

# 1 Síntesis FM

## 1.1 Introducción

Los orígenes de la síntesis mediante el método FM se remontan a 1973 con el paper del padre de dicho método, John Chowning, titulado “The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation”.

En una entrevista con la Audio Engineering Society (ver referencias), John Chowning cuenta que el descubrimiento del método surgió cuando estaba experimentando con dos osciladores, modulando en frecuencia de manera infrasónica para producir una suerte de vibrato en una señal. A medida que cambiaba la amplitud de dicho vibrato (vibrato depth) y la frecuencia a la cual se estaba haciendo oscilar a los osciladores al punto en que ya no podía seguir la frecuencia instantánea de la señal, pudo percatarse de que las frecuencias que aparecían como resultado caían dentro del rango audible y eran ricas en timbre.

Fue así como comenzó a analizar las relaciones entre frecuencias y amplitudes que permitió el desarrollo de la teoría presentada a continuación, que dio el origen a la síntesis FM o síntesis de modulación en frecuencia.

A modo de establecer un marco teórico a partir del cual se establecerán los conceptos y bases utilizados en el desarrollo del sintetizador, se procederá a explicar las relaciones matemáticas y los razonamientos en los que se basa dicho método.

### 1.1.1 Características del sonido

Un tono musical puede ser visto como una señal del tiempo que cae dentro de la banda audible, con frecuencias de 20Hz a 20kHz. Por lo general, cuando se habla de tonos musicales se considera una señal periódica en el tiempo, por lo que las frecuencias en el espectro de la misma serán discretas y múltiplos de una frecuencia fundamental  $f_0$ .

Como un sonido musical en realidad no es una señal periódica a lo largo del tiempo, el espectro del mismo tendrá variaciones en función del tiempo y contendrá inharmonías, o frecuencias NO múltiplos de  $f_0$ . Cuanto menos ideal sea el tono musical escuchado, más contenido inharmónico tendrá. Pero es importante destacar que el no idealismo no implica una peor calidad de sonido, sino todo lo contrario: Son aquellas no idealidades las que le dan el grado subjetivo a la música y caracterizarán a una nota como agradable o desagradable al oído.

Una nota musical no es lo mismo que un tono musical. Una nota musical hablará de la frecuencia fundamental de aquel sonido ideal mencionado anteriormente (el tono), una cierta duración, y estará descripta por una cierta notación musical.

Un tono musical puede ser entonces descripto por 4 características primordiales, a saber:

1. Tono: frecuencia fundamental del tono, es decir, aquella frecuencia cuya componente prevalece por sobre las demás, suele ser la primera a partir

del cero, aunque no necesariamente.

2. Duración: Intervalo de tiempo en el que la señal no es nula.
3. Intensidad: Amplitud de la señal que describe al sonido en cierto instante de tiempo.
4. Timbre: Lo que le da “color” al sonido. Permite identificar a una nota musical siendo tocada por un instrumento y por otro. Consiste principalmente en tres cosas:

La evolución de las componentes en frecuencia a lo largo del tiempo.

Las frecuencias características de la señal.

La envolvente dinámica, o la variación del sonido en el tiempo.

Es en el timbre en el que nos centraremos en este informe y es por la habilidad de conseguir un timbre característico y no demasiado irreal con fórmulas matemáticas simples y bien establecidas lo que le dio su reconocimiento al método de síntesis FM.

### 1.1.2 Análisis matemático

La fórmula general para una señal modulada en frecuencia, otorgada por consigna, es:

$$x(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \phi_c + I(t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t + \phi_m))$$

Para simplificar cuentas y cálculos que tenga que realizar la computadora a la hora de sintetizar, elegimos  $\phi_m = \phi_c = -\frac{\pi}{2}$ , por lo que la expresión anterior queda reducida a:

$$x(t) = A(t) \cdot \sin(2\pi \cdot f_c \cdot t + I(t) \cdot \sin(2\pi \cdot f_m \cdot t))$$

$f_c$  será entonces la frecuencia portadora y  $f_m$  la frecuencia moduladora.  $A(t)$  e  $I(t)$  definirán entonces las envolventes de las señales portadora y moduladora respectivamente.

Usando la expansión en funciones trigonométricas de  $x(t)$ , la misma puede ser reescrita como:

$$x(t) \approx J_0 \cdot A \cdot \sin(\alpha \cdot t) + A \cdot \sum_{k=1}^n J_k(I) \cdot [\sin((\alpha + k\beta) \cdot t) + (-1)^k \sin((\alpha - k\beta) \cdot t)]$$

Donde  $J_k(I)$  son las funciones de Bessel de primera especie.

Los  $J_k(I)$  tendrán entonces la forma:

$$J_k(I) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \cdot \gamma(m+k+1)} \cdot \left(\frac{I}{2}\right)^{2m+k}$$

Donde  $\gamma(z)$  es la función gamma.

y los  $J_k(I)$  responden a la ecuación diferencial  $x^2 \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + x \cdot \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha^2) \cdot y = 0$ .

De esta manera, es posible determinar el comportamiento de los  $J_k(I)$  numéricamente.

De la expansión trigonométrica de  $x(t)$  podemos, para un  $A$  y un  $I$  fijos, estudiar las componentes en frecuencia de la señal en parte estudiando el comportamiento de las funciones de Bessel de primera especie:

Primero, es importante hacer notar que el valor de  $I$  necesario para que un determinado valor de  $k$  produzca una amplitud lo suficientemente grande en las senoidales representativas para que la frecuencia que representan sea tenida en cuenta es creciente a medida que el valor de  $k$  aumenta. Esto es fácilmente observable de los primeros gráficos de  $J_k(I)$ :

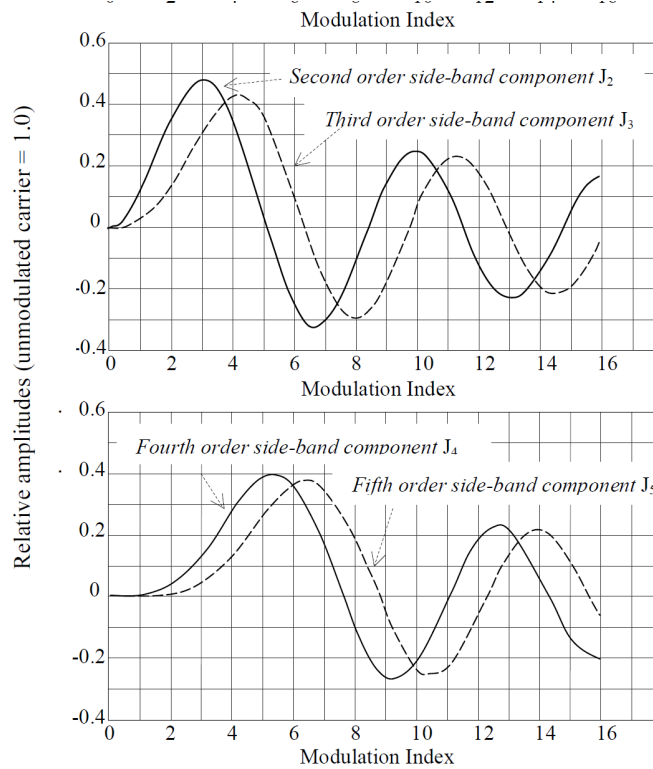


Figure 1: Gráfico de algunas funciones de Bessel de primera especie

A partir de lo anterior se deduce que a medida que se aumenta el índice de modulación  $I$ , más frecuencias entrarán en juego, cada frecuencia nueva que aparece lo hace de a pares y lateralmente a las frecuencias que ya existían previamente con un valor de  $I$  menor. Esto implicará que el ancho de banda de la señal en frecuencia aumentará a medida que  $I$  crece.

Este ancho de banda será aproximadamente igual a:

$$BW \approx 4\pi \cdot f_m(I + 1)$$

De aquí hacemos notar que, dado que el espectro estará centrado en la

frecuencia portadora  $f_c$  (único factor sobreviviente cuando  $I=0$ ), cuando  $f_c < 2 \cdot f_m \cdot (I + 1)$ , las frecuencias negativas entrarán en juego, reflejándose sobre las positivas y así se superpondrán componentes entre sí, alterando el espectro. En realidad, puede ser que se superpongan componentes como que no, y esto dependerá de la relación entre la frecuencia moduladora y la portadora. De esta manera, podrán también aparecer componentes inharmónicas al aumentar el  $I$ .

Nos preguntamos entonces cuándo aparecerán componentes inharmónicas y cuándo no, además de preguntarnos como determinar entonces la frecuencia fundamental de la señal en el tiempo y se pueden apreciar suficientes componentes armónicas como para poder simular sonidos naturales.

La respuesta a estas preguntas resulta simple y la da el paper de Chowning, aunque se deduce fácilmente de la expansión trigonométrica de  $x(t)$ :

Si  $f_c = N1 \cdot f_o$  y  $f_m = N2 \cdot f_o$ , entonces la frecuencia fundamental para el tono musical será  $f_o$  y esta recién comenzará a prevalecer a partir de valores mayores a uno para el índice de modulación.

Sim en cambio, no hay una relación racional entre las frecuencias moduladora y portadora, entonces comenzarán a surgir frecuencias inharmónicas en el espectro, pudiéndose así lograr efectos subjetivamente placenteros al oído, como a su vez “arruinar” el sonido que se tenía originalmente. Como principalmente los instrumentos de percusión tienen componentes inharmónicas en su espectro, eligiéndose relaciones no racionales se podrá sintetizar sonidos percusivos, y eligiéndose relaciones racionales se podrá sintetizar sonidos de instrumentos para los cuales las componentes en frecuencia principales son armónicas de la fundamental.

## 1.2 Síntesis de un clarinete

Se obtuvieron muestras de distintas notas musicales de un clarinete de la página de Philharmonia Orchestra

<https://www.philharmonia.co.uk/explore/soundsamples>.

Se procedió luego a intentar encontrar las funciones  $A(t)$  e  $I(t)$  para que la función del tiempo sintetizada se parezca lo más posible a las muestras en el tiempo de los clarinetes grabados.

Se muestra el gráfico en el tiempo de , nota que fue sampleada con una frecuencia de sampleo de 44100 Hz, estándar para CDs.

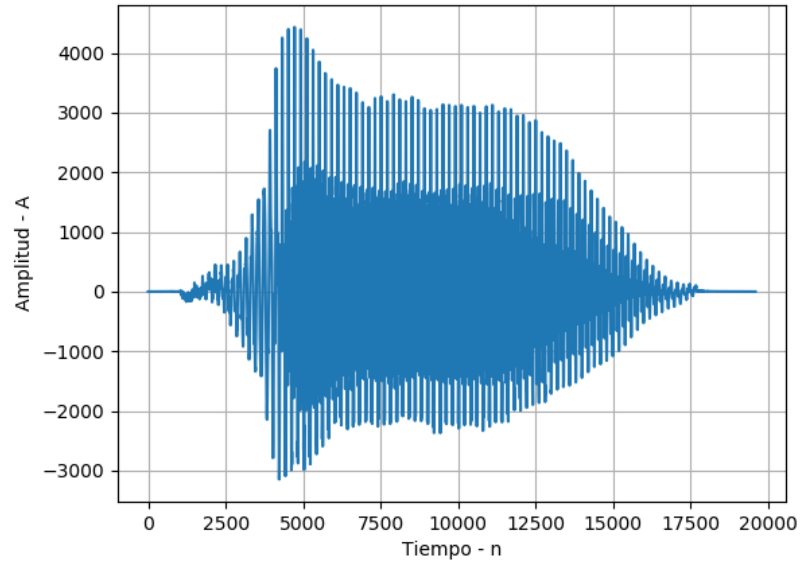


Figure 2: Nota de un clarinete, donde cada  $n$  corresponde a un tiempo  $t = \frac{n}{f_s}$  segundos

