

# Síntesis musical digital

Fundamentos, metodologías y algoritmos

**Avelino Herrera Morales**

Ingeniero en informática

Especialista en hardware y en desarrollo de sistemas embebidos

# Contenidos

Elementos de la síntesis musical

Muestreo

Osciladores

Envolventes

Filtros

Efectos

# Contenidos

## **Elementos de la síntesis musical**

Muestreo

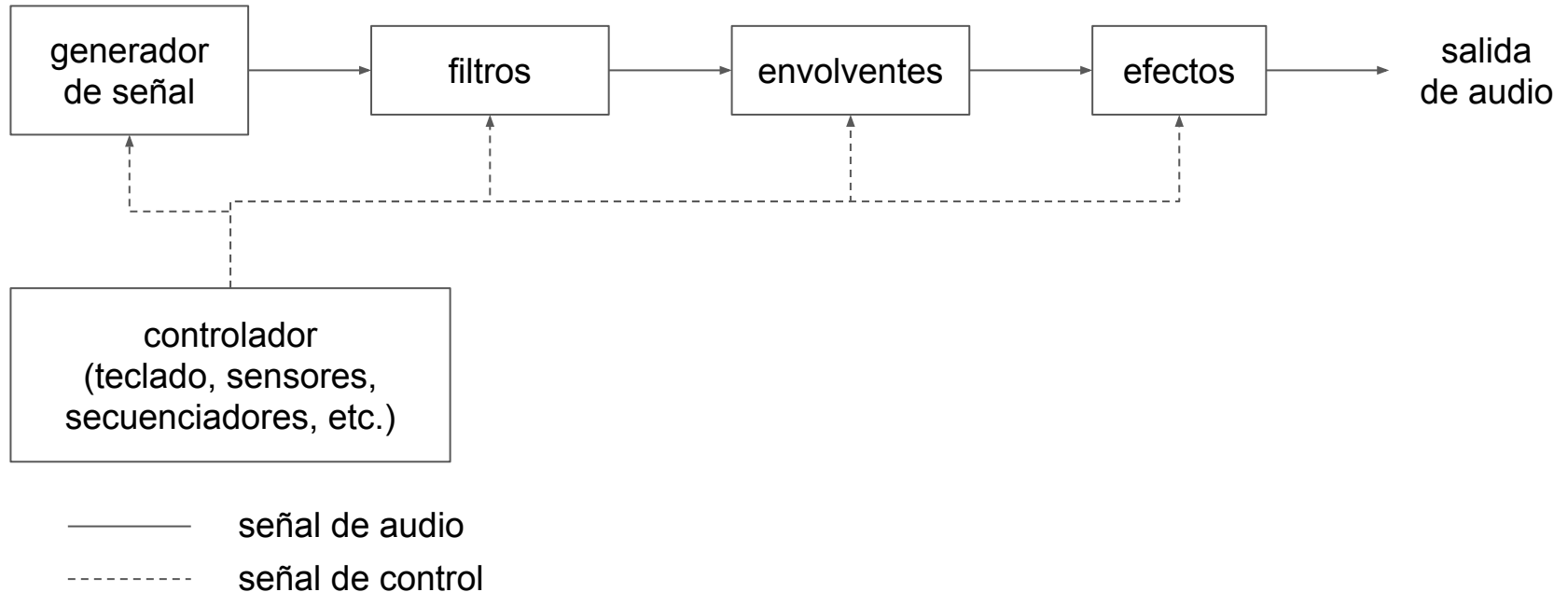
Osciladores

Envolventes

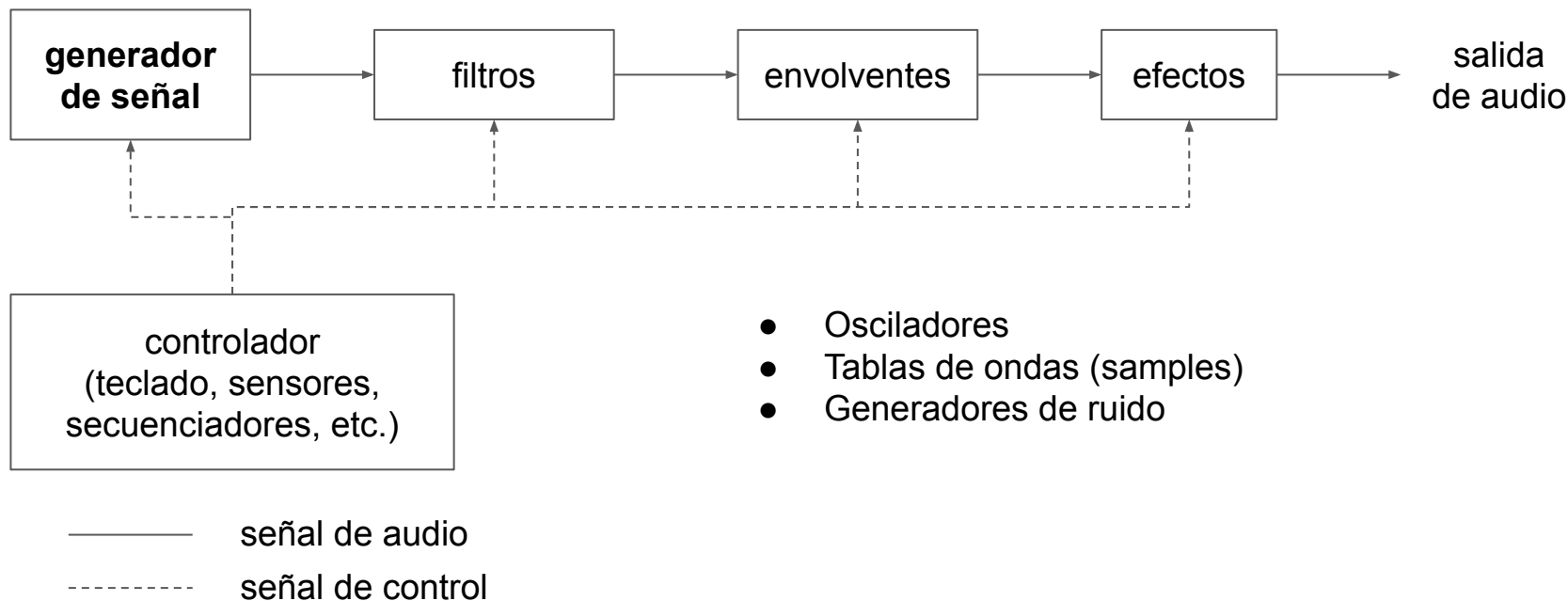
Filtros

Efectos

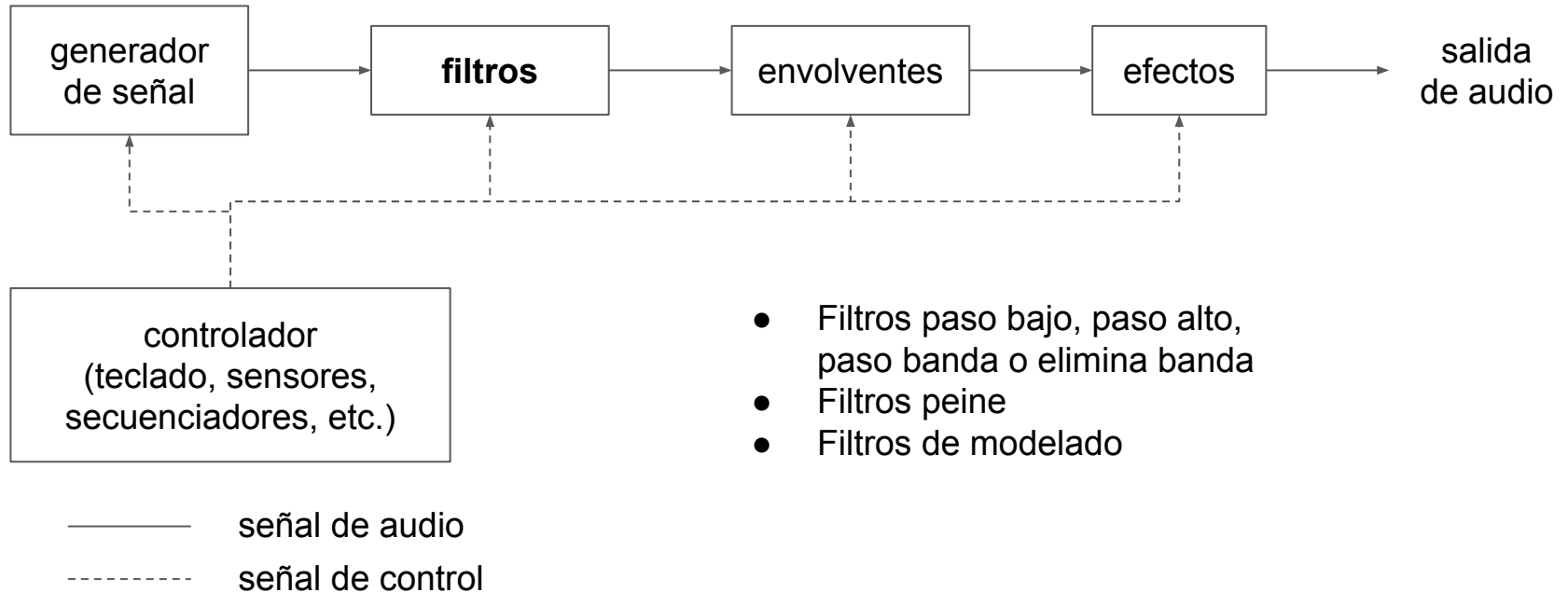
# Elementos de la síntesis musical



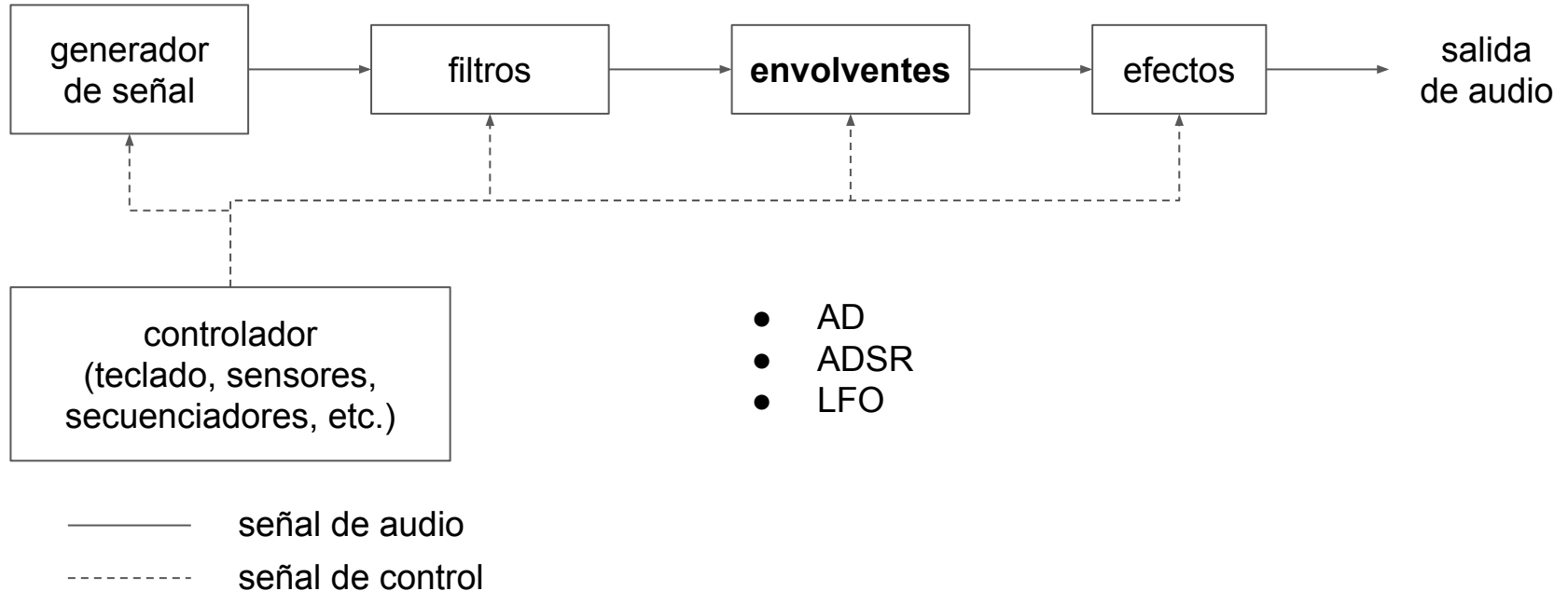
# Elementos de la síntesis musical



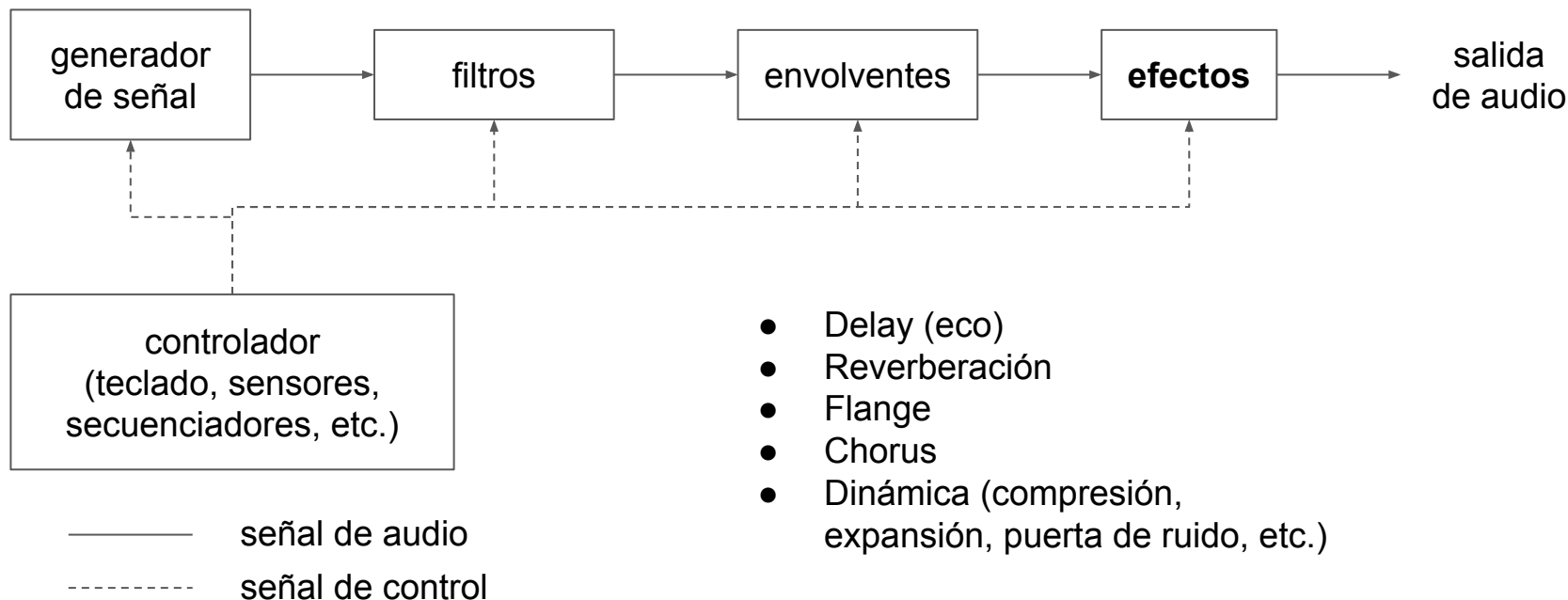
# Elementos de la síntesis musical



# Elementos de la síntesis musical



# Elementos de la síntesis musical





# Contenidos

## Elementos de la síntesis musical

### **Muestreo**

Osciladores

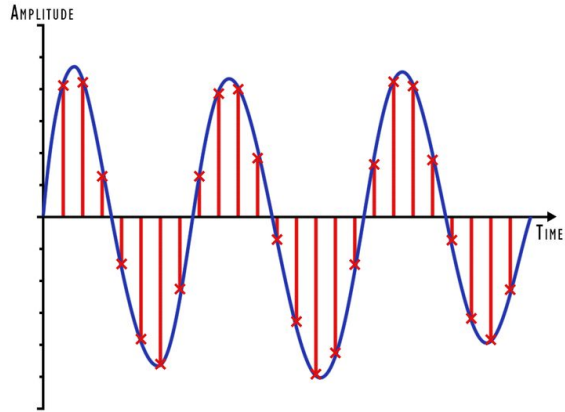
Envolventes

Filtros

Efectos

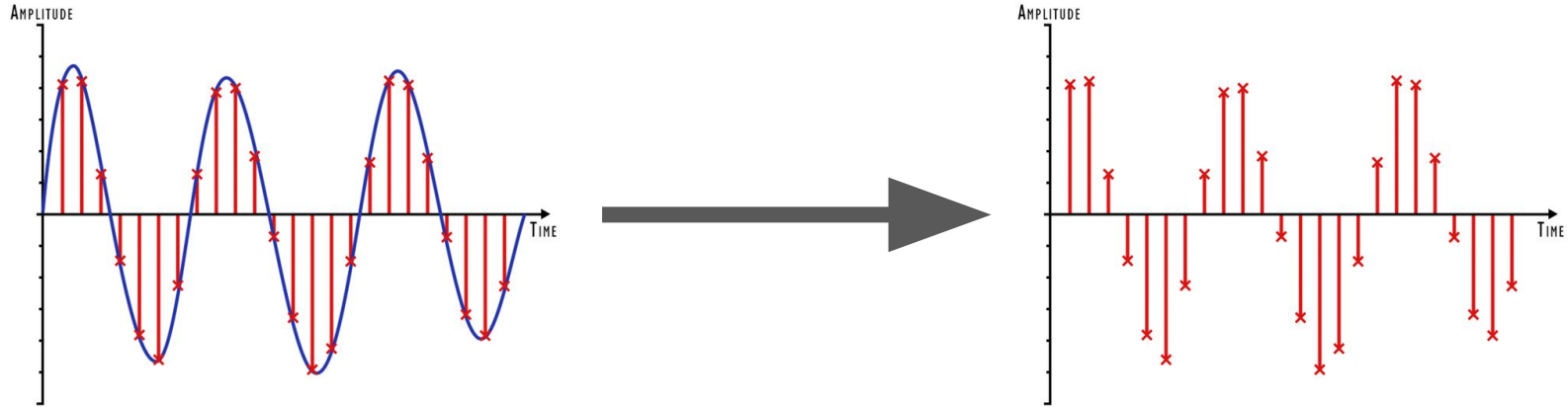
# Muestreo

Imágenes: © “Milesjpool”, wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.



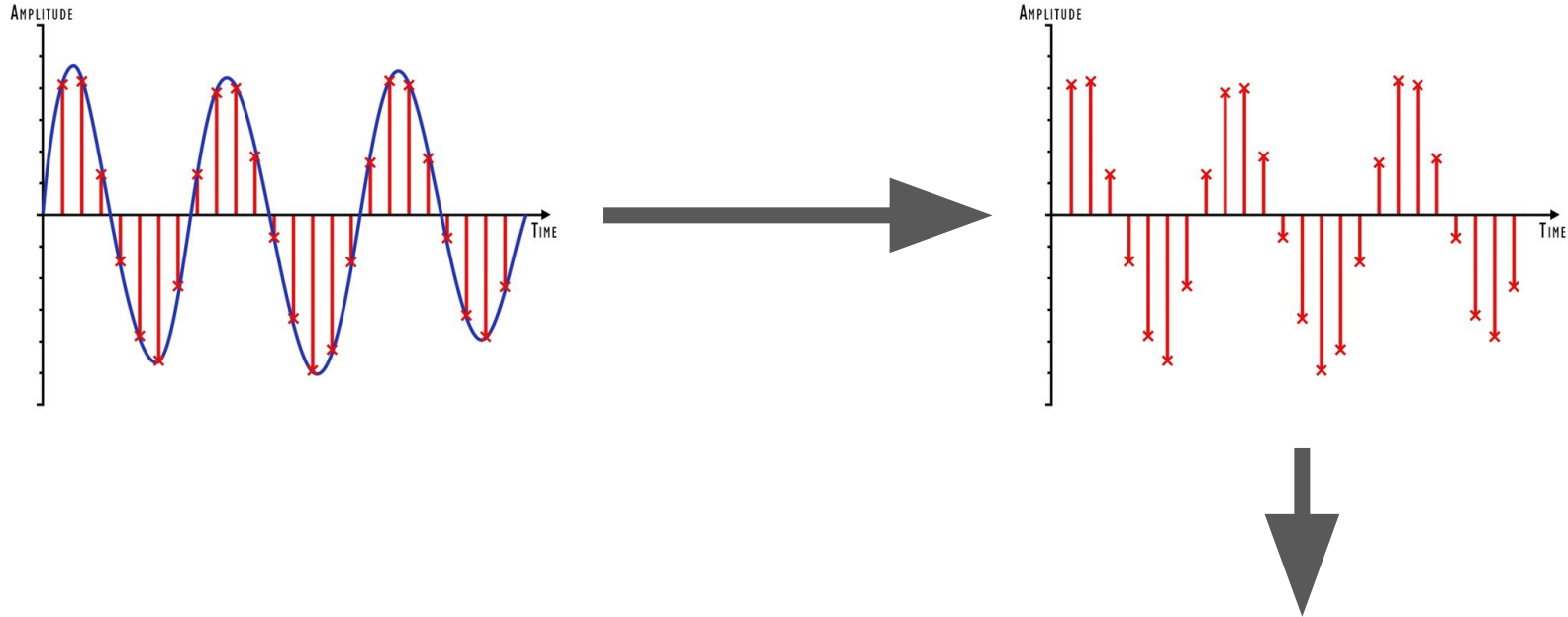
# Muestreo

Imágenes: © “Milesjpool”, wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.



# Muestreo

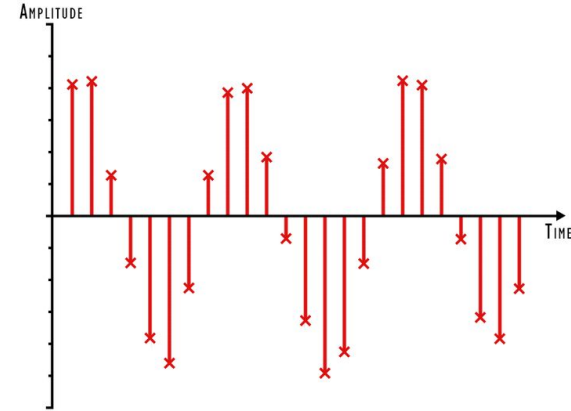
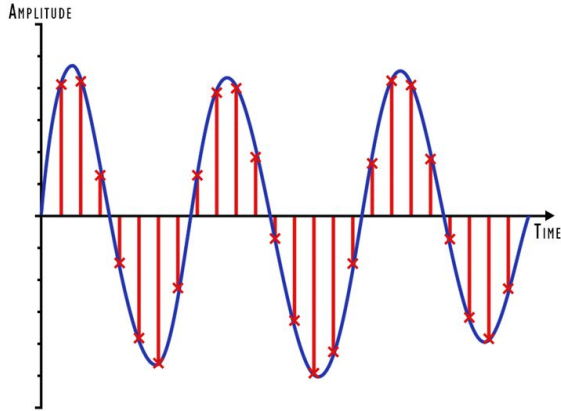
Imágenes: © “Milesjpool”, wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.



valores numéricos equiespaciados en el tiempo que determinan la amplitud de la señal en cada instante.

