

•
•
•
•
•
•
•
•
•
•

tema 6: zumbadores, altavoces y stereo CODECs

Diseño Automático de Sistemas

José Manuel Mendías Cuadros
Dpto. Arquitectura de Computadores y Automática
Universidad Complutense de Madrid

• • • • • • •

2

•

sonido y música (i)

- ☒ Un **sonido** es una onda longitudinal mecánica con una frecuencia comprendida entre 20 y 20000 Hz.
 - una onda longitudinal es aquella cuya dirección de propagación es igual a la de oscilación de las partículas que forman el medio donde se propaga.
 - un sonido es una vibración periódica de las partículas del aire que macroscópicamente se manifiesta como una variación periódica de la presión en un cierto punto.
- ☒ Magnitudes objetivas del sonido:
 - **Frecuencia:** número de vibraciones completas por unidad de tiempo.
 - **Amplitud:** valor máximo de la elongación de una vibración.
 - **Intensidad:** cantidad media de energía transportada por una onda, por unidad de superficie y tiempo. Es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda.
 - ⇒ dado el amplio intervalo de intensidades perceptibles, se utiliza una escala logarítmica relativa denominada *nivel de intensidad* que se expresa en decibelios.
- ☒ Magnitudes subjetivas del sonido:
 - **Sonoridad o volumen:** percepción humana de la intensidad, entre otros factores, depende de la amplitud y de la frecuencia de la onda.
 - **Tono:** percepción humana de la frecuencia de una onda, entre otros factores depende de la amplitud y de la frecuencia de la onda.
 - **Timbre:** percepción humana de la forma de la onda, es decir, del número, intensidad y distribución temporal de los armónicos que forman un sonido.

diseño automático de sistemas

• • • • • • •

sonido y música (ii)

☒ Tipos de sonidos:

- **Nota musical pura:** onda sinusoidal de frecuencia y amplitud definidas.
- **Nota musical real:** onda formada por la superposición de un número relativamente pequeño de notas puras (la fundamental y los armónicos), de frecuencias relacionadas y amplitudes diferentes.
- **Ruido:** onda formada por la superposición de un gran número de ondas de frecuencias y amplitudes no relacionadas.

☒ Una **composición musical** es una sucesión de una o varias notas simultáneas, donde las frecuencias fundamentales de las notas y sus duraciones guardan una relación simple entre sí.

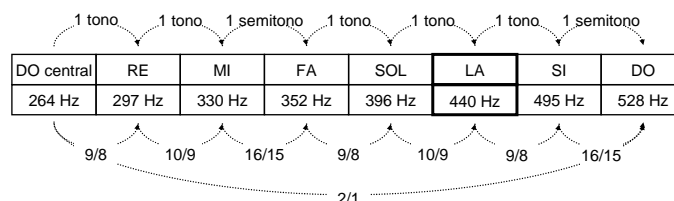
- La relación de frecuencias permite clasificar las notas por escalas y por octavas, y permite determinar cuando una cierta composición es armoniosa.
- La duración de las notas habitualmente suele guardar una relación 2/1
 - ⇒ una redonda dura el doble que una blanca
 - ⇒ una blanca dura el doble que una negra (o la mitad de una redonda)
 - ⇒ una negra dura el doble que una corchea (o la mitad de una blanca)
- Esta relación entre las duraciones permite agruparlas en compases.
- Los conceptos subjetivos asociados respectivamente a la relación entre frecuencias y a la relación entre duraciones, se llaman **armonía** y **rítmico**.

sonido y música (iii)

☒ Una **escala diatónica exacta** es aquella que incluye las 8 notas (octava) que forman los 3 acordes mayores:

- Un acorde mayor está formado por 3 notas (primera, tercera y quinta) cuyas frecuencias guardan una relación de 4/4, 5/4 y 6/4.
- La relación entre las frecuencias de la misma nota en octavas consecutivas es 2/1.
- Conociendo las frecuencias relativas de las notas, basta fijar la frecuencia absoluta de una de ellas para determinar la frecuencia absoluta de las demás.
- Por convenio internacional la frecuencia del LA que se encuentra a la derecha del DO central del piano es de 440 Hz.
- Algunas notas difieren entre sí 1 tono (cuando la relación entre sus frecuencias es 9/8 o 10/9) ó 1 semitono (cuando la relación entre sus frecuencias es 16/15)