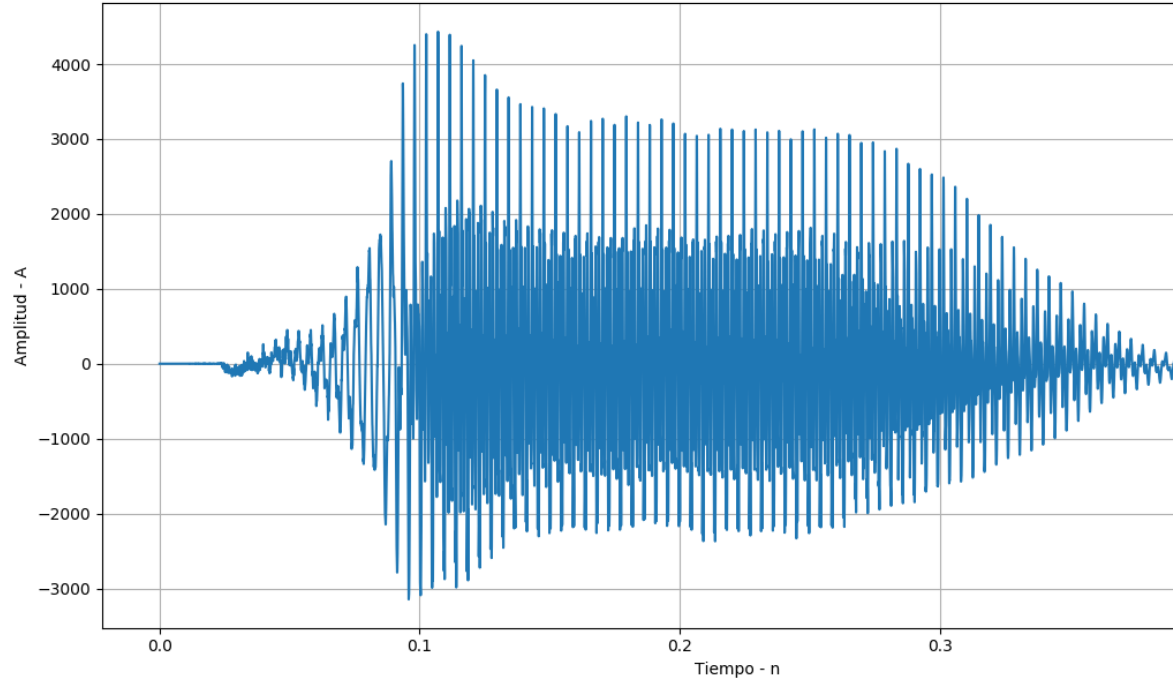


Figure 3: Nota de un clarinete en función del tiempo

Observamos de aquí principalmente 3 frecuencias que definen a este gráfico. Las hallaremos experimentalmente y veremos cómo el método de síntesis FM encastra correctamente con estas ocurrencias empíricas.

De este gráfico observamos que hay cuatro etapas fácilmente distinguibles para la nota, que denominaremos la etapa de Attack, Decay, Sustain y Release siguiendo la notación que nos impone el método de síntesis aditiva explicado en otros puntos.

Dado que el tiempo de sustain (llamamos tiempo de sustain al tiempo en que la nota se mantiene en el nivel de sustain fijado por el parámetro ADSR) es el tiempo preponderante en la nota y es el tiempo en que la nota se encuentra establecida, pudiéndose así considerarla en este intervalo como una función periódica del tiempo con frecuencia fundamental  $f_0$ , usaremos a este intervalo como el intervalo representativo en tiempo de la función. Es en él en donde procederemos a hallar las frecuencias de importancia.

En un intervalo de menor longitud de la nota, procedemos entonces a hallar la frecuencia fundamental y la frecuencia cuya amplitud del orden de la de la fundamental:

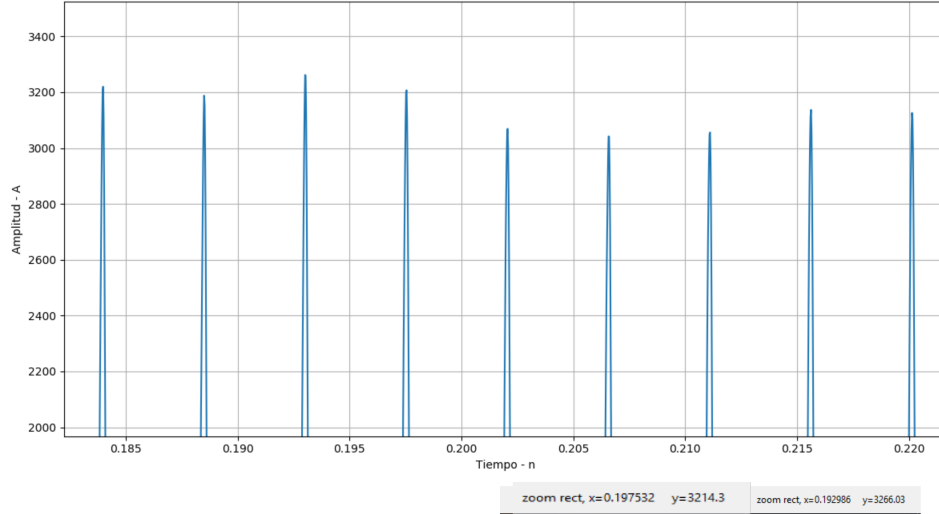


Figure 4: Obtención gráfica de las frecuencias de importancia de la nota

Dado  $t_0=0.197532s$  y  $t_1 = 0.192986s$  tiempos en los que se encuentra una repetición en amplitud, obtenemos el período fundamental como  $\Delta t=t_1 - t_0$  y su consecuente frecuencia fundamental  $f_0 = \frac{1}{\Delta t} = 219.9Hz$ , lo cual coincide con el marco teórico de las notas musicales, bajo el cual la frecuencia de un  $A_3$  resulta ser  $f_{A_3}=220Hz \approx f_0$ .

Luego, observamos la segunda frecuencia preponderante en la nota, lo cual nos arroja una frecuencia  $f'_0 = 882Hz$ .

Siguiendo la teoría de del paper de Chowning explicada en la introducción, observamos que eligiendo  $f_c=f_{A_3}$  y  $f_m = 4 \cdot f_{A_3}$ , obtendremos una frecuencia fundamental para nota de  $f_0 = f_{A_3}$  y la segunda frecuencia preponderante  $f_m = 882Hz \approx f'_0$ . De aquí quedan entonces determinadas las constantes de consigna  $n = 1$  y  $m = 4$ .

Además, observaremos entonces una desaparición de los armónicos pares (debido a  $N2 = 4$ ), característico de los clarinetes, como veremos en mayor detalle en la sección de análisis de frecuencia.

Observamos luego una nota de igual duración pero distinta frecuencia, en particular un D4 de 0.25 segundos, fuerte, normal:

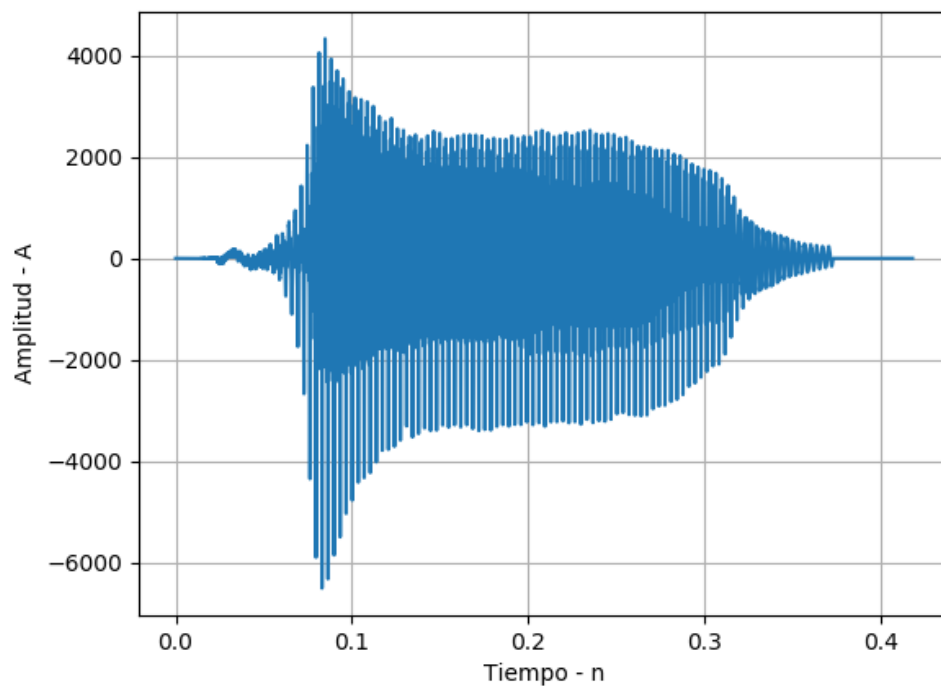


Figure 5: Nota de distinta frecuencia fundamental pero igual duraci3n

Observamos tambi3n una nota de distinta duraci3n pero igual frecuencia, en particular un A3 de 0.5 segundos, fuerte, normal.:

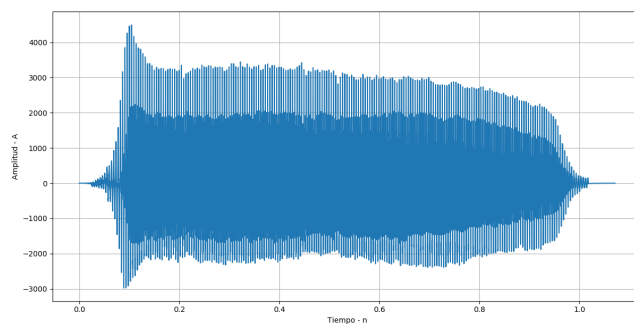


Figure 6: Nota de igual frecuencia fundamental pero distinta duraci3n

Finalmente, observamos una nota de distinta duraci3n y distinta frecuencia, en particular un E5 de 0.5 segundos, fuerte, normal:



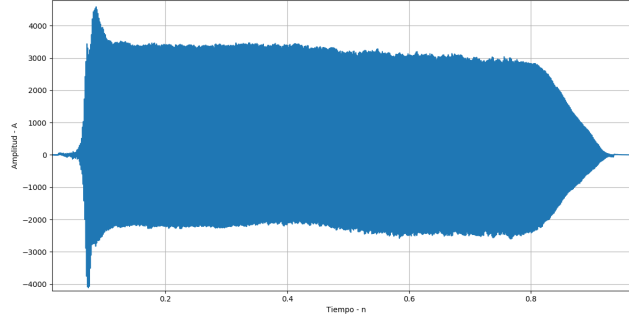


Figure 7: Nota de distinta frecuencia fundamental y distinta duración

De aquí extrapolamos que independientemente de las frecuencias fundamentales de las notas y de su respectiva duración, los tiempos de ataque, decay y release no sólo durarán aproximadamente lo mismo sino que estarán regidas por la misma forma matemática. Esto nos permite hacer un análisis aproximado de cómo deberá simularse la envolvente de cada nota en sus distintos estadios por separado, y luego unir aquellas etapas para llegar al resultado final.

El tiempo de sustain, por otro lado, se expandirá o comprimirá según la duración de la nota pero tendrá la misma forma de envolvente, que se aproxima como constante.

Los próximos gráficos que se utilizarán para los análisis de las distintas etapas serán para la nota anteriormente mostrada,  $A_3$ , elegida arbitrariamente.

### 1.2.1 Determinación de las envolventes

Dado el gráfico de la nota en función del tiempo, se pueden identificar dos zonas de densidades muy diferentes (distintas frecuencias). La zona de mayor densidad (o mayor frecuencia) se corresponderán gráficamente con la frecuencia modulante  $f_m$ , que es 4 veces superior a la  $f_c$ , que a su vez estará asociada a las zonas de menor densidad.

Es de aquí que surge la idea de que la envolvente  $I(t)$  fijará la amplitud de la zona de baja densidad, ya que está fijando la envolvente del coseno de frecuencia central  $f_c$ , mientras que la envolvente  $I(t)$ , en cambio, alterará la envolvente de la zona de alta densidad, la de frecuencia  $f_m$ .