# Muestreo

Imágenes: © “Milesjpool”, wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.



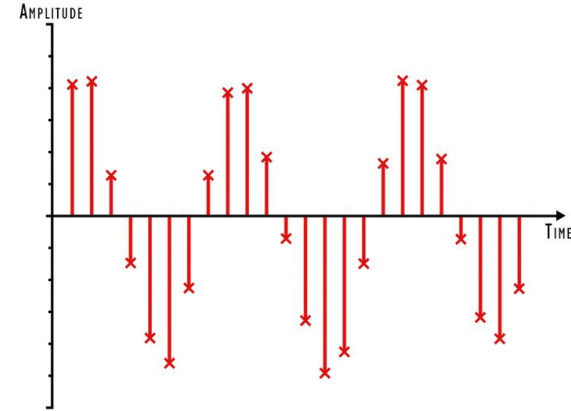
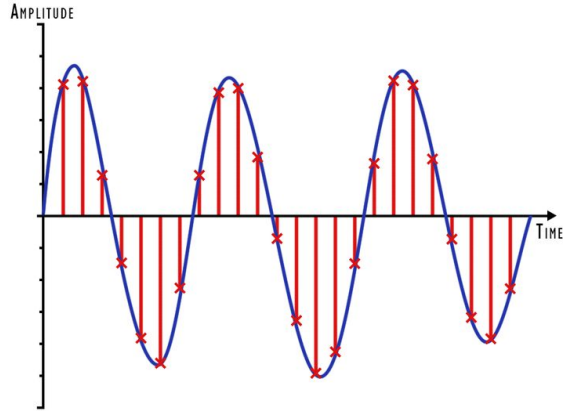
Representación cómoda para sistemas digitales. Las muestras son fáciles almacenar en memoria.



valores numéricos equiespaciados en el tiempo que determinan la amplitud de la señal en cada instante.

# Muestreo Síntesis

Imágenes: © "Milesjpool", wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.



Representación cómoda para sistemas digitales. Las muestras son fáciles almacenar en memoria.



valores numéricos equiespaciados en el tiempo que determinan la amplitud de la señal en cada instante.

# Muestreo Síntesis

Sistemas digitales:

- Potencia limitada → No pueden generar una señal “continua” o sacar valores “todo el tiempo”.

# Muestreo Síntesis

Sistemas digitales:

- Potencia limitada → No pueden generar una señal “continua” o sacar valores “todo el tiempo”.
- Generan valores a ciertos intervalos (cada pocos microsegundos, por ejemplo).



# Muestreo Síntesis

Sistemas digitales:

- Potencia limitada → No pueden generar una señal “continua” o sacar valores “todo el tiempo”.
- Generan valores a ciertos intervalos (cada pocos microsegundos, por ejemplo).
- Los valores generados son “reconstruidos” por la electrónica externa al sistema digital para generar una señal continua que sí puede mover el cono de un altavoz.