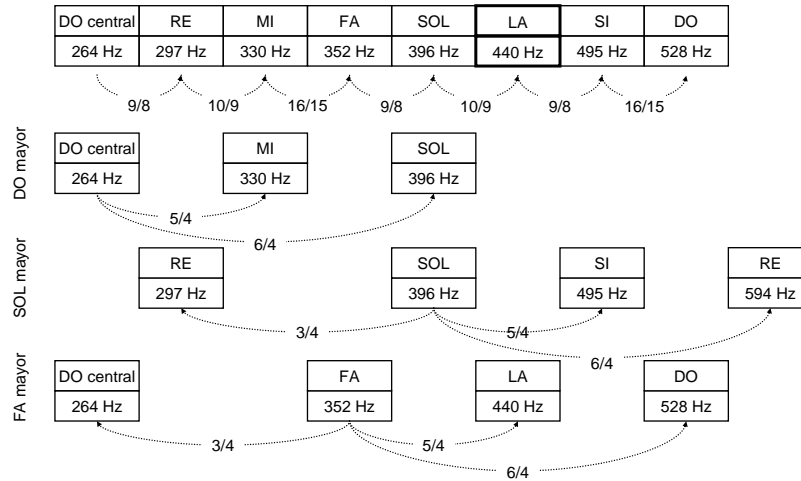
Escala diatónica exacta en DO mayor



sonido y música (iv)

Construcción de la escala diatónica exacta en DO mayor

© J.M. Mendias, 2001



diseño automático de sistemas

sonido y música (v)

- ☒ Si se construyese una escala diatónica exacta partiendo de RE serían necesarias nuevas notas con frecuencias diferentes a las de la escala exacta en DO mayor.
 - Si tuvieran que disponerse sonidos para todas las posibles claves musicales se precisarían muchas notas diferentes por octava.

- ☒ Una **escala uniformemente temperada** incluye 13 notas por octava cuyas frecuencias están uniformemente espaciadas

- cualesquiera 2 notas consecutivas difieren entre sí en un semitono, y sus frecuencias siempre guardan una relación de $\sqrt[12]{2}$
- Este hecho permite calcular la frecuencia absoluta de cualquier nota a partir de la frecuencia de una de ellas según la fórmula

$$f_{\text{nota}} = f_{\text{LA}} \cdot \sqrt[12]{2^n} = 440 \cdot \sqrt[12]{2^n} \approx 440 \cdot 1.06^n$$

donde n es el número de notas de separación respecto del LA (negativo hacia la izquierda).

© J.M. Mendias, 2001

DO#	RE#	FA#	SOL#	LA#
277.2 Hz	311.1 Hz	370.0 Hz	415.3 Hz	466.2 Hz

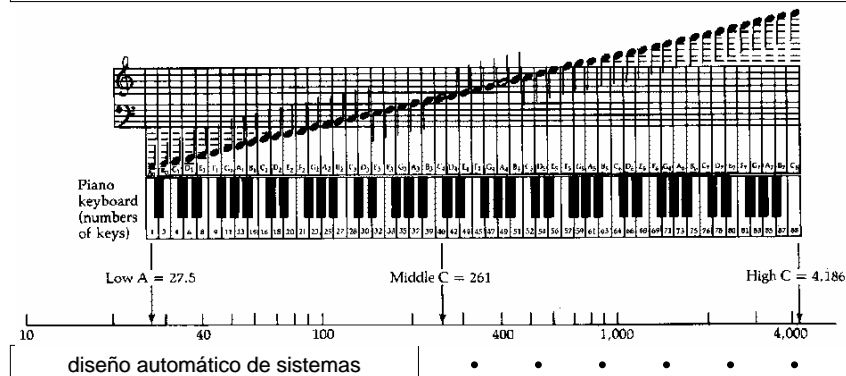
DO central	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
261.6 Hz	293.7 Hz	329.6 Hz	349.2 Hz	392.0 Hz	440 Hz	493.9 Hz	523.3 Hz

diseño automático de sistemas

sonido y música (v)

- ☒ La diferencia fundamental entre la escala exacta y la uniformemente temperada, es que mientras la primera se acomoda mejor a las preferencias del oído, la segunda es más práctica.
 - Una pieza musical compuesta en una cierta tonalidad, suena mejor (más armoniosamente) cuando la frecuencia de las notas se ajusta a la escala exacta.
 - Sin embargo, una pieza musical suena relativamente bien, independientemente de la tonalidad para la que haya sido compuesta, cuando la frecuencia de las notas se ajusta a la escala uniformemente temperada.
 - Los instrumentos musicales típicamente están ajustados según la segunda escala.

© J.M. Méndias, 2001



diseño automático de sistemas

generación digital de sonido (i)

- ☒ Un sistema digital puede generar sonidos a través de un altavoz.
- ☒ Un **altavoz**, es un transductor capaz de generar una onda sonora análoga (en frecuencia y amplitud) a una señal eléctrica dada.
- ☒ Se compone de una membrana elástica unida a una bobina móvil que se monta dentro del campo magnético de un imán permanente.
 - La fuerza de atracción entre la bobina y el imán es función de la intensidad y el sentido de la corriente que circule por la bobina.
 - Cambios en la corriente, provocan movimientos en la bobina que se traducen en vibraciones de la membrana. Si estas vibraciones tienen la frecuencia adecuada, se escucha un sonido.
- ☒ Dado que un sistema digital puede generar una señal digital periódica a través de uno de sus pines, puede producir sonidos si dicho pin se conecta un altavoz.
 - Si se desea generar un sonido complejo, se debe generar por separado cada uno de sus armónicos y sumarlos para generar una única señal.
- ☒ Un **zumbador** es un pequeño altavoz conectado a un oscilador de frecuencia fija.
 - desde un sistema digital solo puede controlarse si suena o no