### 1.2.2 Análisis del Attack

Se analiza la envolvente del attack de la nota de manera general:

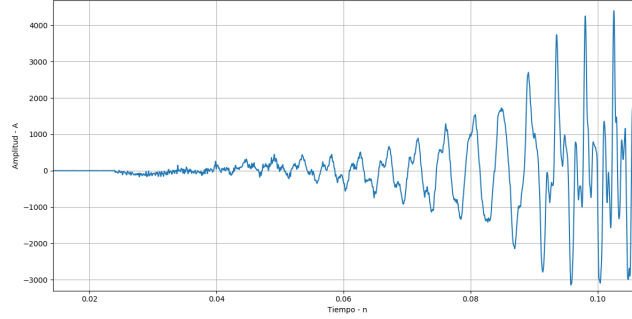


Figure 8: Attack de un clarinete

Se observa para la envolvente un crecimiento exponencial de la forma  $A_1(t) = e^{\frac{t}{\tau_1}} - 1$  donde  $\tau_1$  es constante.

Dado que la amplitud máxima de la nota estará fijada por el último tiempo  $t$  del attack y que genéricamente  $A(t) \in [-A_{máx}; A_{máx}]$ , donde  $A_{máx}$  está fijado por la cantidad de bits utilizados para representar la amplitud en el .wav (en nuestro caso 16 bits), se asociará a  $A_{máx}$  con la amplitud máxima de la nota real y luego se realizará el apropiado escalamiento para adaptarlo al sistema digital.

Procedemos calcular entonces el valor de  $\tau_1$  empíricamente, aproximando a la duración del tiempo attack  $\Delta t_{att}$  como 4000 samples a 44100Hz de sampleo, es decir,  $\Delta t_{att} = 0.091$  segundos.

De este tiempo, despejamos  $\tau_1 = \frac{\Delta t_{att}}{\ln(1 + A_{máx})}$ , lo que arroja un resultado en tiempo de  $\tau_1 = 0.0108s$ , al haber aproximado  $A_{máx} = 4200$  para el .wav

Se muestra el gráfico de la exponencial aproximadora superpuesta con el attack real.

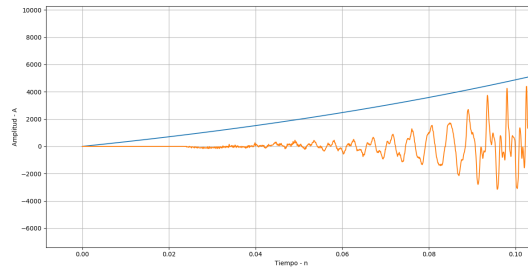


Figure 9: Attack y envolvente aproximada superpuestos.  $A(t)$  en azul.

Luego, para la zona de mayor densidad o frecuencia, la envolvente  $I(t)$  estará fijada por un crecimiento exponencial durante el attack de la forma  $I(t) = I_0 \cdot (e^{\frac{t}{\tau_1}} - 1)$ . Dicha fórmula es extraída de la forma exponencial de los gráficos del paper de Chowning.

Se determinó  $I_0$  experimentalmente mediante prueba y error, obteniéndose resultados más realistas para aquellos valores en los que  $I_0 < 0$ .

### 1.2.3 Análisis del Decay

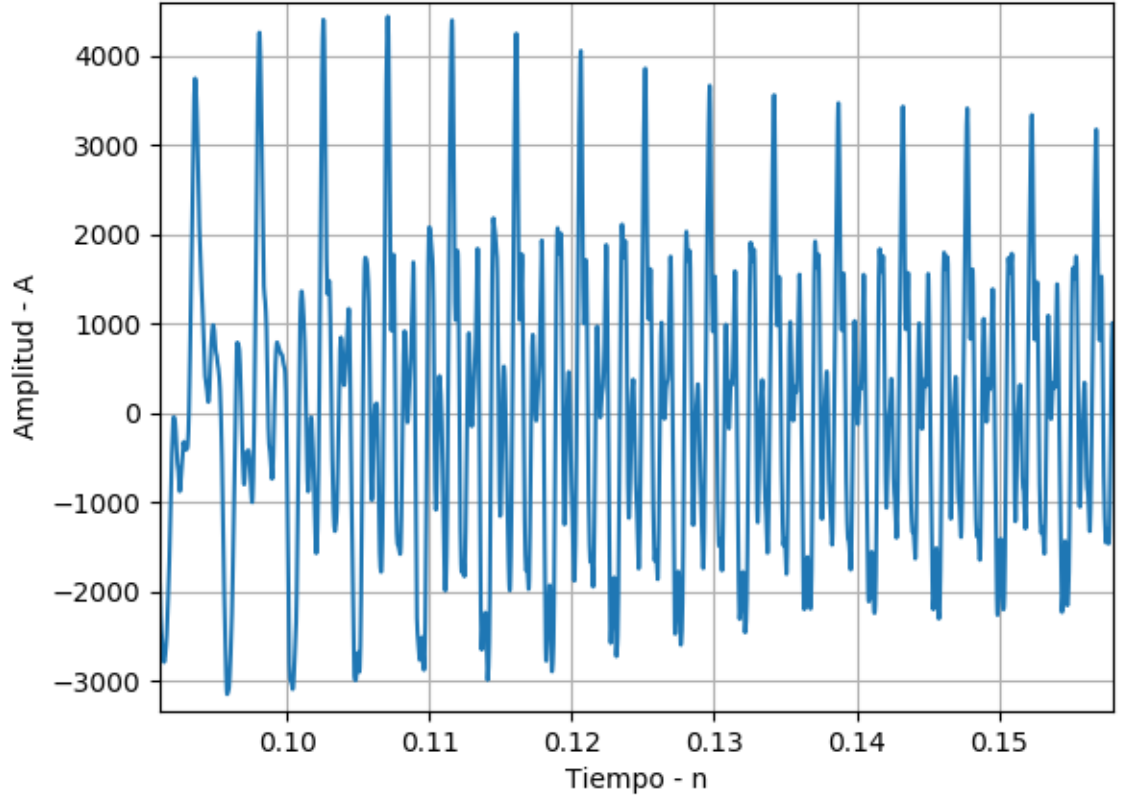


Figure 10: Decay de un clarinete

Se observa para la envolvente un decaimiento exponencial de la forma  $A_2(t) = A_{m\acute{a}x} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}$  donde tanto  $A_{m\acute{a}x}$  coincide con el valor fijado por el attack.

Determinamos  $\Delta t_{dec} = 0.074$  segundos, donde  $\Delta t_{dec}$  es la duración de la etapa de decay. Teniendo en cuenta que la etapa de decay decae exponencialmente hacia la constante de sustain, se despeja  $\tau_2 = -\frac{\Delta t_{dec}}{\ln(\frac{A_{sus}}{A_{m\acute{a}x}})}$  como la constante de tiempo de la etapa de decay. En la última expresión,  $A_{sus}$  resulta ser la amplitud de la etapa de sustain, que se aproxima a  $A_{sus} = 3000$ .

#### 1.2.4 Análisis del Sustain

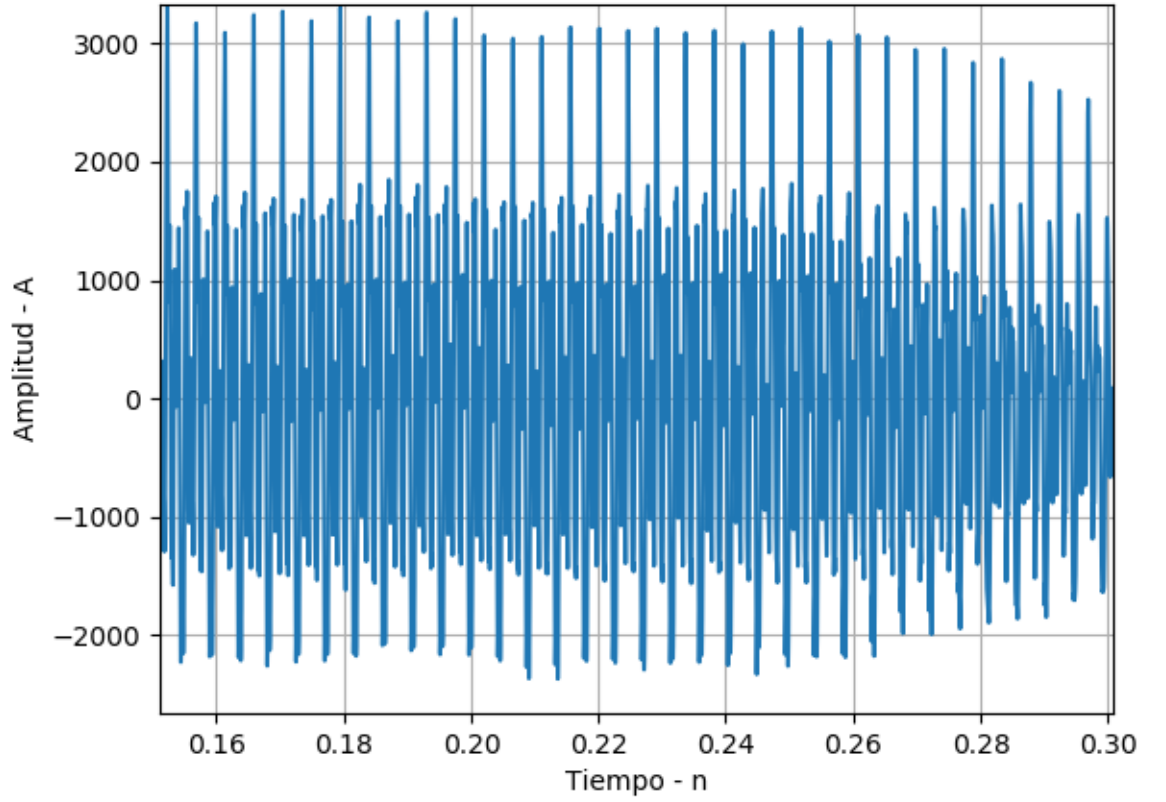


Figure 11: Sustain de un clarinete

Se observa una envolvente constante, de la forma  $A_3(t) = 0.71 \cdot A_{m\acute{a}x} = A_{sus}$

El tiempo en que la nota se mantiene en el nivel de sustain estar\'a dado por  $\Delta t_{sus} = \Delta t_{nota} - \Delta t_{rel} - \Delta t_{dec} - \Delta t_{att}$ , donde  $\Delta t_{nota}$  la duraci\'on total de la nota,  $\Delta t_{rel}$  la duraci\'on del release,  $\Delta t_{dec}$  la duraci\'on del decay, y  $\Delta t_{att}$  la duraci\'on del Attack.

Los valores de  $I(t)$  resultan ser constantes para la etapa de sustain.

### 1.2.5 Análisis del Release

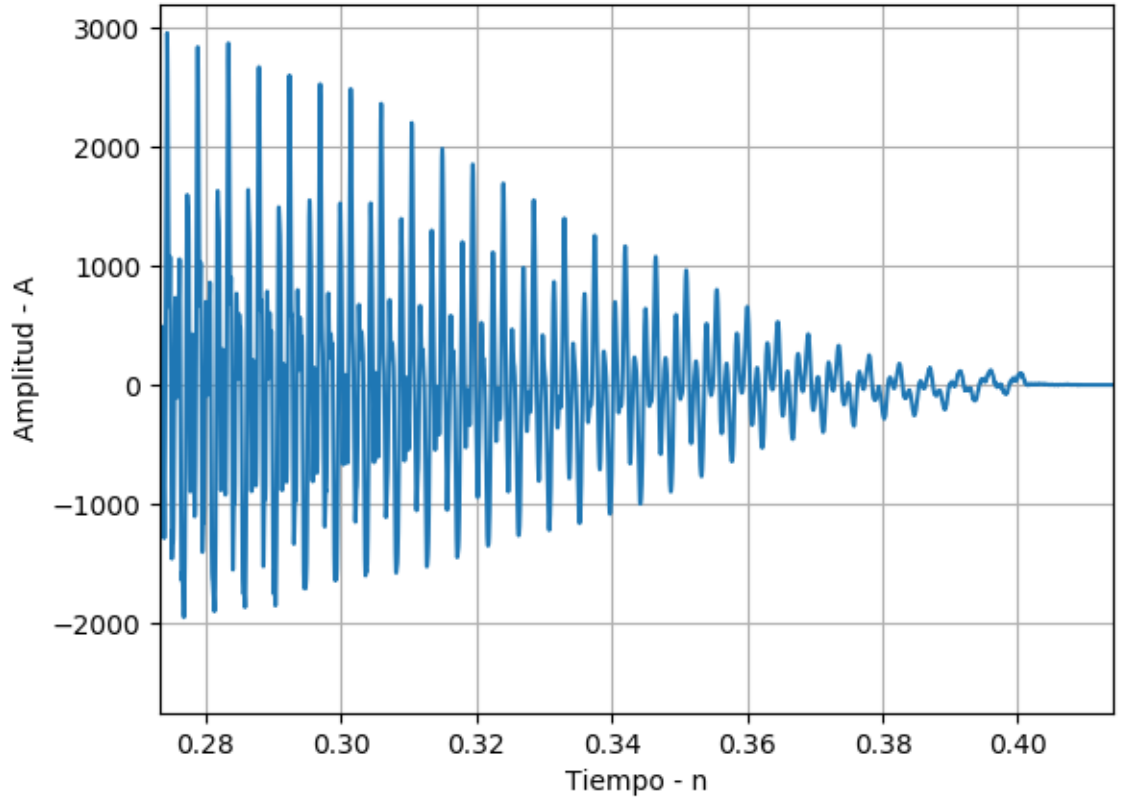


Figure 12: Release de un clarinete

Al igual que con la etapa de decay, se observa un decaimiento exponencial de la forma  $A_4(t) = A_{sus} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_4}}$ , donde, fijando al a la amplitud final de la nota como  $A_f = \frac{A_{sus}}{32}$ , la constante de tiempo queda determinada como  $\tau_4 = -\frac{\Delta t_{rel}}{\ln(\frac{1}{32})}$

Volviendo a citar el paper de Chowning, se eligió valores de  $I(t)$  constantes e iguales a los del sustain durante el release.