# Muestreo Síntesis

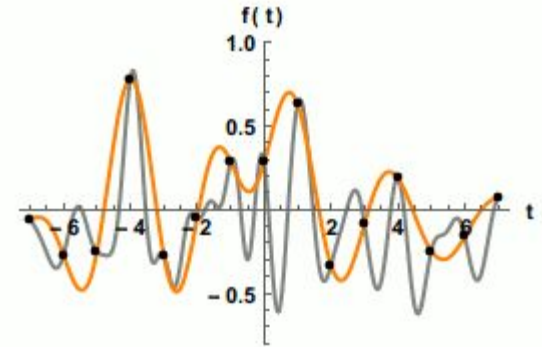
Sistemas digitales:

- Potencia limitada → No pueden generar una señal “continua” o sacar valores “todo el tiempo”.
- Generan valores a ciertos intervalos (cada pocos microsegundos, por ejemplo).
- Los valores generados son “reconstruidos” por la electrónica externa al sistema digital para generar una señal continua que sí puede mover el cono de un altavoz.
- Ese intervalo de tiempo entre que se genera una muestra y se genera la siguiente, viene determinado por la **frecuencia de muestreo**.

# Muestreo Síntesis

Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

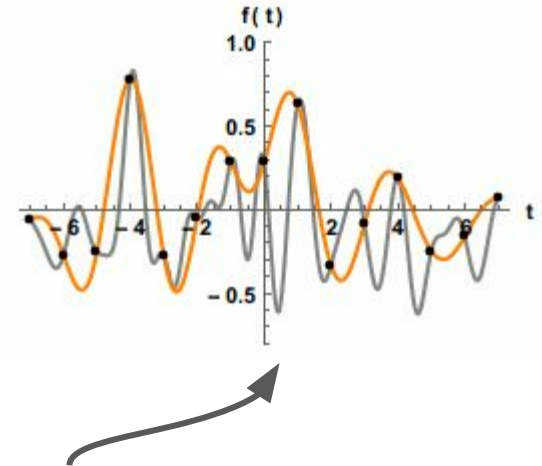
- **En gris:** la señal que queremos que salga por el altavoz.
- **Los puntos:** Los instantes de tiempo en los que el sistema digital genera una muestra (un valor de señal).
- **En naranja:** la señal que la electrónica externa es capaz de reconstruir a partir de los valores de los puntos que le da el sistema digital.



# Muestreo Síntesis

Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

- **En gris:** la señal que queremos que salga por el altavoz.
- **Los puntos:** Los instantes de tiempo en los que el sistema digital genera una muestra (un valor de señal).
- **En naranja:** la señal que la electrónica externa es capaz de reconstruir a partir de los valores de los puntos que le da el sistema digital.

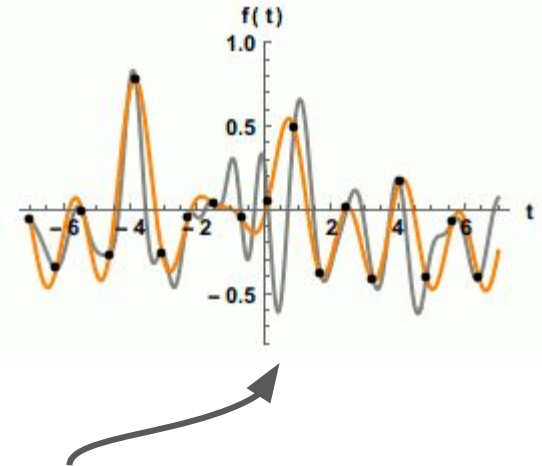


La **frecuencia de muestreo** no es suficientemente alta como para que la señal **naranja (la que se oye)** sea igual a la señal **gris (la que quiero que se oiga)**.

# Muestreo Síntesis

Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

- **En gris:** la señal que queremos que salga por el altavoz.
- **Los puntos:** Los instantes de tiempo en los que el sistema digital genera una muestra (un valor de señal).
- **En naranja:** la señal que la electrónica externa es capaz de reconstruir a partir de los valores de los puntos que le da el sistema digital.

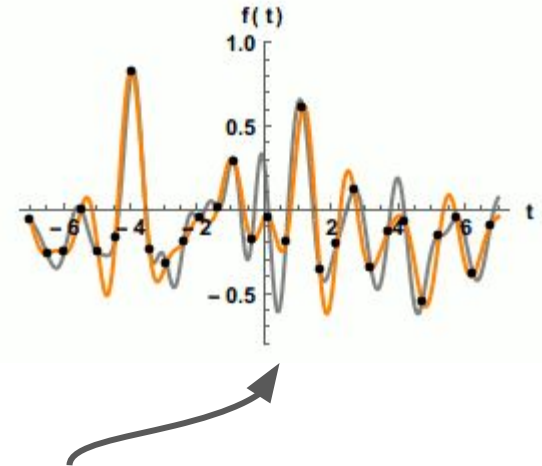


A medida que **aumentamos** la **frecuencia de muestreo** disminuimos el tiempo entre muestras (los puntos) y la señal **naranja (la que se oye)** se va aproximando más a la señal **gris (la que quiero que se oiga)**.

# Muestreo Síntesis

Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

- **En gris:** la señal que queremos que salga por el altavoz.
- **Los puntos:** Los instantes de tiempo en los que el sistema digital genera una muestra (un valor de señal).
- **En naranja:** la señal que la electrónica externa es capaz de reconstruir a partir de los valores de los puntos que le da el sistema digital.

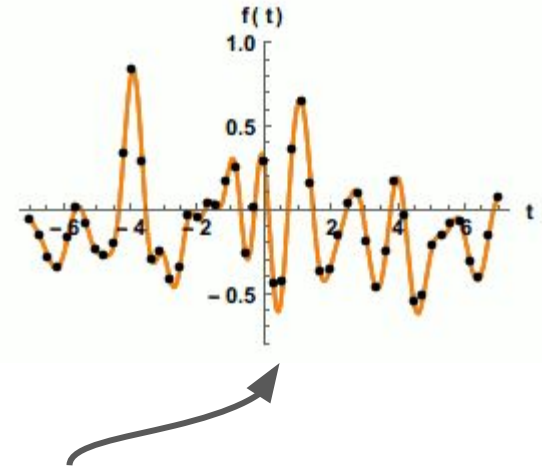


A medida que **aumentamos** la **frecuencia de muestreo** disminuimos el tiempo entre muestras (los puntos) y la señal **naranja (la que se oye)** se va aproximando más a la señal **gris (la que quiero que se oiga)**.

# Muestreo Síntesis

Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

- **En gris:** la señal que queremos que salga por el altavoz.
- **Los puntos:** Los instantes de tiempo en los que el sistema digital genera una muestra (un valor de señal).
- **En naranja:** la señal que la electrónica externa es capaz de reconstruir a partir de los valores de los puntos que le da el sistema digital.



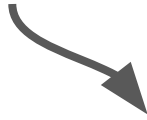
Nunca conseguiremos un ajuste “perfecto” pero a partir de una determinada frecuencia de muestreo ya conseguimos una fidelidad “aceptable”.

# Muestreo Síntesis

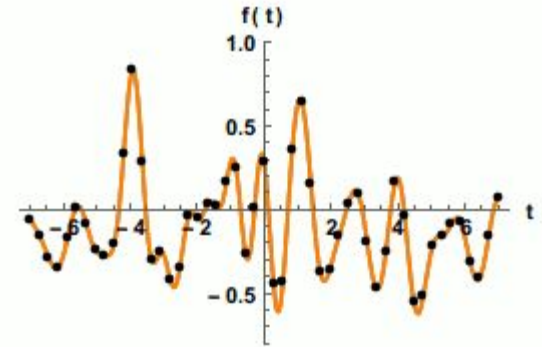
Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

## Teorema de Nyquist:

Si la frecuencia más alta que tiene una señal analógica es de  $F_{\max}$  hercios, entonces para que pueda ser muestreada o reconstruida en su totalidad debe usarse una frecuencia de muestreo de  $2 \times F_{\max}$  hercios.



- La frecuencia máxima de sonido que podemos percibir es de unos 20 KHz ( $F_{\max} = 20000$  hercios).



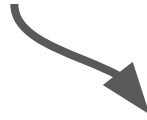


# Muestreo Síntesis

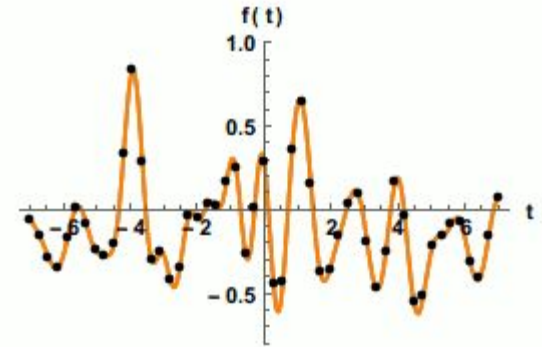
Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

## Teorema de Nyquist:

Si la frecuencia más alta que tiene una señal analógica es de  $F_{\max}$  hercios, entonces para que pueda ser muestreada o reconstruida en su totalidad debe usarse una frecuencia de muestreo de  $2 \times F_{\max}$  hercios.



- La frecuencia máxima de sonido que podemos percibir es de unos 20 KHz ( $F_{\max} = 20000$  hercios).
- Frecuencia de muestreo =  $2 \times F_{\max} = 40000$  hercios.

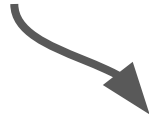


# Muestreo Síntesis

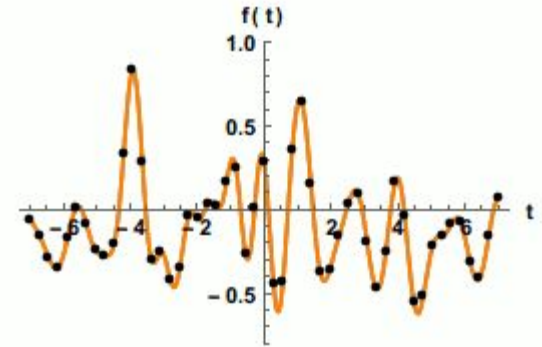
Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

## Teorema de Nyquist:

Si la frecuencia más alta que tiene una señal analógica es de  $F_{\max}$  hercios, entonces para que pueda ser muestreada o reconstruida en su totalidad debe usarse una frecuencia de muestreo de  $2 \times F_{\max}$  hercios.



- La frecuencia máxima de sonido que podemos percibir es de unos 20 KHz ( $F_{\max} = 20000$  hercios).
- Frecuencia de muestreo =  $2 \times F_{\max} = 40000$  hercios.
- Un sistema digital (ordenador, sintetizador digital, etc.) que quiera generar sonido de cierta calidad, debe generar como mínimo **40000 muestras por segundo**.

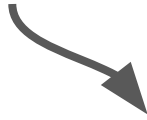


# Muestreo Síntesis

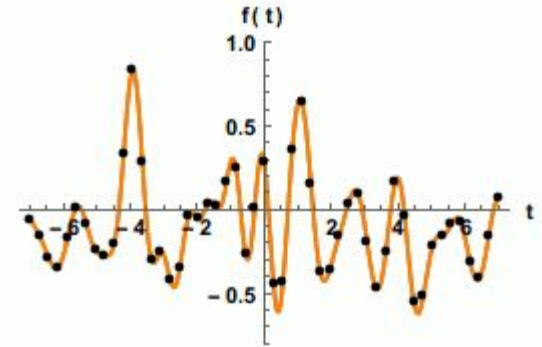
Imagen: © “Jacopo Bertolotti”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

## Teorema de Nyquist:

Si la frecuencia más alta que tiene una señal analógica es de  $F_{\max}$  hercios, entonces para que pueda ser muestreada o reconstruida en su totalidad debe usarse una frecuencia de muestreo de  $2 \times F_{\max}$  hercios.



- La frecuencia máxima de sonido que podemos percibir es de unos 20 KHz ( $F_{\max} = 20000$  hercios).
- Frecuencia de muestreo =  $2 \times F_{\max} = 40000$  hercios.
- Un sistema digital (ordenador, sintetizador digital, etc.) que quiera generar sonido de cierta calidad, debe generar como mínimo **40000 muestras por segundo**.
- Estándar CD: 44.1 KHz (44100 muestras/segundo)



# Contenidos

**Elementos de la síntesis musical**

**Muestreo**

**Osciladores**

Envolventes

Filtros

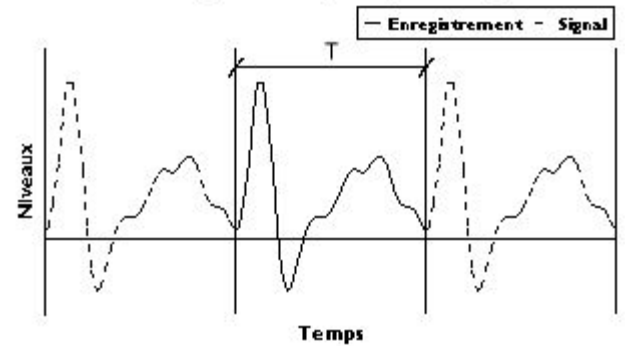
Efectos

# Osciladores

Elemento que genera una **señal periódica** caracterizada por una **frecuencia fundamental**.

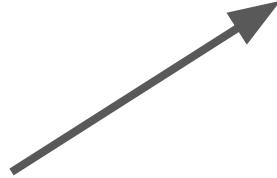
Imagen: © “Jct”, wikimedia.org. Licencia PD.

