los armónicos y los 96 de las envolventes, la capacidad de la cinta magnética de control se vería rápidamente copada, pudiéndose producir entonces un número relativamente bajo de notas simultáneas. Para salvar en lo posible esta situación, se construirá el aparato de tal forma que en un determinado instante sólo se le puede indicar para un instrumento la nota que debe dar (19 bits) y su intensidad absoluta (6 bits que controlarán un nuevo potenciómetro con 64 intensidades de salida posibles) o los 24 + 96 bits de los armónicos y las envolventes. Dado que esta última cifra es mayor que la primera, y a fin de aprovechar al máximo la capacidad de la cinta magnética, llamaremos instrumento normal al conjunto de 4 GA que pueden producir 4 notas simultáneas de distinta intensidad, pero con el mismo timbre y el mismo tipo de envolvente.

El número de bits que necesitamos tener en la cinta para cada IN será 121 (los 120 que se necesitan como máximo para cada tipo de información más 1 bit para indicar de que tipo de información se trata).

La cinta magnética de control

Supondremos que la cinta magnética de control ha sido grabada por un moderno

ordenador y que, por tanto está grabada sobre ocho pistas con una densidad de 800 caracteres por pulgada, es decir 6400 bits por pulgada.

La cinta estará grabada en una serie de registros, separados por espacios en blanco (inter-record gaps), que son de unos tres cuartos de pulgada. Si queremos que la nota más corta dure una centésima de segundo, la cinta magnética habrá de poder ser leída de tal forma que el tiempo de arranque, lectura y parada al comienzo del siguiente registro, sea de al menos una centésima de segundo. Si tenemos 10 instrumentos de 4 notas, necesitaremos registros de 1210 bits, los cuales, añadiendo los interrecord gaps son perfectamente leibles a la velocidad deseada por una unidad de cinta de tipo standard de los que utilizan los ordenadores, pudiendo estar controlada la velocidad de lectura por un "reloj" cuyo valor proporcionará la propia cinta. Si suponemos que la velocidad de lectura varía entre una y dos centésimas de segundo por registro, la información suplementaria podría ser de 5 bits lo que nos daría 32 velocidades distintas para la nota más rápida (la semifusa). Velocidades más lentas podrían simularse a base de convertir las semifusas en fusas, etc. ...

El reloj sería simplemente un divisor que dividiría una de las frecuencias del GOB primero por un número fijo, dándonos un impulso cada tres mil docientos-avos de segundo, y luego por el número que suministrara la cinta.

Si queremos dar una nota que debe durar un número determinado de semifusas, habrá que dar la información completa para cada una de las semifusas que la constituyen más un bit (0 ó 1) para indicar cuando comienza el ataque de la envolvente, y otro bit para indicar en que semifusa comienza la caída. Esto supone 8 bits por instrumento, pero como nos sobran 20 bits cuando no se daba la información sobre la forma de la envolvente y de los armónicos, esto no modifica el total de información a suministrar en cada registro.

Ruidos coloreados y otros controles

Si al generar la nota, en vez de dividir la onda básica por un número fijo, dividiéramos por un número aleatorio que tuviera dicho número como media y una desviación típica deseada, el sonido que se produciría sería el de un ruido coloreado que se acercaría más o menos a la nota calculada según que la desviación típica fuera más o menos pequeña.

Algunos instrumentos de este tipo, podrían incluirse en el aparato. También podrían incluirse algunos generadores de señales (por ejemplo, luminosos) que permitieran coordinar el aparato con los componentes de una orquesta de tipo clásico, indicándoles en qué momentos deben intervenir y, posiblemente, el ritmo que deben llevar.