### 1.2.6 Resultados intermedios

Con los razonamientos utilizados hasta aquí, se llega al siguiente gráfico en función del tiempo para la señal sintetizada.

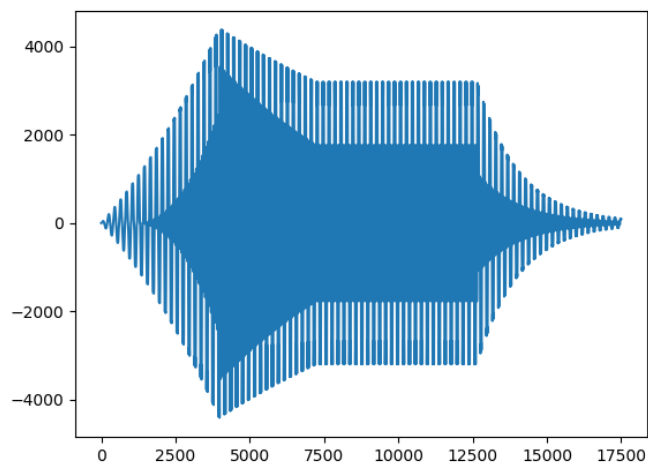


Figure 13: Nota sintetizada con el método, versión no final

Se muestra también el gráfico de la nota original para contrastar.

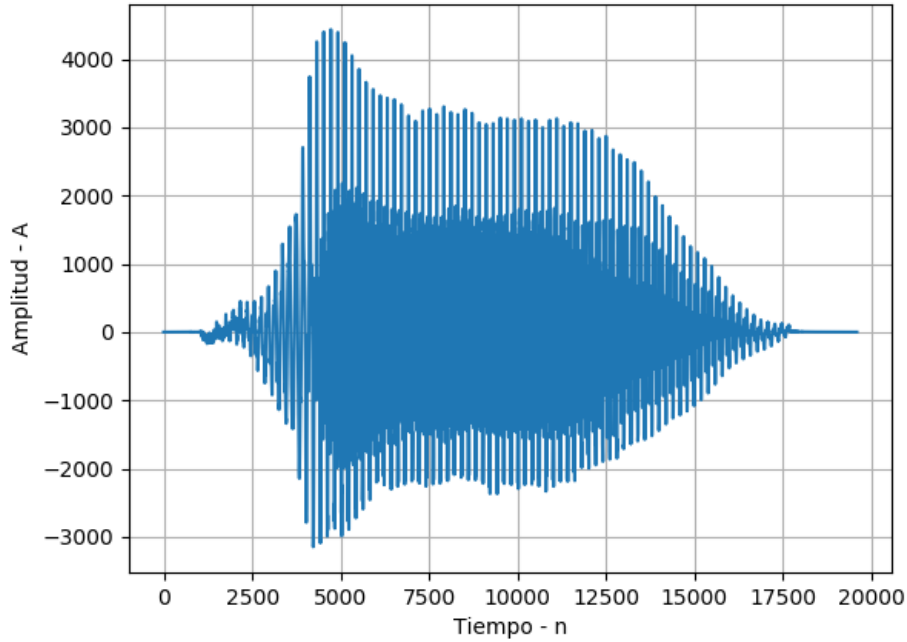


Figure 14: Nota original

Se logran apreciar las diferentes amplitudes para las zonas densas y no densas, que resultan ser del orden de las originales o dentro del mismo rango.

Las envolventes, si bien aproximada por fórmulas matemáticas básicas, parecen seguir a la señal original correctamente.

Se analizan cortos intervalos de tiempo en la etapa de sustain para la señal original y la

### 1.2.7 Agregado de frecuencias inharmónicas para efectos más realistas

En el gráfico de la señal, podemos observar la existencia de zonas de densidad intermedia de mediana amplitud. Con el objetivo de hacer aparecer estas nuevas frecuencias, sumamos a la frecuencia modulante una frecuencia baja de  $0.3Hz$  de manera tal que  $f_m = 4 \cdot f_c + 0.3Hz$ . El paper de Chowning sugiere una frecuencia de  $0.5Hz$  pero observamos que los  $0.3Hz$  coincidían de mejor forma con la señal sintetizada por las envolventes definidas.

A continuación se muestran las dos señales sintetizadas y se comparan las densidades agregadas con la original para poder corroborarlo.

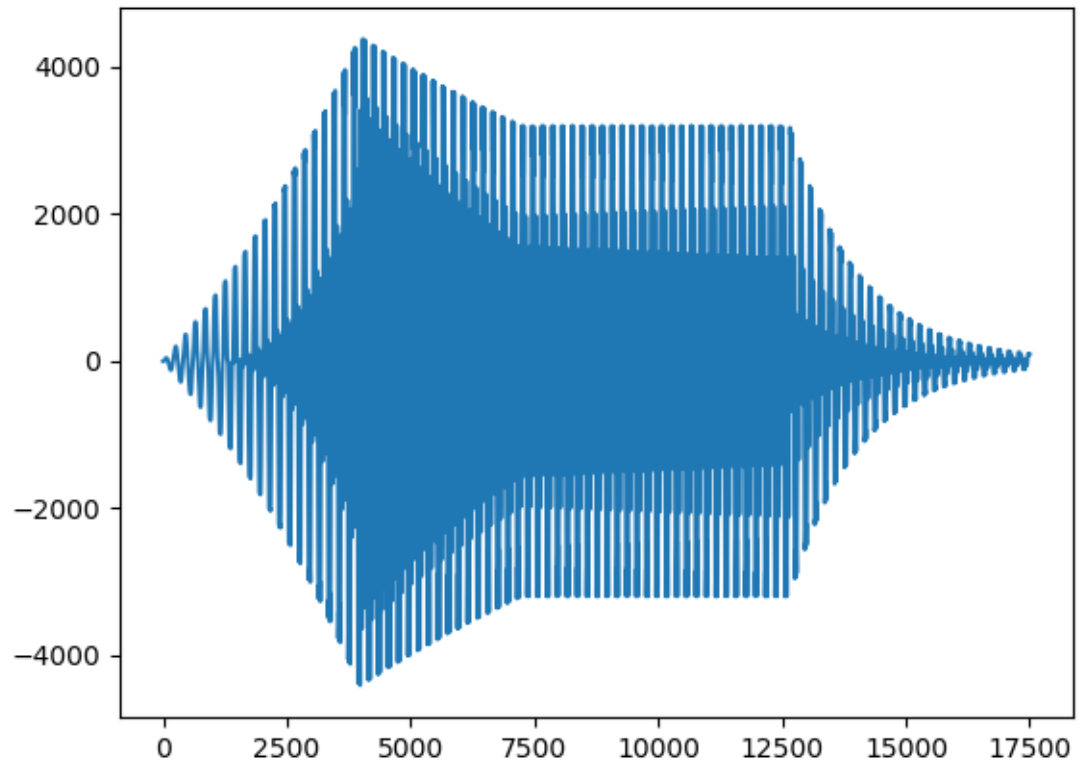


Figure 15: Frecuencia agregada de 0.3Hz



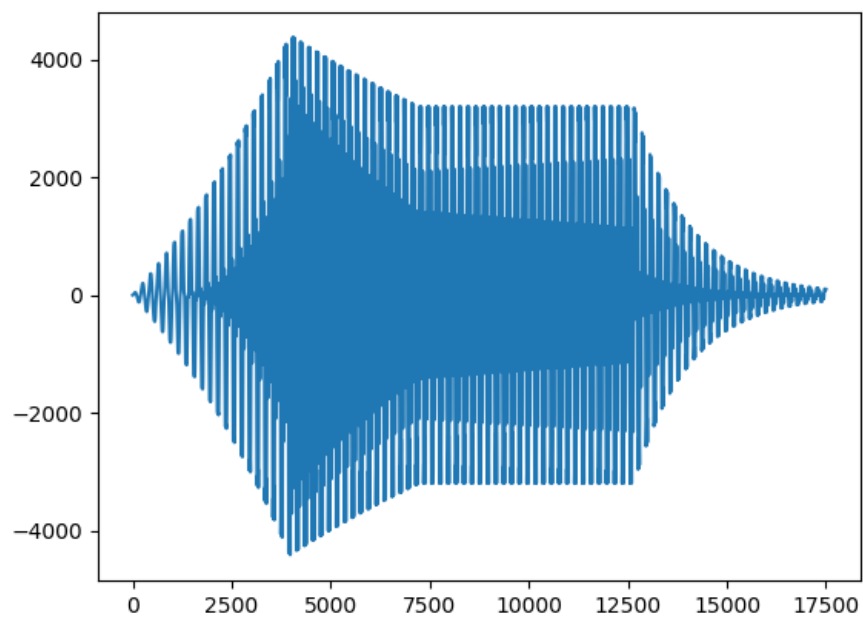


Figure 16: Frecuencia agregada de 0.5Hz

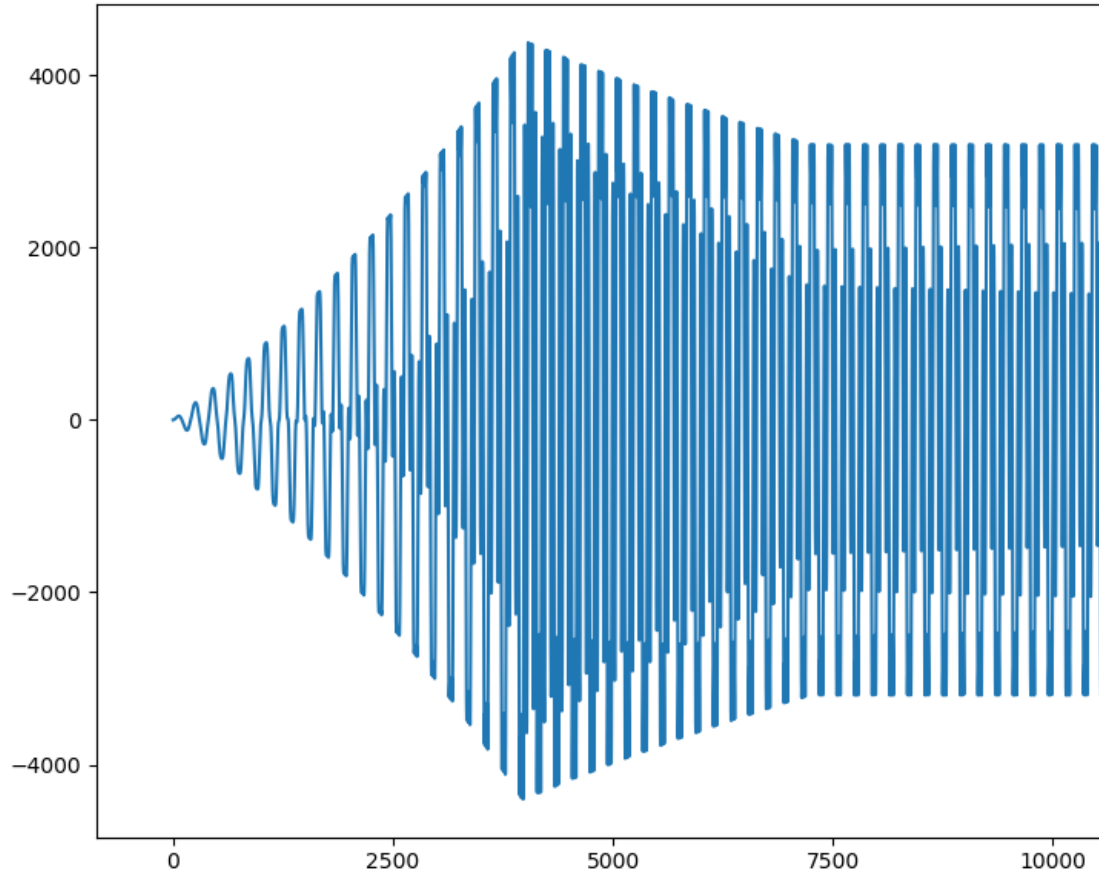


Figure 17: Nota sintetizada, versión final

### 1.2.8 Resultados finales

Para elegir los parámetros sintetizadores, se probó con notas sueltas y de distinta duración hasta llegar al resultado final. La constante  $I_{sus}$  de sustain resultó valer  $-\frac{4}{3} \cdot A_{sus}$ , teniendo entonces un valor negativo.