Exemple de signal périodique



# Osciladores

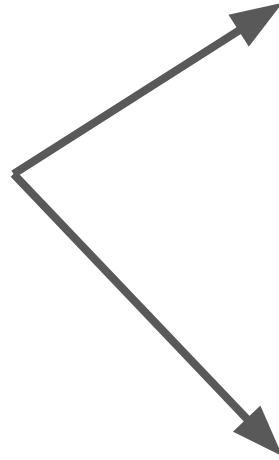
Elemento que genera una **señal periódica** caracterizada por una **frecuencia fundamental**.



**Algorítmicos:** Generan una señal a partir de un algoritmo predefinido y se usan para generar formas de onda relativamente sencillas (senoidales, triangulares, cuadradas, diente de sierra, etc.)

# Osciladores

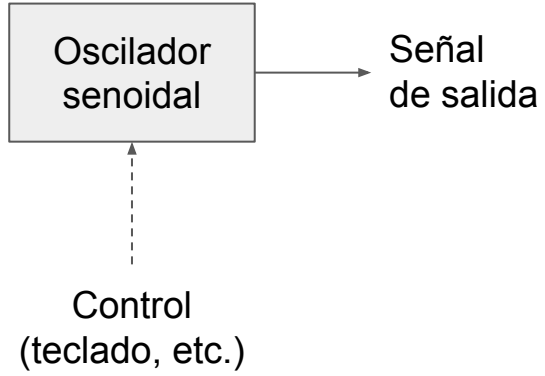
Elemento que genera una **señal periódica** caracterizada por una **frecuencia fundamental**.



**Algorítmicos:** Generan una señal a partir de un algoritmo predefinido y se usan para generar formas de onda relativamente sencillas (senoidales, triangulares, cuadradas, diente de sierra, etc.)

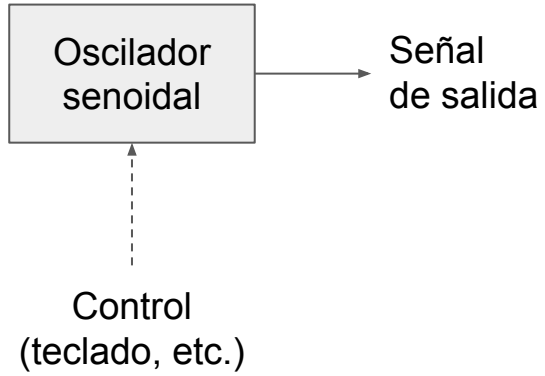
**Basados en tablas de ondas:** Generan una señal a partir de ondas previamente muestreadas de sonidos reales o calculadas con anterioridad. Se usan para sonidos complejos (sampler) o cuya generación algorítmica es muy costosa para el sistema digital.

# Osciladores



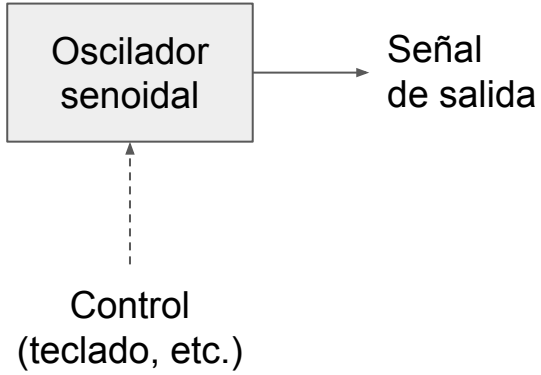


# Osciladores



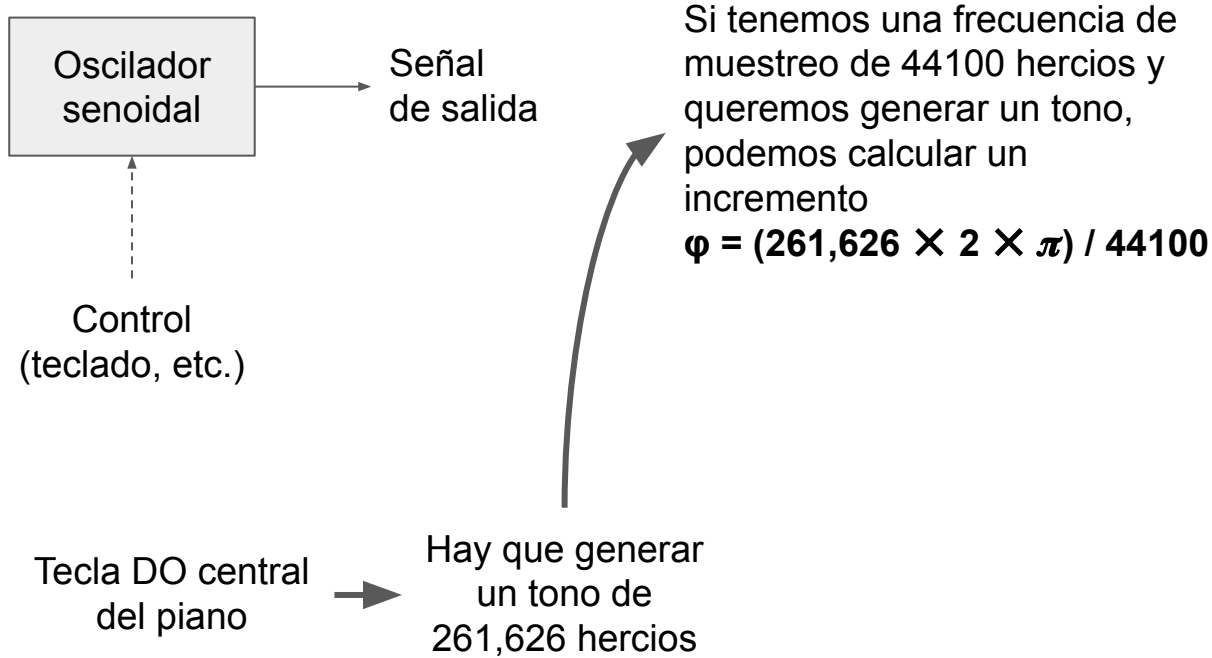
Tecla DO central  
del piano

# Osciladores

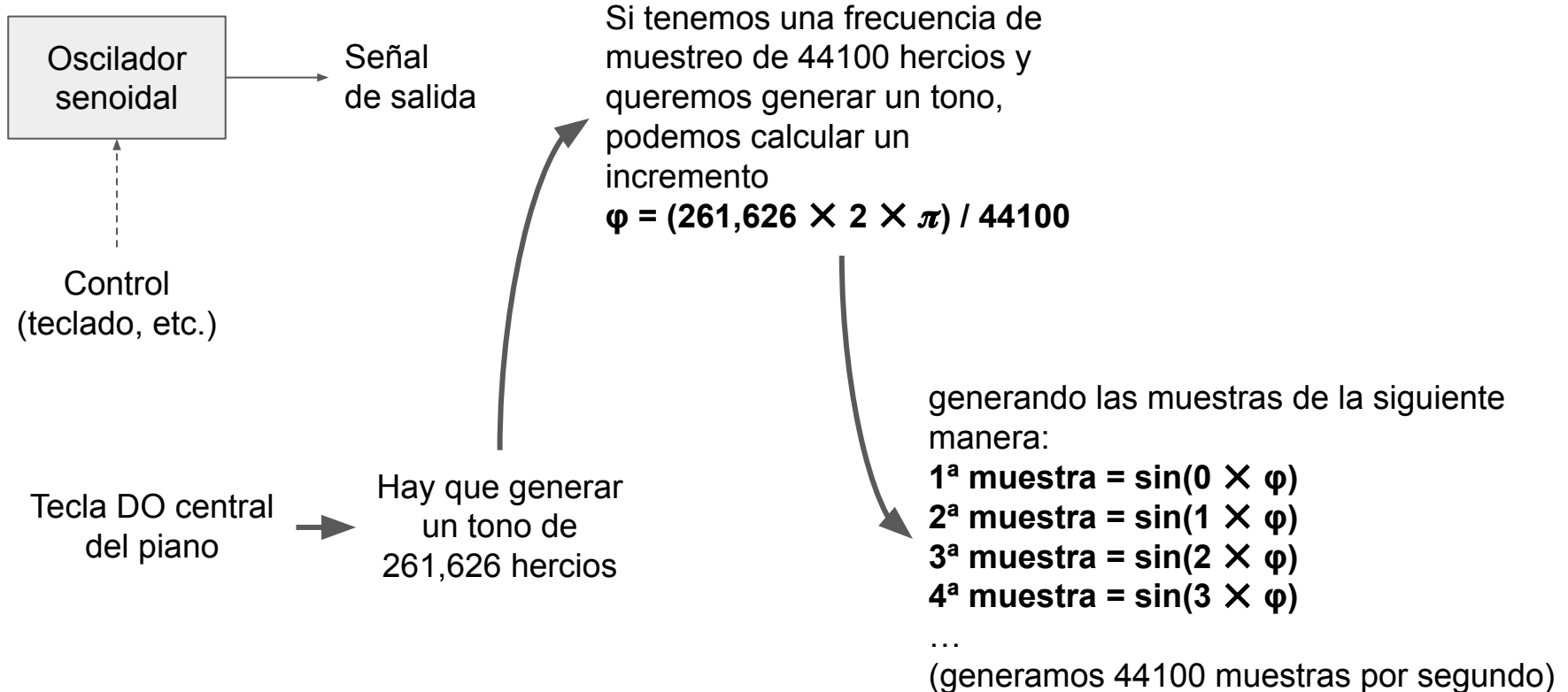


Tecla DO central del piano → Hay que generar un tono de 261,626 hercios

# Osciladores

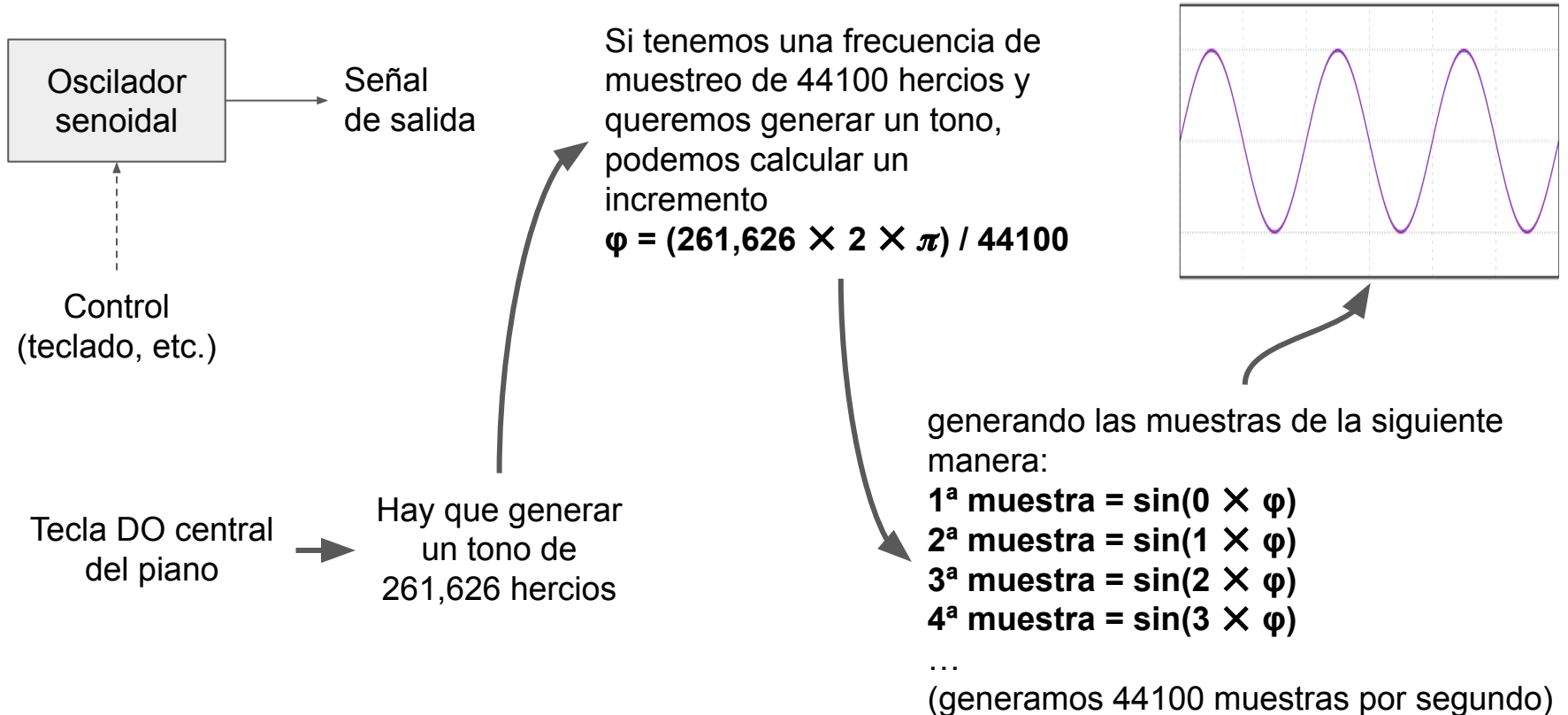


# Osciladores



# Osciladores

Imagen: © "MrLejinad", wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.