Una vez elegidos los parámetros de envolvente y frecuencia mencionados en las subsecciones anteriores, se sintetizó el duo para clarinete y fagot de Bethoven con resultados exitosos.

Se notó que la velocidad de síntesis de este método con respecto a otros,

como el de síntesis a partir de muestras, es demás superior, en detrimento de una peor calidad de sonido.

### 1.2.9 Análisis en frecuencia

Se procede a realizar un espectograma de la nota sintetizada y se la compara con la nota original que se intentó imitar.

Los gráficos mostrados permiten visualizar frecuencias no mayores a los 2.5kHz porque el espectograma de ambas notas muestra que no hay componentes significativas en un rango superior.

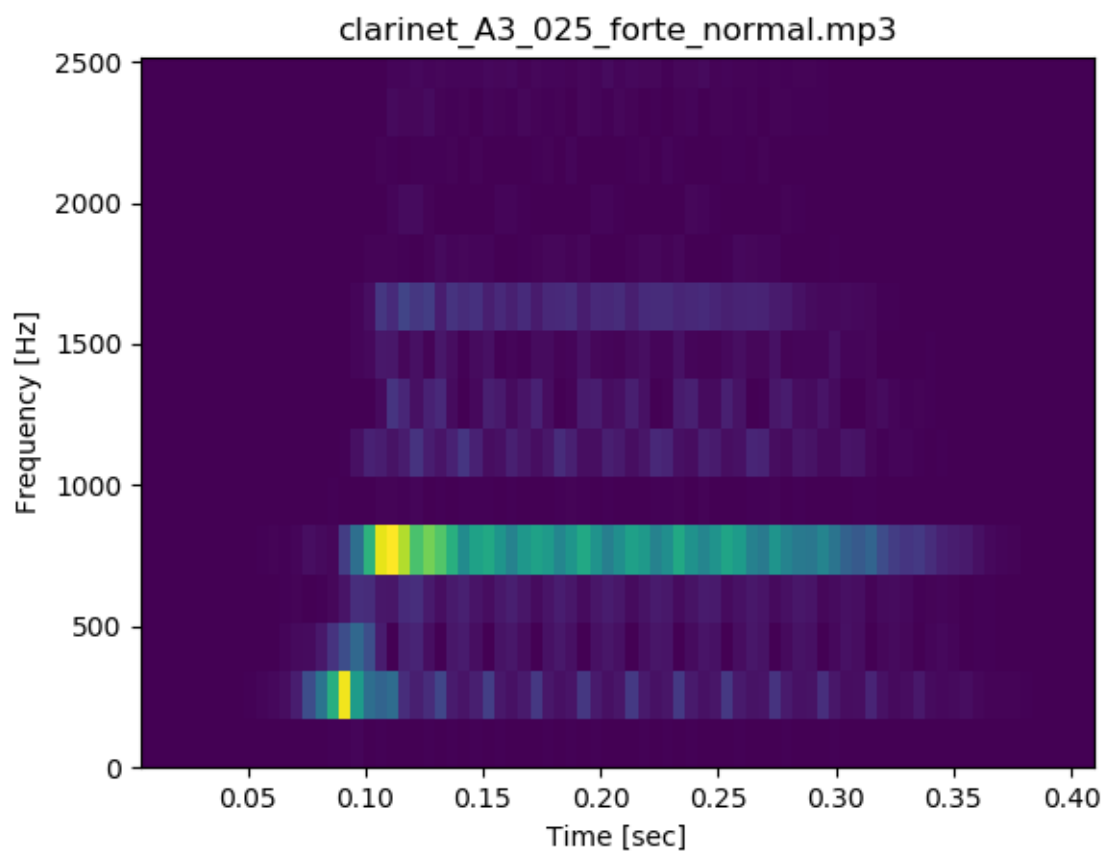


Figure 18: Nota original

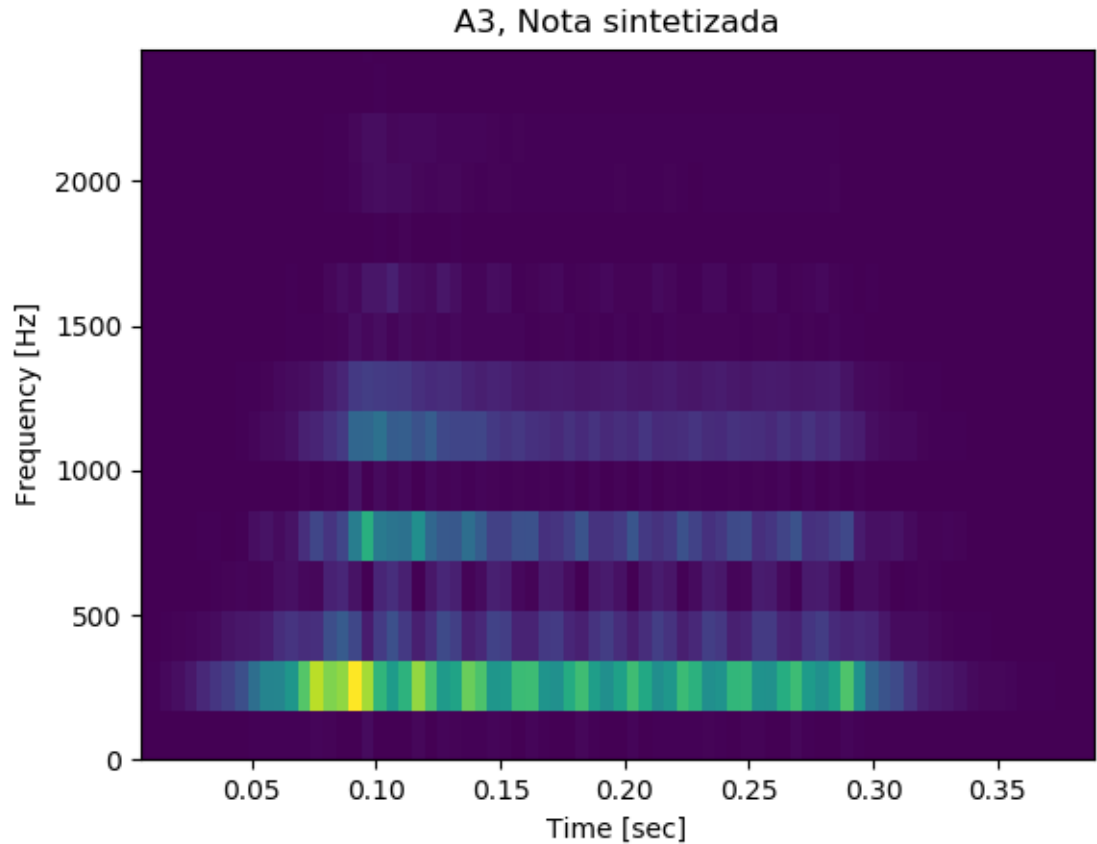


Figure 19: Nota sintetizada

Se observa que las líneas espectrales en las que hay amplitud coinciden correctamente, incluso en aquellas en las que las frecuencias tienen amplitudes cercanas a las nulas como en la franja de

Sin embargo, se observa que si bien la nota que se muestreó afirma ser un A3, la frecuencia más importante/significativa del gráfico resulta ser la de 880 Hz, la que se eligió como frecuencia modulante a la hora de sintetizar.

Como se tuvo la intención de hacerlo, la nota sintetizada muestra su franja más significativa de frecuencias centrada en los 220Hz. Un análisis más intenso en frecuencia y en teoría musical podría explicar por qué la muestra evoluciona hacia unos 880 Hz a medida que avanza en el tiempo, pero en este artículo nos limitamos a observar que las franjas de frecuencias coinciden y resultan satisfactoriamente similares.

### 1.2.10 Conclusión

Si bien el método de síntesis FM no resulta completo en el sentido de que la nota sintetizada a partir de él resulta ser imperfecta, sí se logran buenos resultados a partir de la misma y al combinarse con otras técnicas (como la de ADSR) de síntesis permite obtener resultados simples matemáticamente y ágiles en cuanto a cálculo, con un mayor color de tono al que se obtiene de otros métodos de síntesis más antiguos.

Por todo lo expuesto en el párrafo anterior, es fácil comprender el éxito de este método de síntesis en la música y los videojuegos de los años 80.

## 1.3 Síntesis de una campana

Según el paper de Chowning, las campanas tendrán envolvente exponencial decreciente y también lo tendrá el índice de modulación.

Esto se confirma al observar el sonido de un triángulo (sonido de percusión parecido al de una campana) grabado por la Philharmonia Orchestra.

Como se mencionó anteriormente, dado que el triángulo es un instrumento de percusión, presentará componentes inharmónicas en frecuencia, lo cual es fácilmente observable en el gráfico en los picos erráticos de la función del tiempo recién mostrada.

Sin embargo, las campanas tienen un comportamiento más melódico que otros instrumentos de percusión como la batería, y es por esto que el índice de modulación no deberá ser demasiado grande, ya que estoy traería demasiadas inharmonías al sonido.

Luego de varios intentos y simulaciones, se decidió fijar  $f_c = 440Hz$  y  $f_m = 1.4 \cdot f_c$  como las frecuencias en las que el sonido de la campana resulta más real y agradable al oído. Para frecuencias menores también se logran resultados interesantes, pero a partir de cierto valor de frecuencia a medida que se va subiendo en el espectro se comenzará a conseguir un sonido más robótico o menos natural.

Para las fórmulas de las envolventes, se siguió las sugerencias de Chowning, haciendo a  $I(t)$  proporcional a  $A(t)$ , y fijando

$A(t) = A_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ , por lo que  $I(t) = I_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ , con  $I_o=0.5$  y  $A_{max}$  la intensidad inicial del sonido.

La constante de tiempo se fijó de manera tal que

A continuación se muestra un gráfico de la señal sintetizada en tiempo:

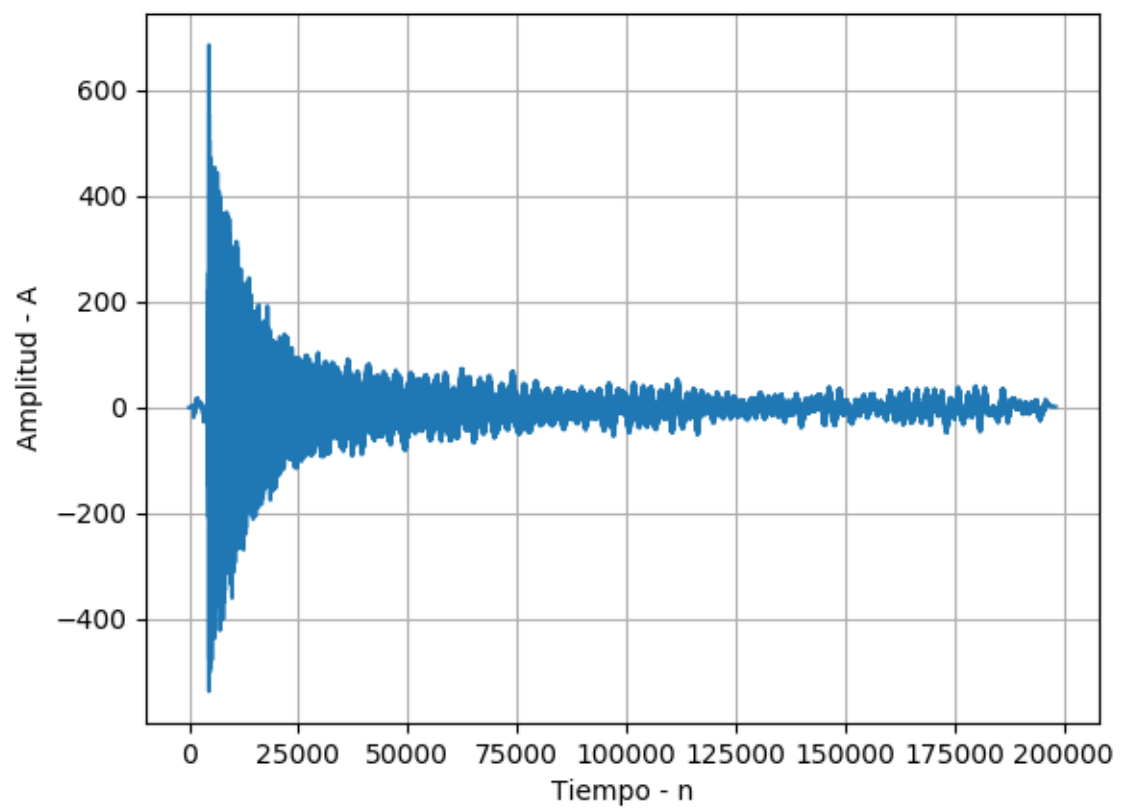


Figure 20: Triángulo

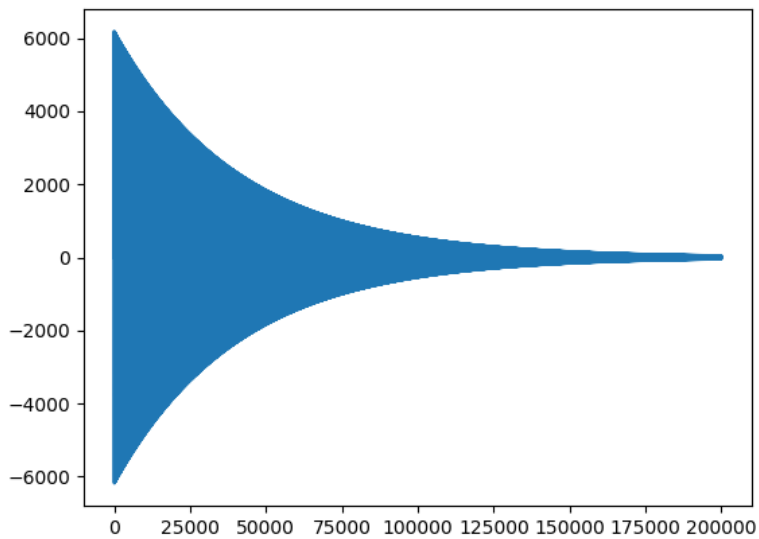


Figure 21: Señal sintetizada

Finalmente, se muestra un acercamiento en tiempo para mayor comprensión:

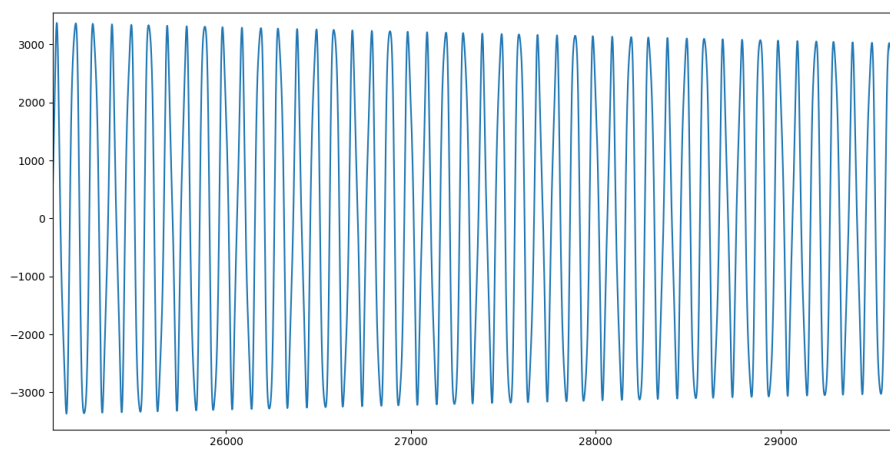


Figure 22: Acercamiento en tiempo de la señal sintetizada

## 1.4 Síntesis de una trompeta

Notamos que para la síntesis de la trompeta, Chowning describe el mismo tipo de envolvente que fue utilizada para la síntesis del clarinete.

Debido a que el paper indica que instrumento como la trompeta contienen todas las componentes armónicas (pares e impares), se utiliza  $N1 = 1$  y  $N2 = 2$ .

Ya habiendo explicado el razonamiento a utilizar, procederemos a hacer el análisis gráfico de las notas de una trompeta. En particular, A3 forte normal.

Con los mismos razonamientos que para el clarinete, se obtuvieron los tiempos de Attack, Decay, Sustain y Release:

- Tiempo de attack de 0.16 segundos.
- Tiempo de Decay de 0.034 segundos.
- Tiempo de Release de 0.226 segundos.

Se observan las siguientes características notables para la nota:

1. La nota tiene zonas de mayor y de menor densidad, como era de notar para el clarinete.
2. La nota es notablemente asimétrica en amplitud: Las amplitudes positivas alcanzan el triple del máximo de lo que alcanzan las negativas.
3. La zona de mayor densidad de la nota se encuentra mayormente del lado negativo que del positivo.
4. Las zonas de mayor densidad tienen baja amplitud con respecto a las de baja densidad, siendo esta diferencia de amplitud mucho más grande que con el clarinete.
5. El attack de la nota resulta aproximadamente del mismo orden que el clarinete, pero el decay es más rápido y el release más lento.
6. Al igual que con el clarinete, aparecen ciertas frecuencias bajas montadas sobre la señal, esto estando reflejado en aquellas zonas de densidad intermedia.

Las observaciones anteriores llevan a las siguientes conclusiones, que fueron aplicadas a la hora de realizarse la síntesis:

- Debido a la notable diferencia en amplitud entre zonas de distinta densidad/frecuencia, se eligió un índice de modulación bajo, que haga que las zonas de alta frecuencia tengan menor amplitud. El factor  $I_o$  que se menciona en la síntesis del clarinete resultó ser igual para todas las etapas ADSR para asegurar “continuidad” en la envolvente de cada zona de densidad alta. Luego de experimentar con las distintas posibilidades, se eligió un  $I_o = -1$ . Se muestra el cambio en la amplitud de las zonas de densidad con distintos valores de  $I_o$ .