# Contenidos

**Elementos de la síntesis musical**

**Muestreo**

**Osciladores**

**Envolventes**

Filtros

Efectos

# Envolventes

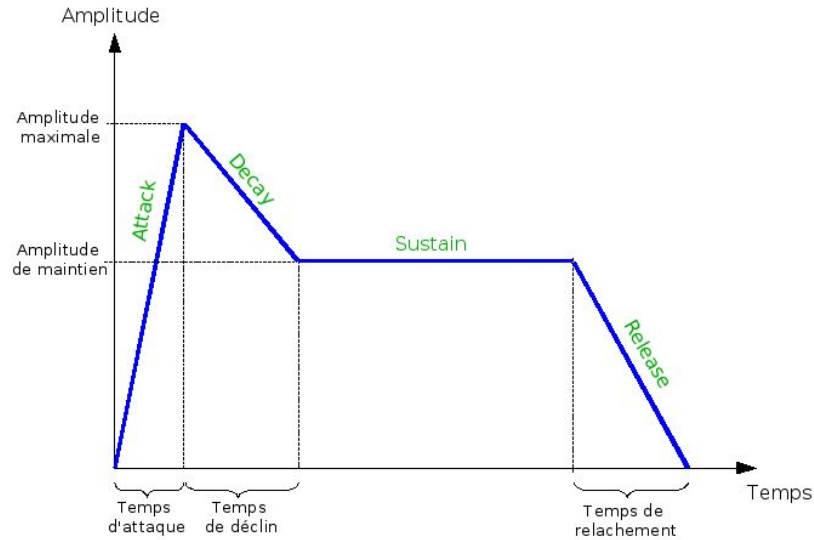


Imagen: © "Vonvon", wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.

# Envolventes

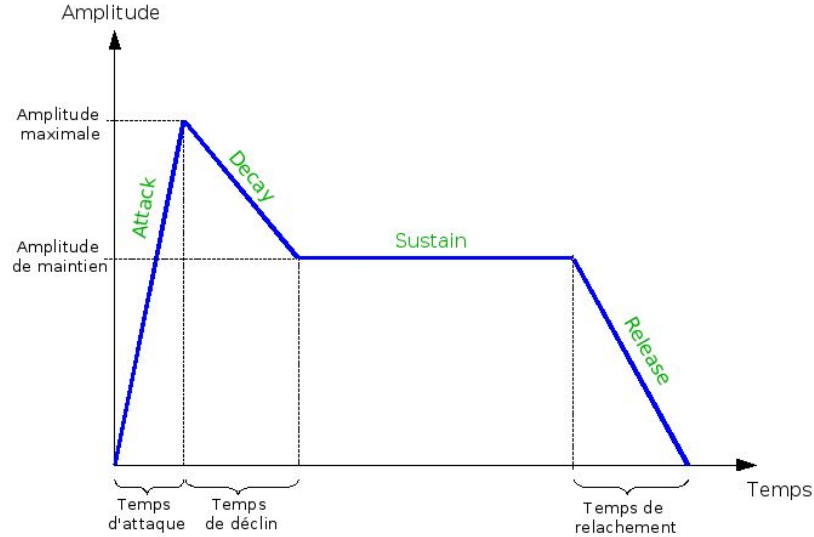


Imagen: © "Vonvon", wikimedia.org. Licencia CC-A-SA.

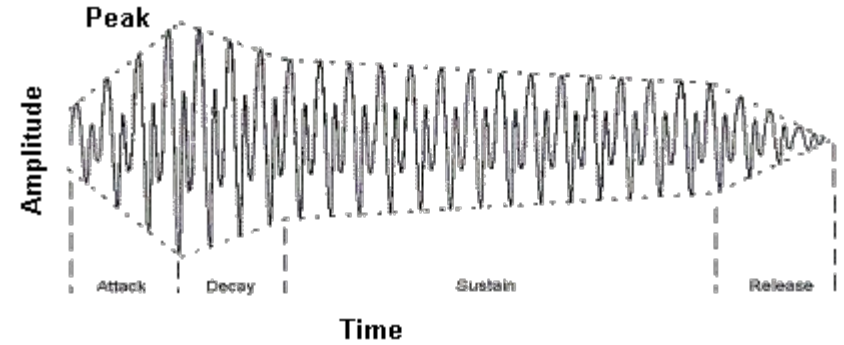
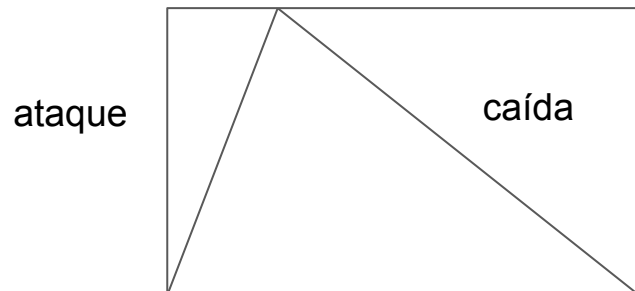


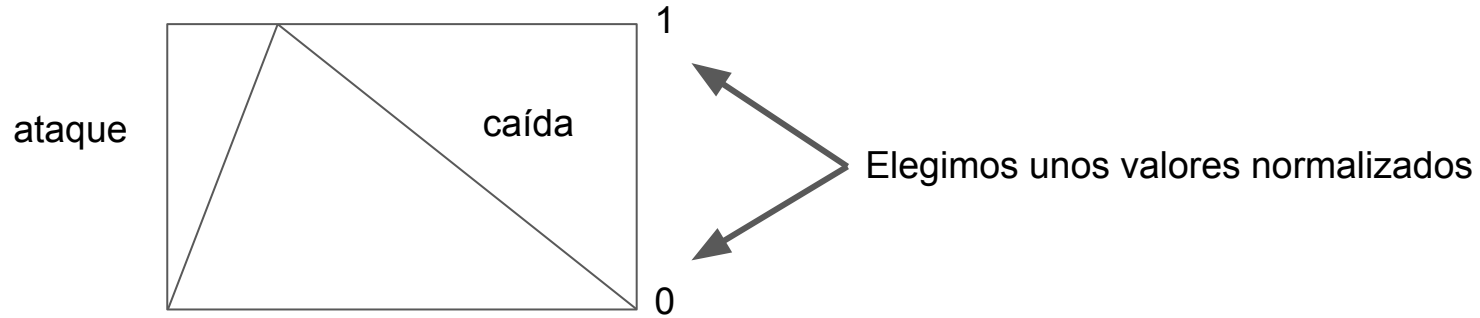
Imagen: © Nick Curtis, quora.com.



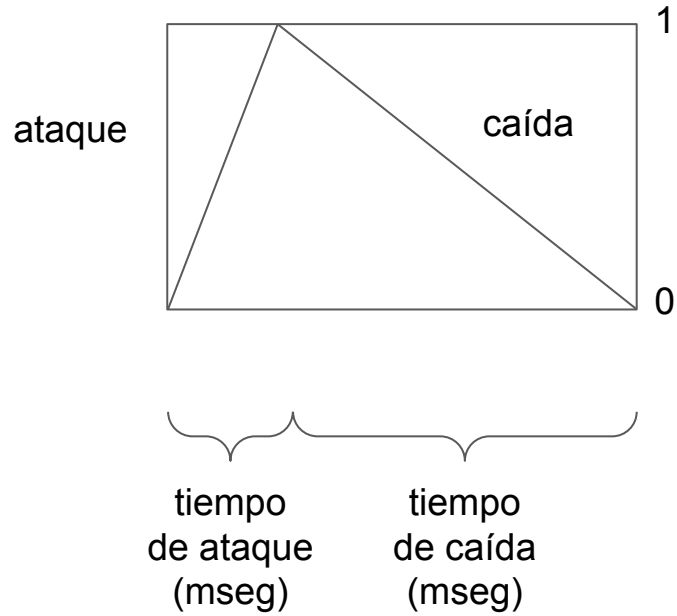
# Envolventes



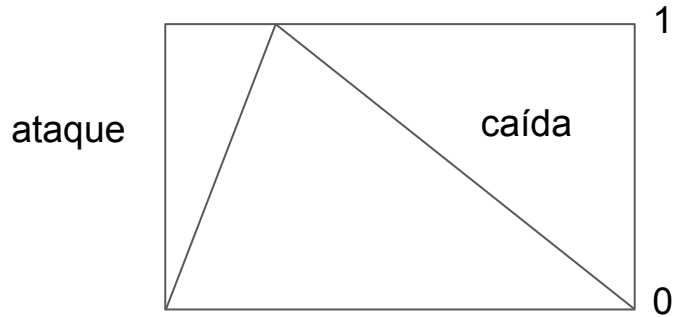
# Envolventes



# Envolventes



# Envolventes

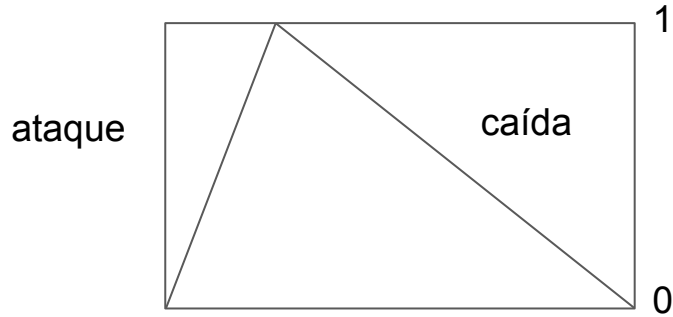


tiempo  
de ataque  
(mseg)

tiempo  
de caída  
(mseg)

Núm. muestras ataque = tiempo de ataque  $\times$  44100  
Núm. muestras caída = tiempo de caída  $\times$  44100

# Envolventes



tiempo  
de ataque  
(mseg)

tiempo  
de caída  
(mseg)

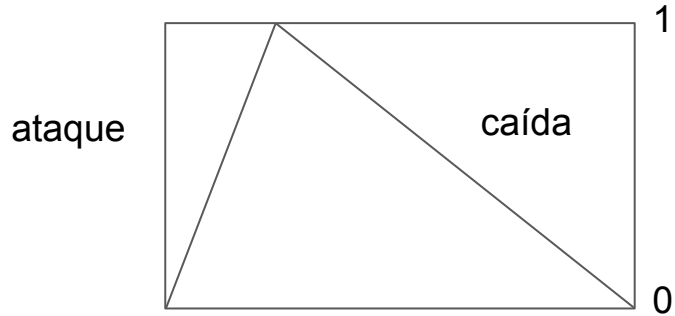
$$\text{Inc}_a = 1 / \text{Núm. muestras ataque}$$
$$\text{Inc}_c = 1 / \text{Núm. muestras caída}$$



Núm. muestras ataque = tiempo de ataque  $\times$  44100

Núm. muestras caída = tiempo de caída  $\times$  44100

# Envolventes



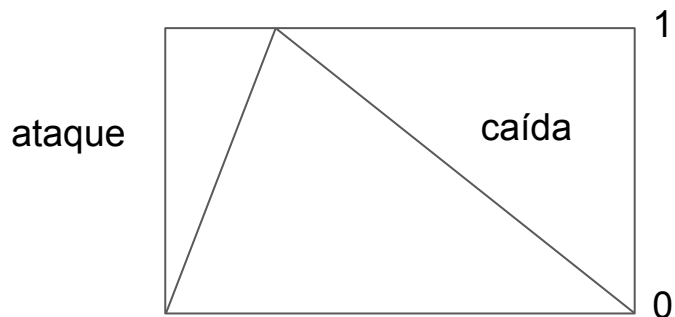
tiempo de ataque (mseg)      tiempo de caída (mseg)

Al empezar la nota:  
**salida = 0**

$$\text{Inc}_a = 1 / \text{Núm. muestras ataque}$$
$$\text{Inc}_c = 1 / \text{Núm. muestras caída}$$

$$\text{Núm. muestras ataque} = \text{tiempo de ataque} \times 44100$$
$$\text{Núm. muestras caída} = \text{tiempo de caída} \times 44100$$

# Envolventes



tiempo de ataque (mseg)

tiempo de caída (mseg)

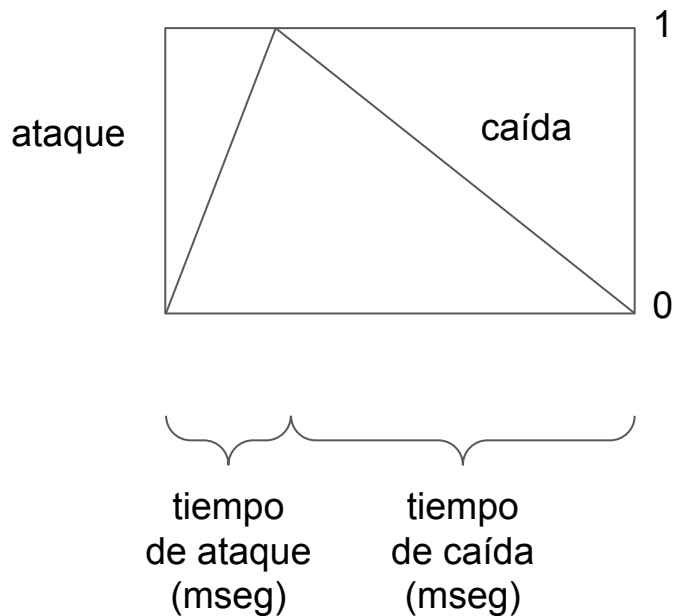
Durante el ataque **incrementamos** la salida en  $Inc_a$ .