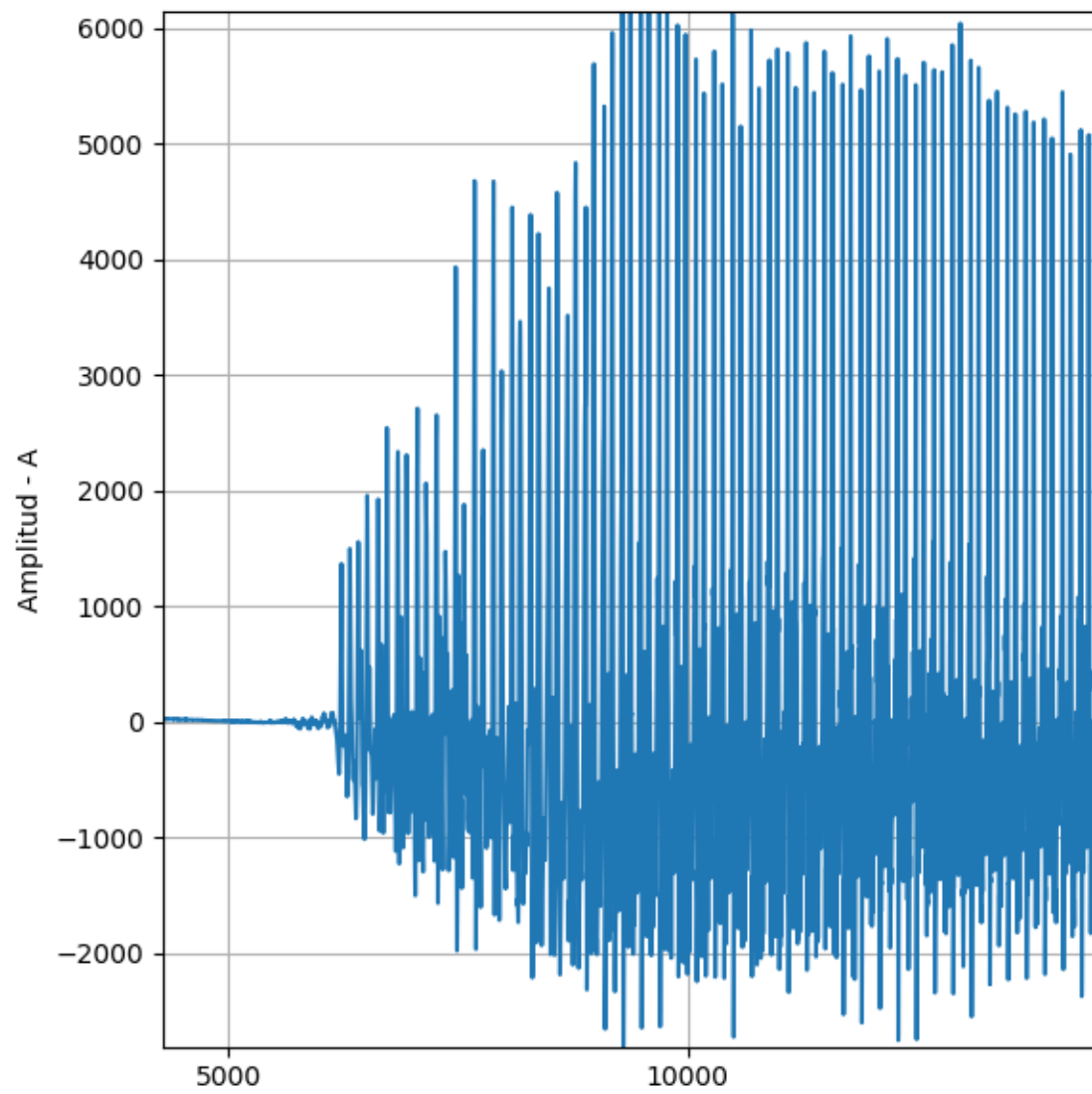


Figure 23: Nota de una trompeta

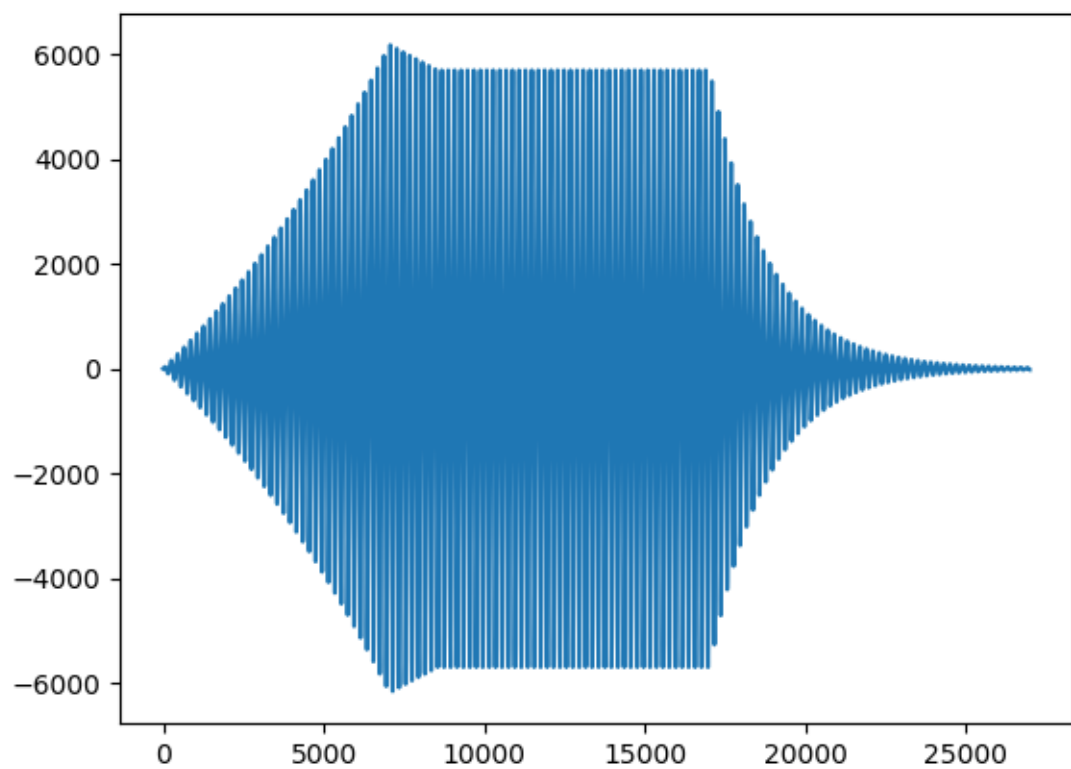


Figure 24:  $I_0 = -0.5$

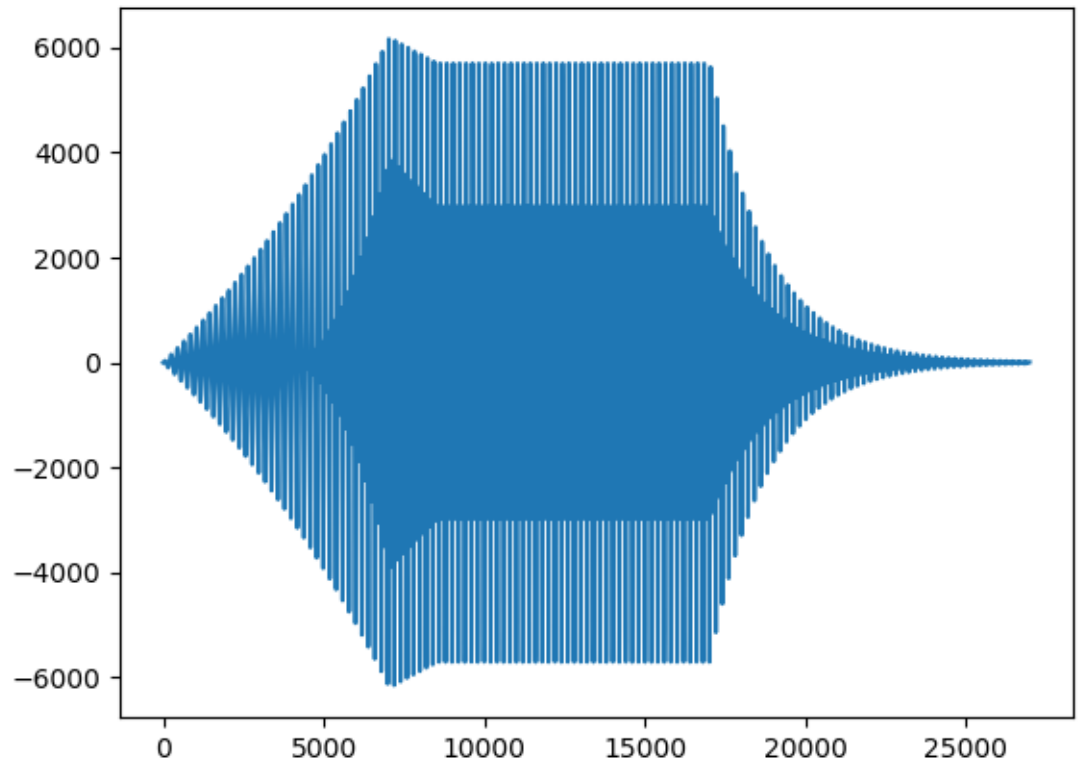


Figure 25:  $I_0 = 2$

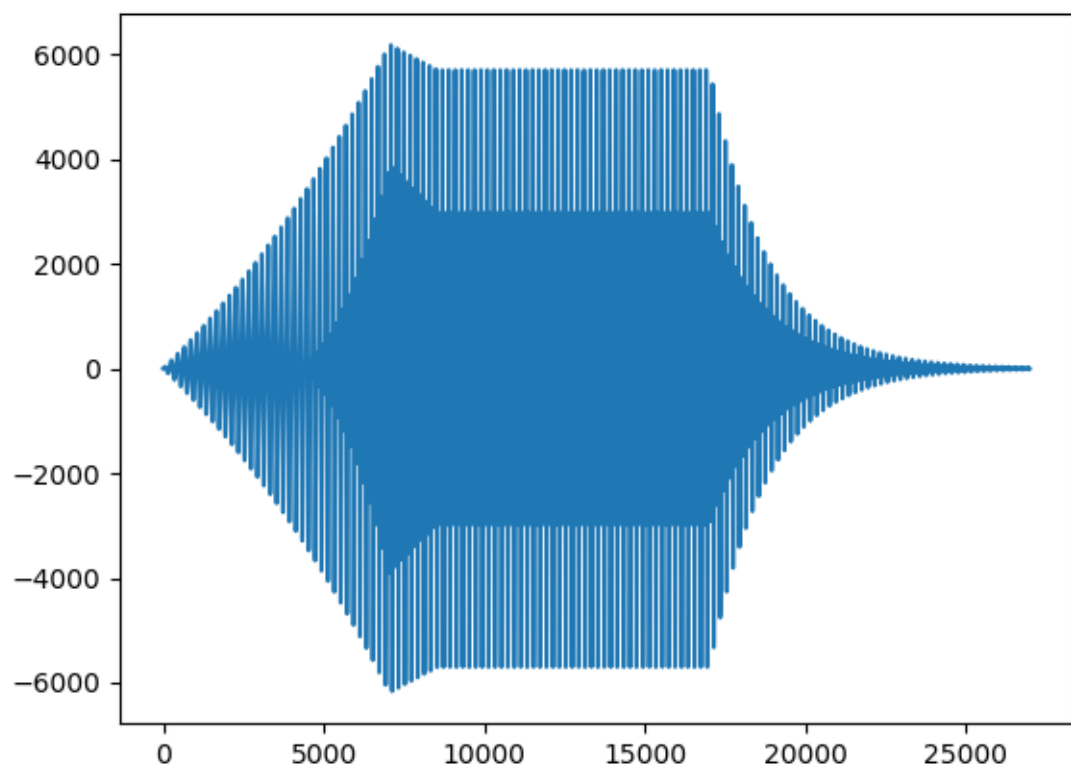


Figure 26:  $I_0=-2$

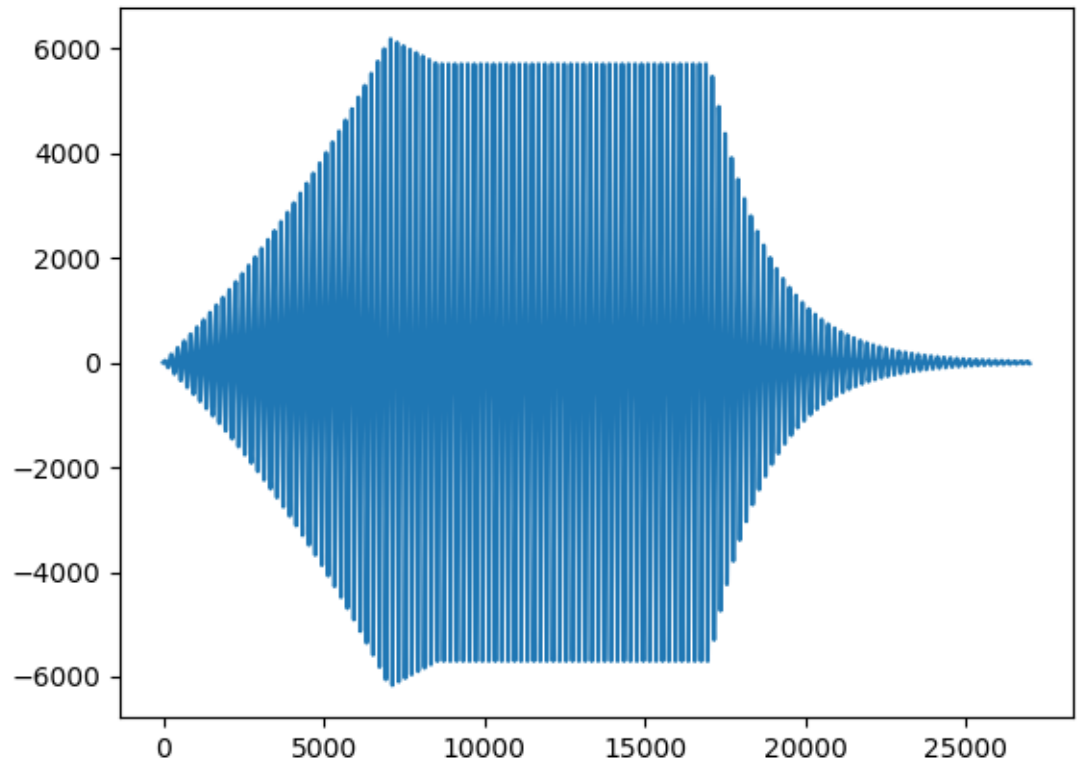


Figure 27:  $I_0 = -1$ . Se ve que las zonas de alta densidad tienen baja amplitud con respecto a las de baja densidad

- Como las amplitudes mínimas son tres veces más chica en valor absoluto que las amplitudes máximas para la nota, se eligió escalar las amplitudes negativas en ese factor a la hora de sintetizar la nota. A continuación se muestra el resultado de dicha operación.

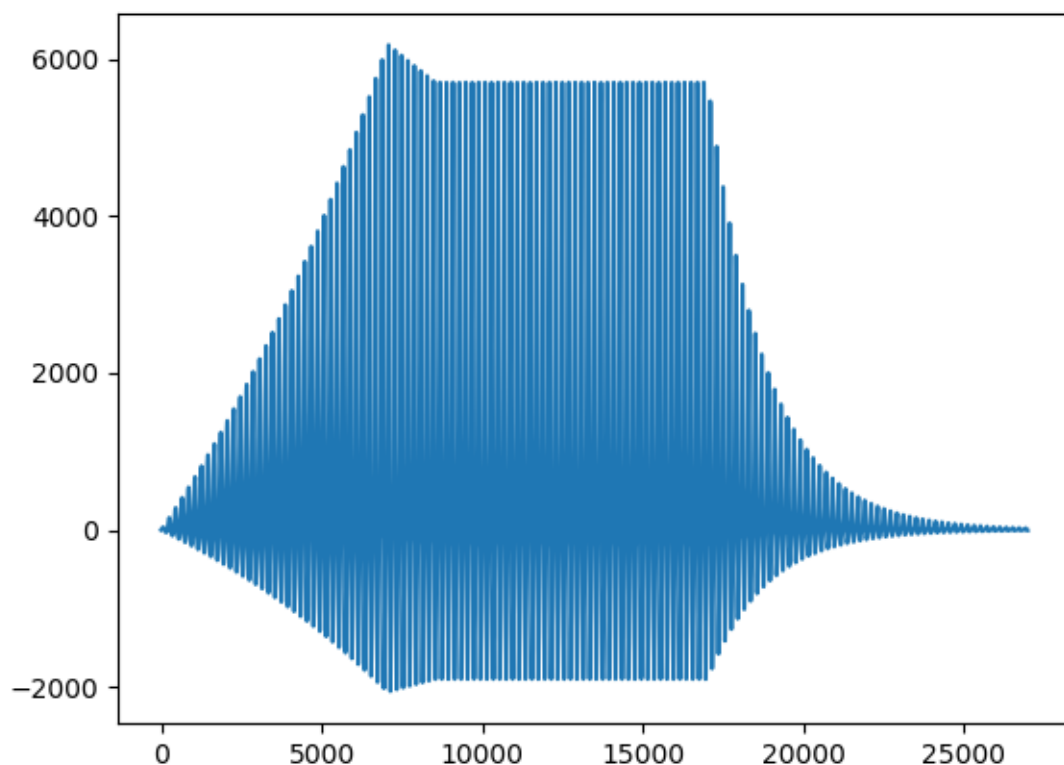


Figure 28: Nota sintetizada con amplitudes negativas escaladas

- Habiendo notado que la zona de mayor densidad se ubica mayormente del lado negativo de las amplitudes, y habiendo notado también la presencia de frecuencias agregadas como en el clarinete, que se muestran en zonas de densidad intermedia, se busca una relación entre los dos factores. Se descubre que cuando se suma una frecuencia baja (del orden de los 0.3Hz) a la frecuencia modulante, la zona de mayor densidad baja en amplitud (se hace más negativa) en la etapa de sustain. De lo contrario, si se resta una frecuencia baja, la zona de mayor densidad se hace más positiva en amplitud. Se muestran gráficos representativos de esta situación