Al empezar la nota: **salida = 0**

$$Inc_a = 1 / \text{Núm. muestras ataque}$$
$$Inc_c = 1 / \text{Núm. muestras caída}$$

$$\text{Núm. muestras ataque} = \text{tiempo de ataque} \times 44100$$
$$\text{Núm. muestras caída} = \text{tiempo de caída} \times 44100$$

# Envolventes



Durante el ataque  
**incrementamos** la  
salida en  $Inc_a$ .

Al empezar la nota:  
**salida = 0**

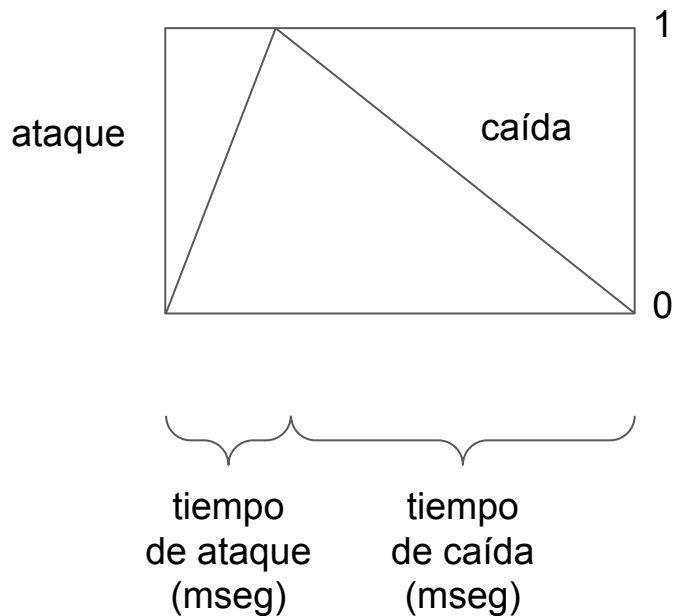
Cuando la salida  
**llega a 1**,  
empezamos la  
caída.

$$Inc_a = 1 / \text{Núm. muestras ataque}$$
$$Inc_c = 1 / \text{Núm. muestras caída}$$

$$\text{Núm. muestras ataque} = \text{tiempo de ataque} \times 44100$$
$$\text{Núm. muestras caída} = \text{tiempo de caída} \times 44100$$



# Envolventes



Durante el ataque  
**incrementamos** la  
salida en  $\text{Inc}_a$ .

Al empezar la nota:  
**salida = 0**

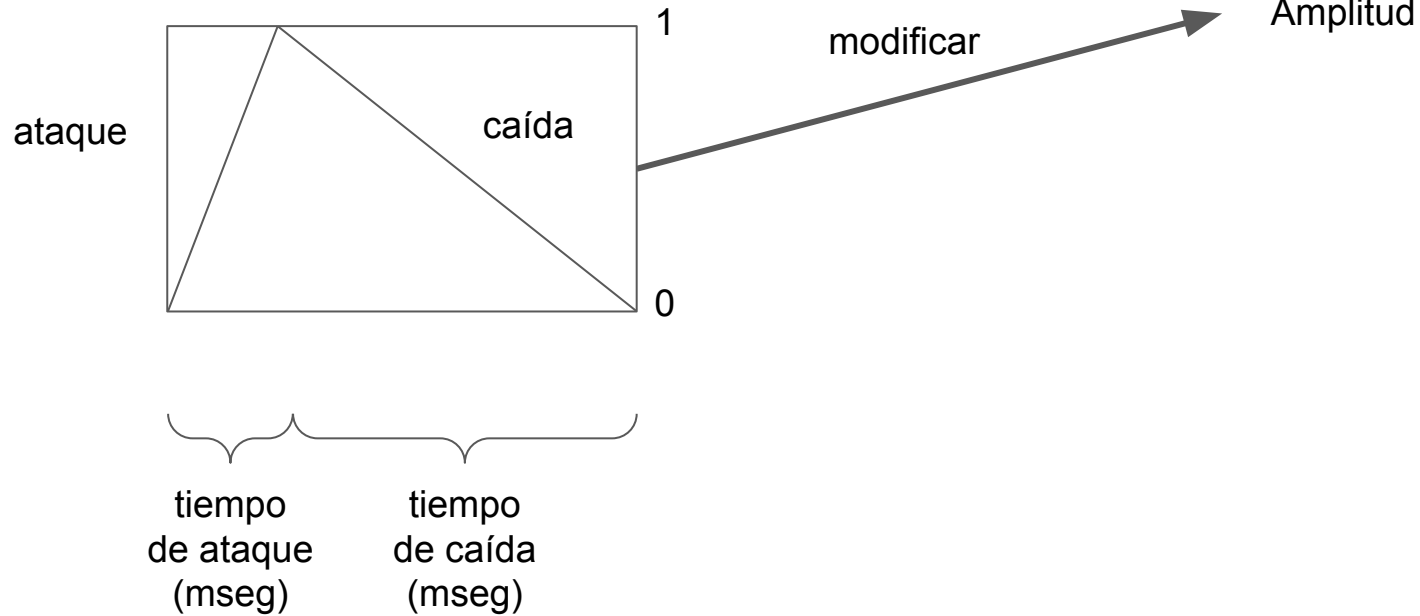
Durante la caída  
**decrementamos**  
la salida en  $\text{Inc}_c$ .

Cuando la salida  
**llega a 1**,  
empezamos la  
caída.

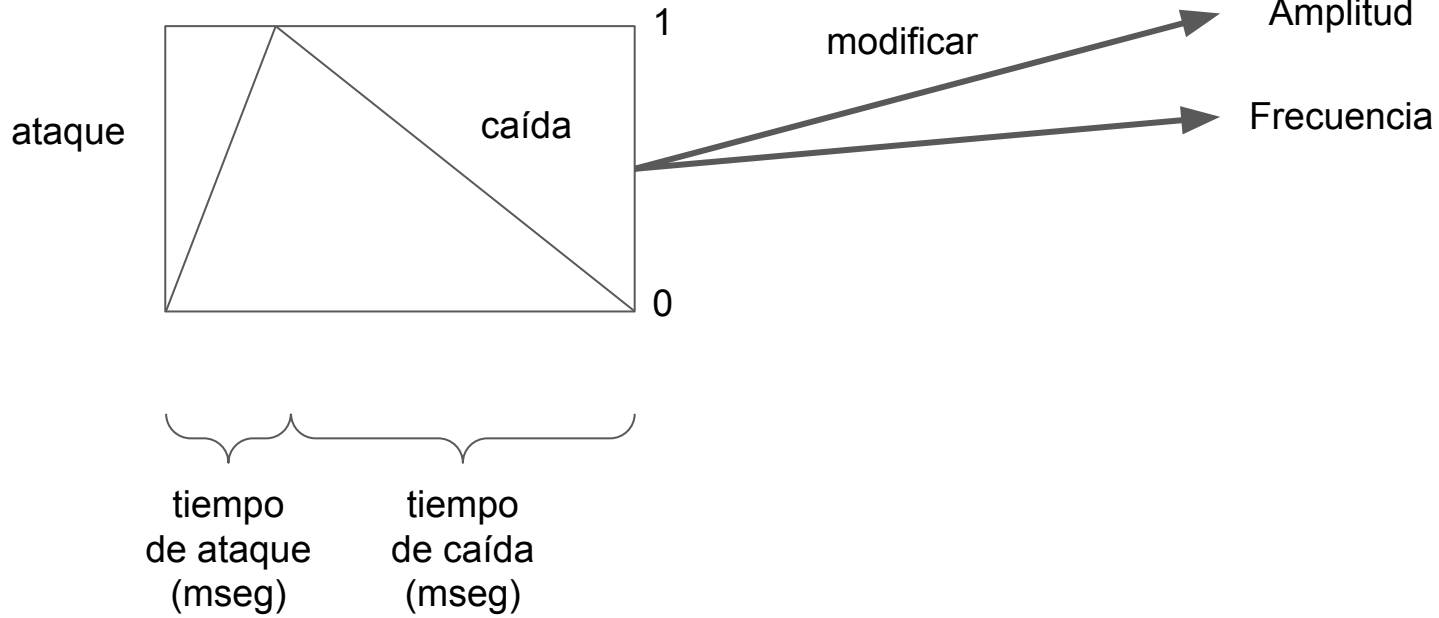
$$\text{Inc}_a = 1 / \text{Núm. muestras ataque}$$
$$\text{Inc}_c = 1 / \text{Núm. muestras caída}$$

$$\text{Núm. muestras ataque} = \text{tiempo de ataque} \times 44100$$
$$\text{Núm. muestras caída} = \text{tiempo de caída} \times 44100$$