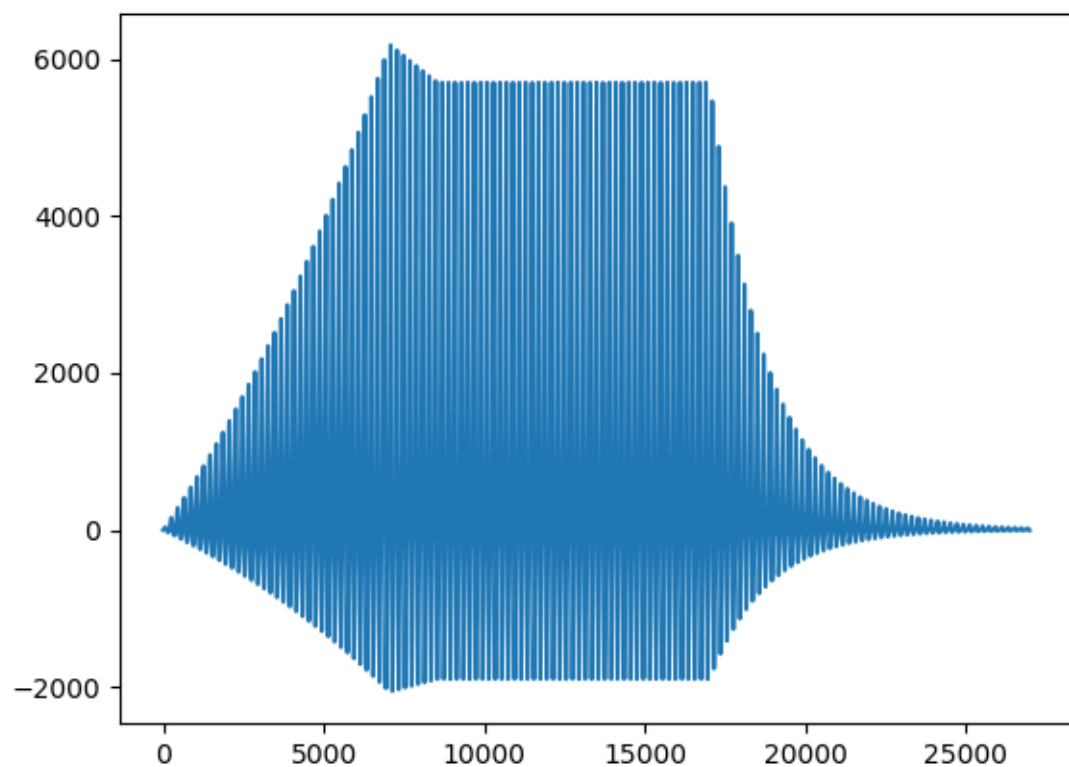


Table 1: Nota sintetizada con parámetros ADSR (versión no final)

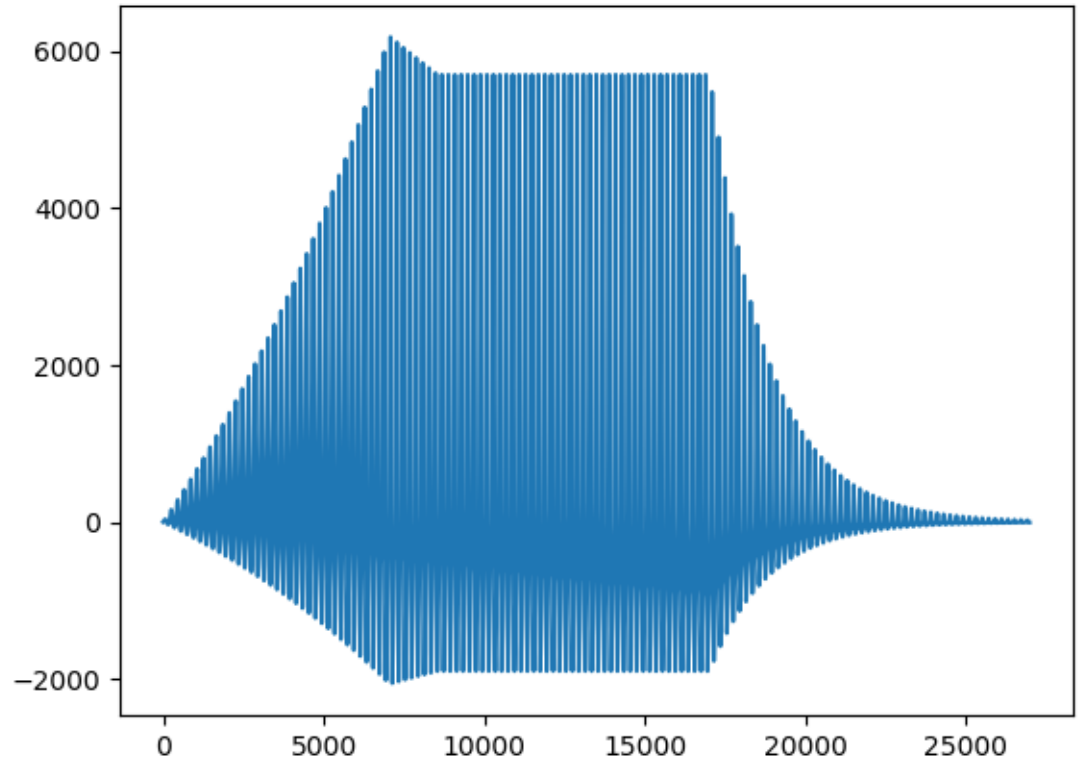


Figure 29: Nota mostrada anteriormente con  $f'_m = fm + 0.2Hz$



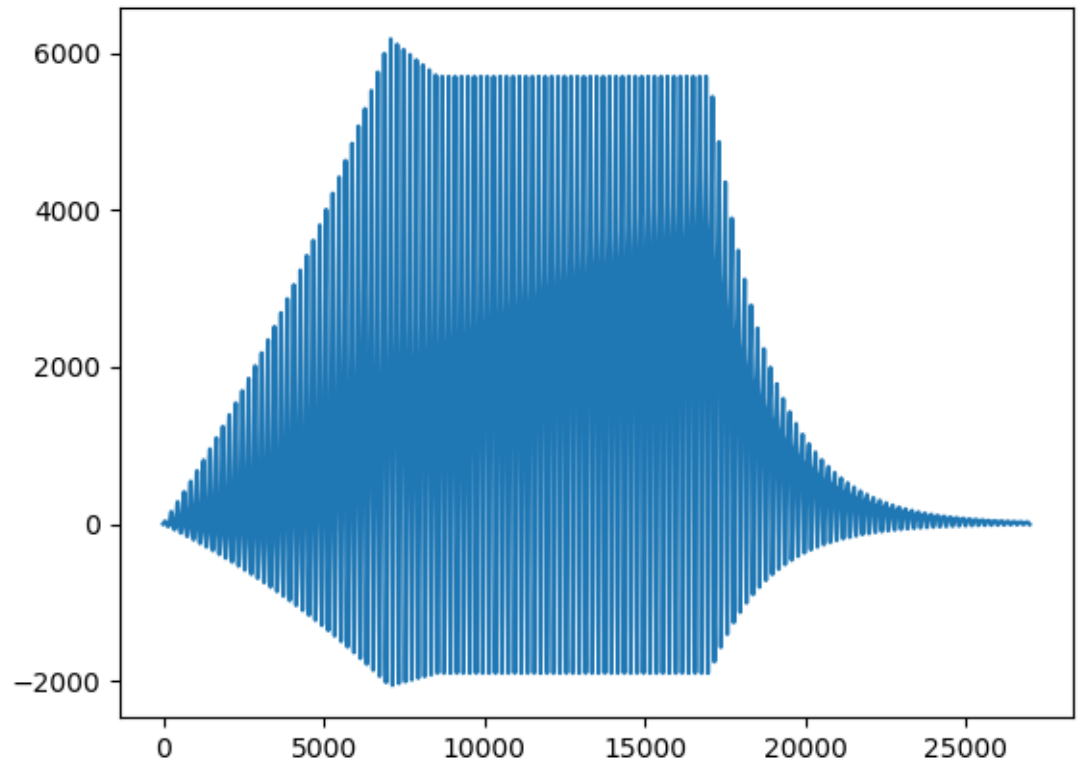


Figure 30: Nota mostrada anteriormente con  $f'_m = fm - 0.3Hz$

Finalmente se llega a la versión final de la nota:

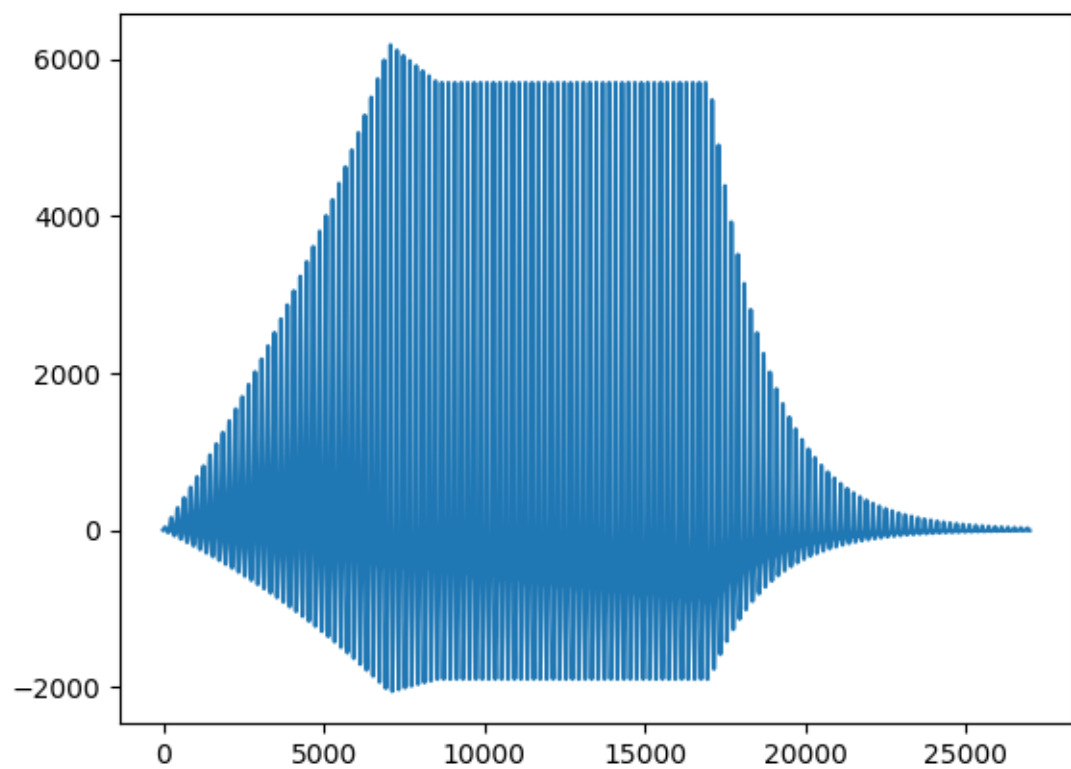


Figure 31: Nota sintetizada, versión final