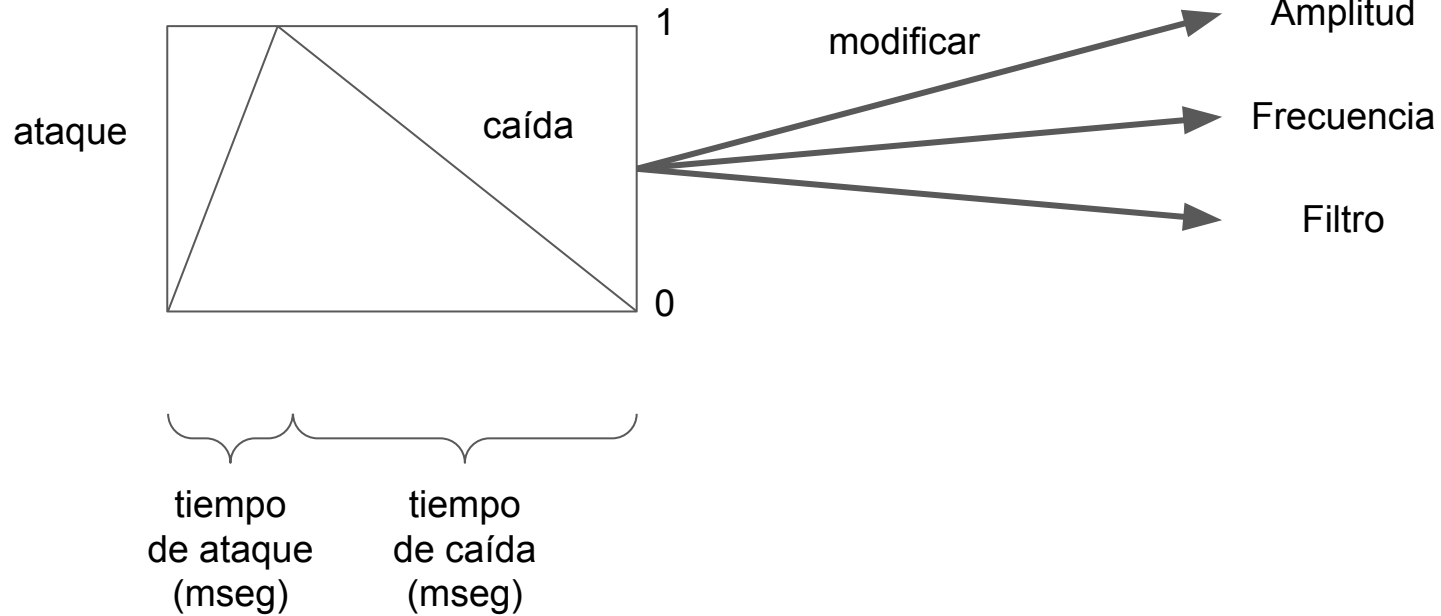
# Envolventes



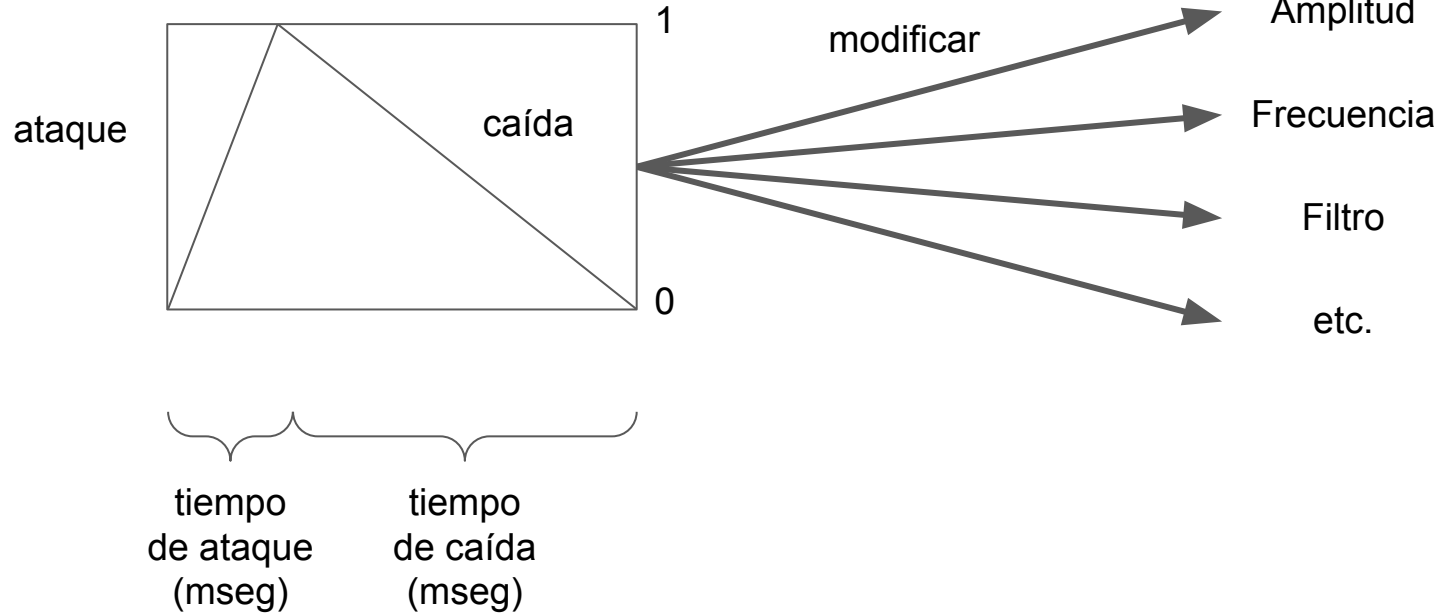
# Envolventes



# Envolventes



# Envolventes



# Contenidos

**Elementos de la síntesis musical**

**Muestreo**

**Osciladores**

**Envolventes**

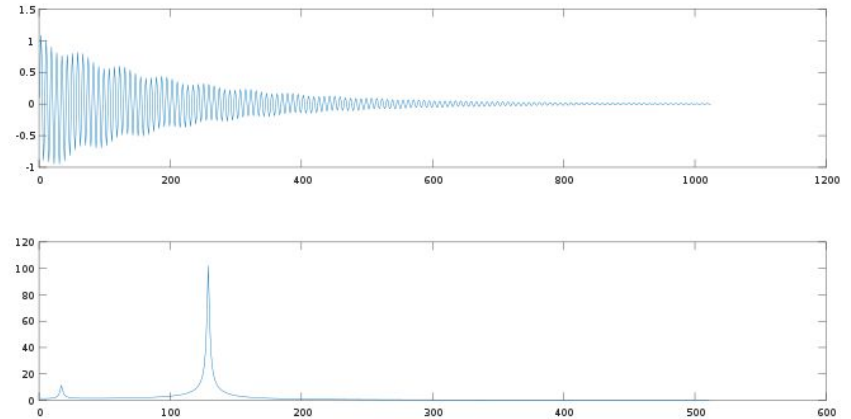
**Filtros**

**Efectos**

# Filtros

Cualquier señal puede ser definida como una **suma de señales sinusoidales**, cada una de ellas con su propia fase y amplitud.

Imagen: © “Benutzer:Drahkrub”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

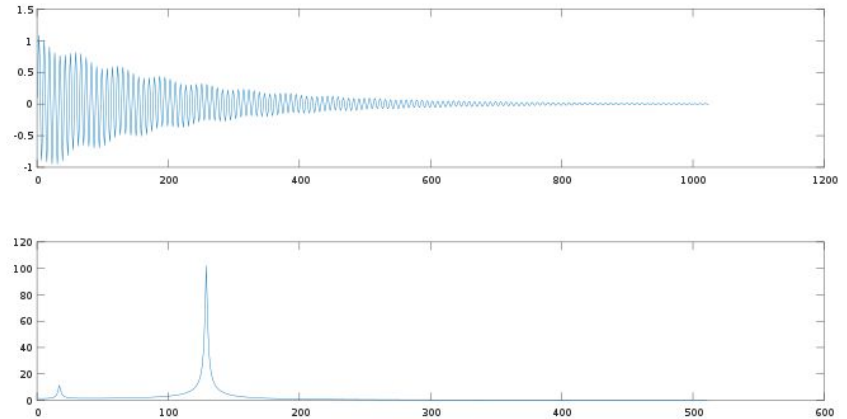


# Filtros

Imagen: © “Benutzer:Drahkrub”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

Cualquier señal puede ser definida como una **suma de señales sinusoidales**, cada una de ellas con su propia fase y amplitud.

Lo que mueve el cono del altavoz



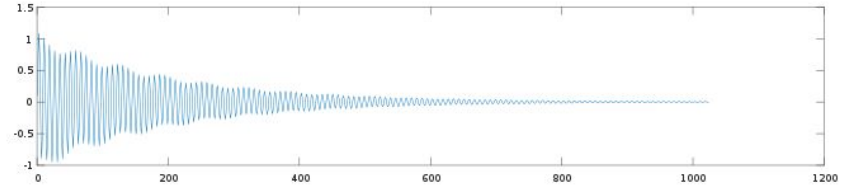


# Filtros

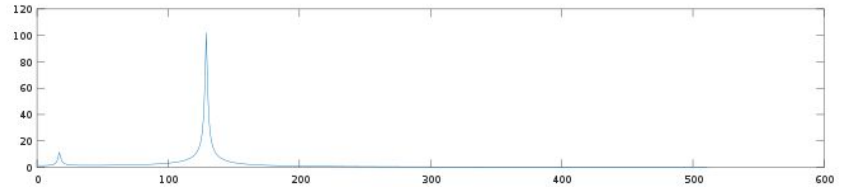
Imagen: © “Benutzer:Drahkrub”, wikimedia.org. Licencia CC-PD.

Cualquier señal puede ser definida como una **suma de señales sinusoidales**, cada una de ellas con su propia fase y amplitud.

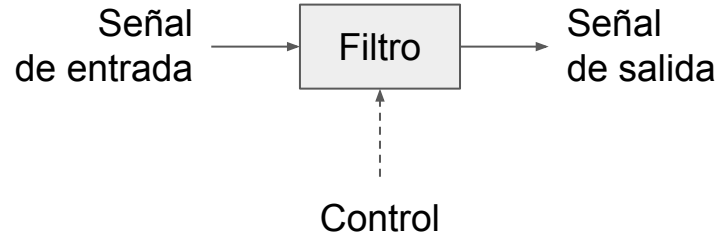
Lo que mueve el cono del altavoz



El **espectro**, los **armónicos** o las **frecuencias** de esa señal. Representa mejor lo que “percibimos”: un tono principal en torno a los 120 hercios y un tono muy tenue alrededor de los 20 hercios.

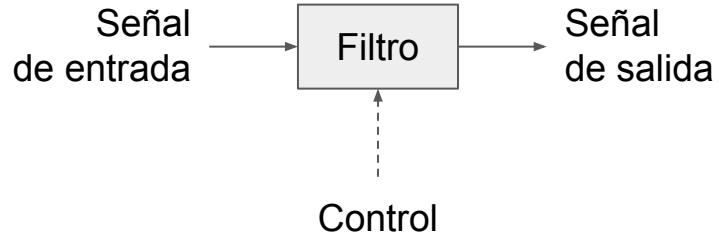


# Filtros



La señal de salida es la señal de entrada con el **espectro cambiado**.

# Filtros

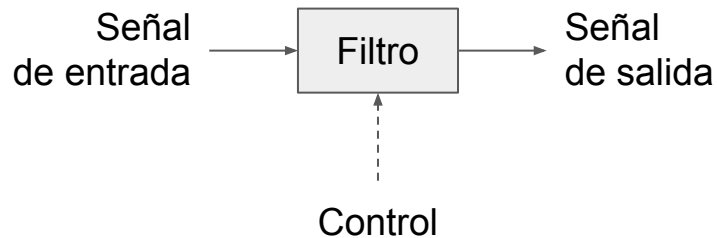


La señal de salida es la señal de entrada con el **espectro cambiado**.



¿Por qué hacer esto?

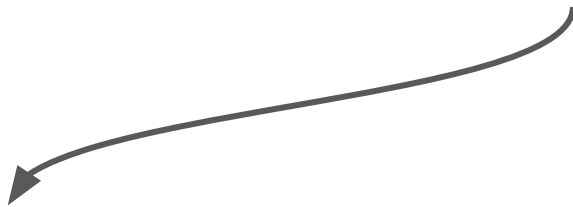
# Filtros



La señal de salida es la señal de entrada con el **espectro cambiado**.

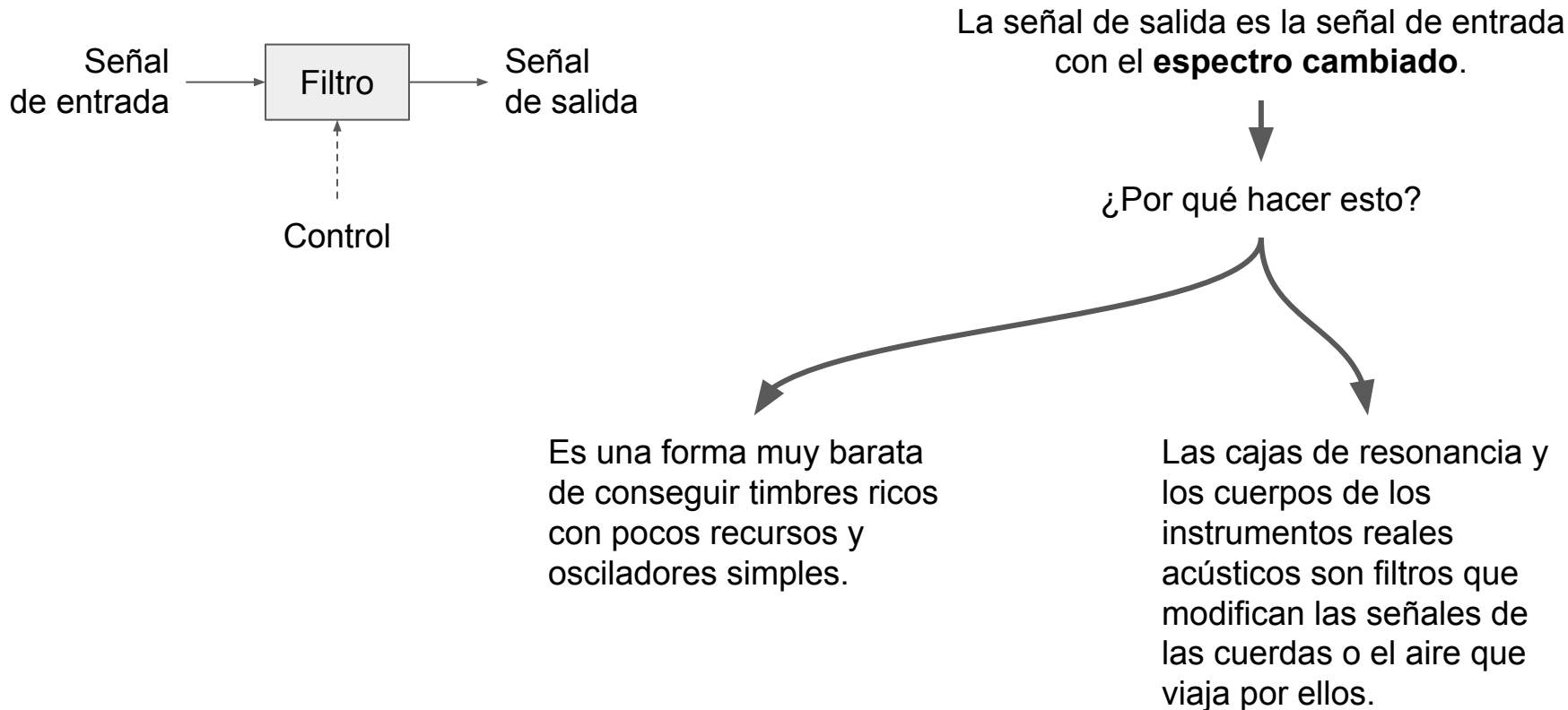


¿Por qué hacer esto?

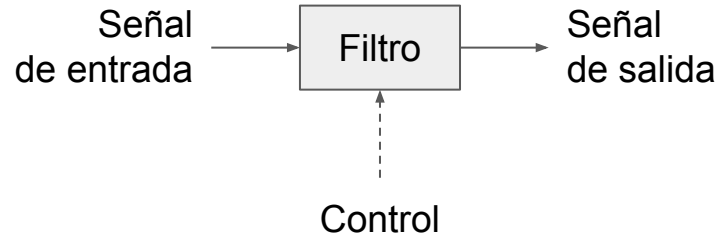


Es una forma muy barata de conseguir timbres ricos con pocos recursos y osciladores simples.

# Filtros

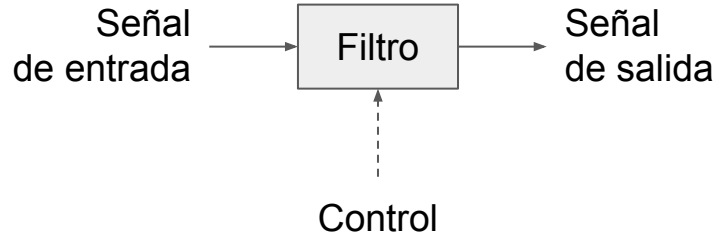


# Filtros



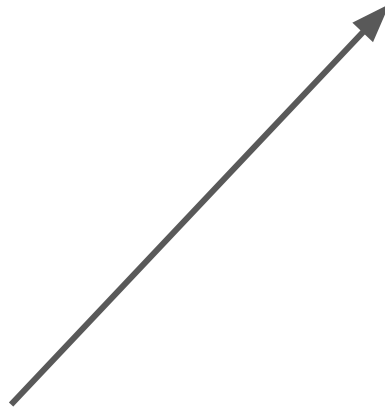
Formas de implementar un filtro

# Filtros

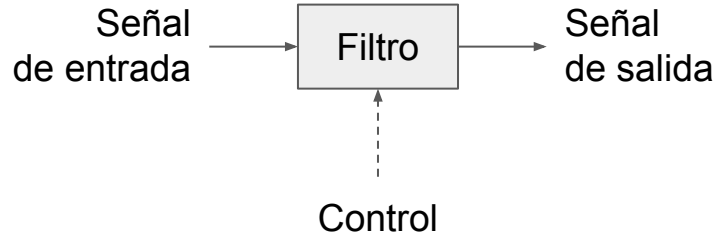


1. Calcular el espectro a partir de la señal.
2. Modificar el espectro.
3. Calcular la señal a partir del espectro modificado.

Formas de implementar un filtro



# Filtros



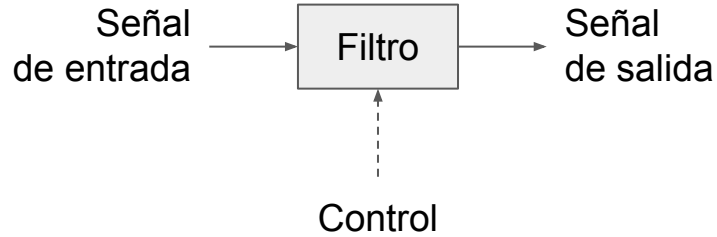
1. Calcular el espectro a partir de la señal.
2. Modificar el espectro.
3. Calcular la señal a partir del espectro modificado.

Formas de implementar un filtro

Aplicar una ecuación en diferencias finitas.



# Filtros



1. Calcular el espectro a partir de la señal.
2. Modificar el espectro.
3. Calcular la señal a partir del espectro modificado.

Formas de implementar un filtro

Aplicar una ecuación en diferencias finitas.

Por ejemplo:

- $salida = entrada\_actual + entrada\_anterior$
- $salida = entrada\_actual - entrada\_anterior$

# Filtros

Ejemplo 1:

**salida = entrada\_actual + entrada\_anterior**

# Filtros

Ejemplo 1:

**salida = entrada\_actual + entrada\_anterior**

Estamos “promediando” la entrada

# Filtros

Ejemplo 1:

**salida = entrada\_actual + entrada\_anterior**

Estamos “promediando” la entrada → Variaciones lentas de la entrada → Tienden a mantenerse.  
Variaciones rápidas de la entrada → Tienden a anularse.

# Filtros

Ejemplo 1:

**salida = entrada\_actual + entrada\_anterior**

Estamos “promediando” la entrada → Variaciones lentas de la entrada → Tienden a mantenerse.  
Variaciones rápidas de la entrada → Tienden a anularse.



Variaciones lentas = frecuencias bajas → mantener.  
Variaciones rápidas = frecuencias altas → anular.

# Filtros

Ejemplo 1:

**salida = entrada\_actual + entrada\_anterior**

Estamos “promediando” la entrada → Variaciones lentas de la entrada → Tienden a mantenerse.  
Variaciones rápidas de la entrada → Tienden a anularse.

↓  
Variaciones lentas = frecuencias bajas → mantener.  
Variaciones rápidas = frecuencias altas → anular.

↓  
Filtro **paso bajo**

# Filtros

Ejemplo 2:

**salida = entrada\_actual - entrada\_anterior**

# Filtros

Ejemplo 2:

**salida = entrada\_actual - entrada\_anterior**

Estamos “despromediando” la  
entrada



# Filtros

Ejemplo 2:

**salida = entrada\_actual - entrada\_anterior**

Estamos “despromediando” la  
entrada



Variaciones lentas de la entrada → Tienden a anularse.  
Variaciones rápidas de la entrada → Tienden a mantenerse.

# Filtros

Ejemplo 2:

**salida = entrada\_actual - entrada\_anterior**

Estamos “despromediando” la  
entrada



Variaciones lentas de la entrada → Tienden a anularse.  
Variaciones rápidas de la entrada → Tienden a mantenerse.



Variaciones lentas = frecuencias bajas → anular  
Variaciones rápidas = frecuencias altas → mantener

# Filtros

Ejemplo 2:

**salida = entrada\_actual - entrada\_anterior**

Estamos “despromediando” la  
entrada



Variaciones lentas de la entrada → Tienden a anularse.  
Variaciones rápidas de la entrada → Tienden a mantenerse.



Variaciones lentas = frecuencias bajas → anular  
Variaciones rápidas = frecuencias altas → mantener



Filtro **paso alto**

# Contenidos

**Elementos de la síntesis musical**

**Muestreo**

**Osciladores**

**Envolventes**

**Filtros**

**Efectos**

# Efectos

- Dar “cuerpo” al sonido (reforzar frecuencias, ecualizar, etc.).

# Efectos

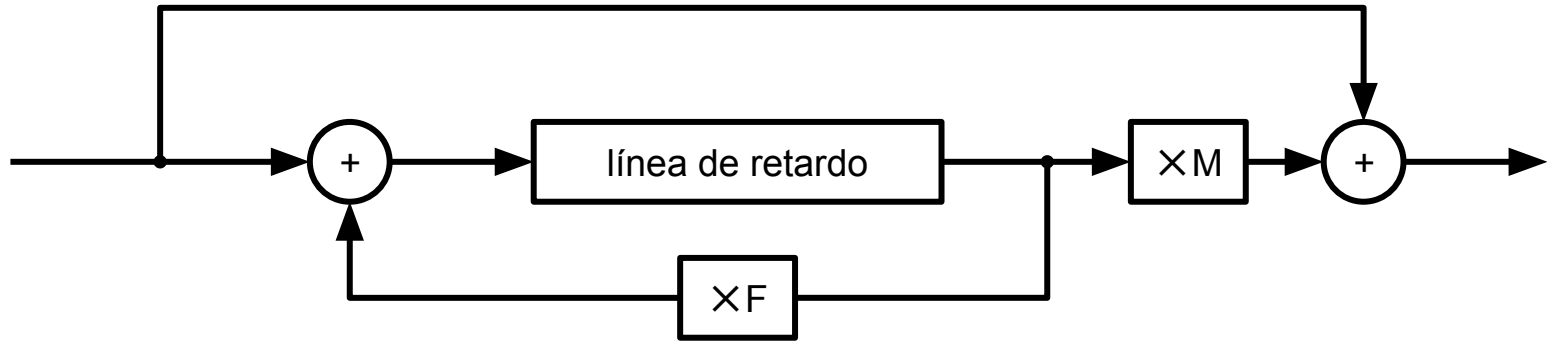
- Dar “cuerpo” al sonido (reforzar frecuencias, ecualizar, etc.).
- Dar “ambiente” (chorus, flange, delay, reverb, etc.).

# Efectos

- Dar “cuerpo” al sonido (reforzar frecuencias, ecualizar, etc.).
- Dar “ambiente” (chorus, flange, delay, reverb, etc.).
- Dar “dinámica”: compresión y expansión.

# Efectos

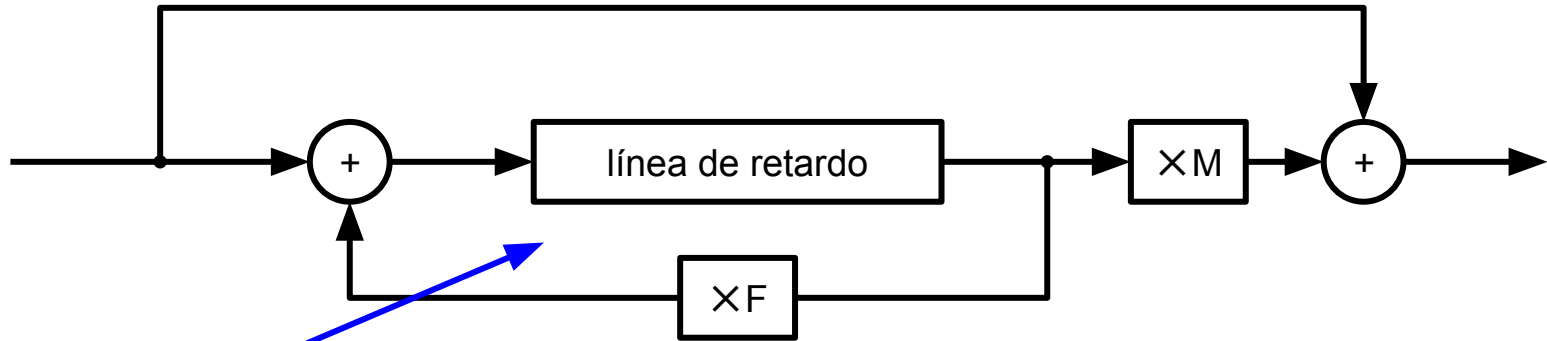
Efecto de eco o “delay”





# Efectos

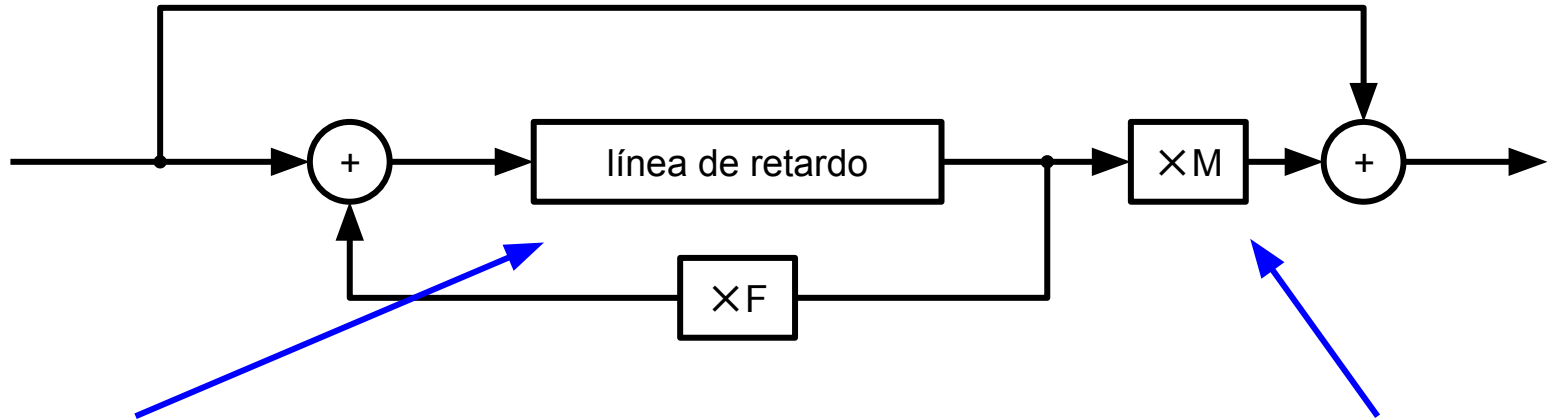
Efecto de eco o “delay”



Las muestras tardan varios  
cientos de milisegundos en  
atravesar la línea de  
retardo

# Efectos

Efecto de eco o “delay”

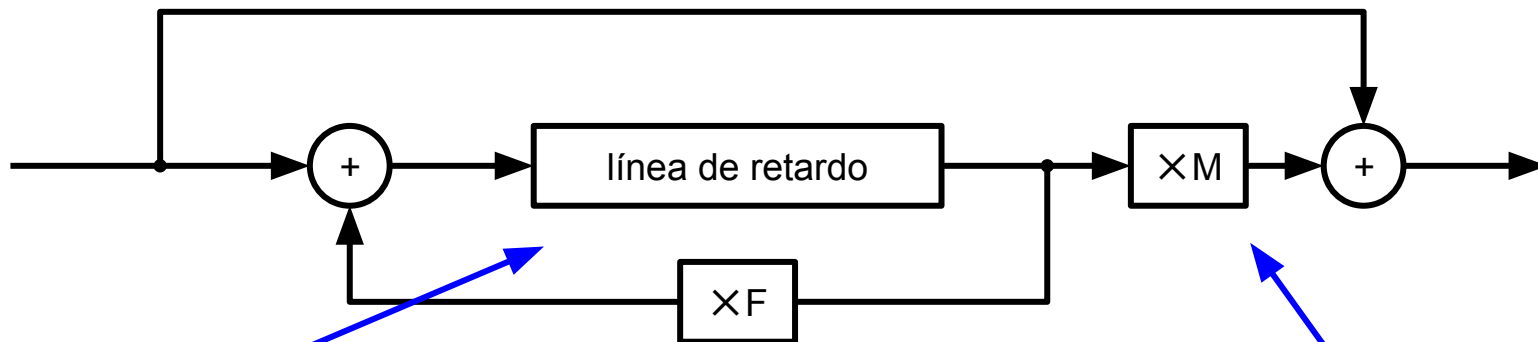


Las muestras tardan varios cientos de milisegundos en atravesar la línea de retardo

Nivel de mezcla

# Efectos

Efecto de eco o “delay”



Las muestras tardan varios cientos de milisegundos en atravesar la línea de retardo

Nivel de realimentación

Nivel de mezcla

# Gracias

<http://avelinoherrera.com>

TT/IG: @avelinohm

FB: Avelino Herrera Morales