© J.M. Méndias, 2001



diseño automático de sistemas

generación digital de sonido (ii)
--



generación digital de sonido (iii)

- ⊗ Diseñar un **generador de sonidos programable**, capaz de generar las 84 notas que forman las 7 octavas centrales del piano:
- **note**: indica la nota a generar (silencio, DO, RE, MI ... SI)
 - **sharp**: indica si la nota es natural o sostenida .
 - **octave**: indica la octava a la que pertenece la nota (numerada de izquierda a derecha: DO central pertenece a la 4ª octava)
 - **newNote**: señal de strobe.



generación digital de sonido (iv)

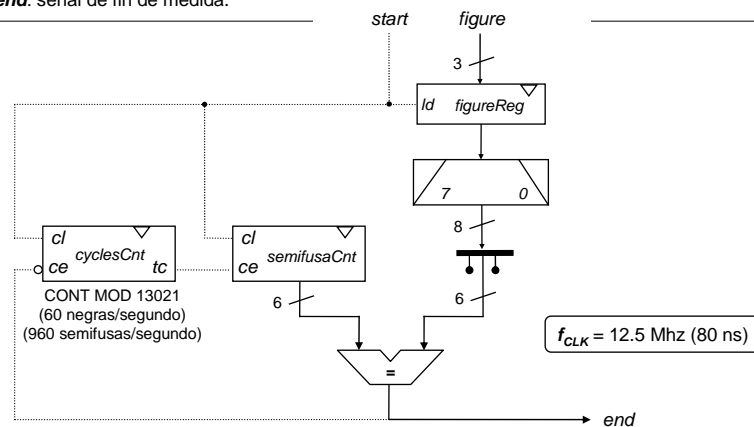
- ☒ Para generar 84 sonidos diferentes sería necesario una tabla conteniendo la duración en ciclos del periodo (o semiperiodo) de cada nota,
- Sin embargo, como la relación entre las frecuencias de la misma nota en octavas diferentes es múltiplo de 2, nos basta con 2 tablas de 8 entradas (una para notas naturales y otra para notas sostenidas) y un desplazador.

tabla de notas (se selecciona cuando sharp = 0)				tabla de notas# (se selecciona cuando sharp = 1)			
note	nota (7ª octava)	frecuencia (Hz)	1/2 periodo (ciclos)	note	nota (7ª octava)	frecuencia (Hz)	1/2 periodo (ciclos)
000	silencio	0	0	000	silencio	0	0
001	DO	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-9}}$	2986	001	DO#	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-8}}$	2819
010	RE	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-7}}$	2660	010	RE#	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-6}}$	2511
011	MI	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-5}}$	2370	011	MI#FA	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-4}}$	2237
100	FA	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-4}}$	2237	100	FA#	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-3}}$	2112
101	SOL	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-2}}$	1993	101	SOL#	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^{-1}}$	1881
110	LA	3520	1776	110	LA#	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^1}$	1676
111	SI	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^2}$	1582	111	SI#DO	$3520 \cdot \sqrt[12]{2^3}$	1493

diseño automático de sistemas

generación digital de sonido (v)

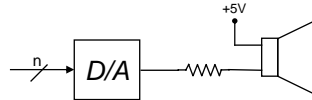
- ☒ Diseñar un **metrónomo programable**, capaz de medir las 7 duraciones de nota posibles:
- **figure**: indica la duración a generar (silencio, semifusa, fusa, ..., redonda)
 - **start**: señal de strobe.
 - **end**: señal de fin de medida.



diseño automático de sistemas

generación digital de sonido (vi)

- ☒ Con una única salida digital oscilando entre 0 y 1, sólo se pueden generar ondas cuadradas que varíen entre 2 niveles eléctricos.
 - por lo que un sistema digital sólo puede controlar el tono (frecuencia) del sonido, pero no el volumen (amplitud) ni el timbre (forma) del mismo.
 - para poder generar ondas con mayor riqueza es necesario disponer de un conversor digital/analógico.



- ☒ Un **audio CODEC** es un conversor analógico/digital y digital/analógico especializado en el muestreo y generación de señales dentro del rango de frecuencias audibles.
 - Las señales que muestrea son señales eléctricas analógicas generadas a partir de ondas sonoras captadas por un micrófono, o generadas por un sistema de audio.
 - Las señales que genera son señales eléctricas analógicas que pueden transformarse en ondas sonoras a través de un altavoz, o ser procesadas por un sistema de audio.
- ☒ Elementos de un CODEC:
 - **número de canales:** número de señales que es capaz de muestrear/generar simultáneamente. CODECs mono (1 canal), CODECs estéreo (2 canales).
 - **resolución:** núm. de bits usados para codificar el valor de la muestra (amplitud de la onda).
 - **período de muestreo:** intervalo que transcurre entre 2 muestras consecutivas.

diseño automático de sistemas

• • • • • • • •

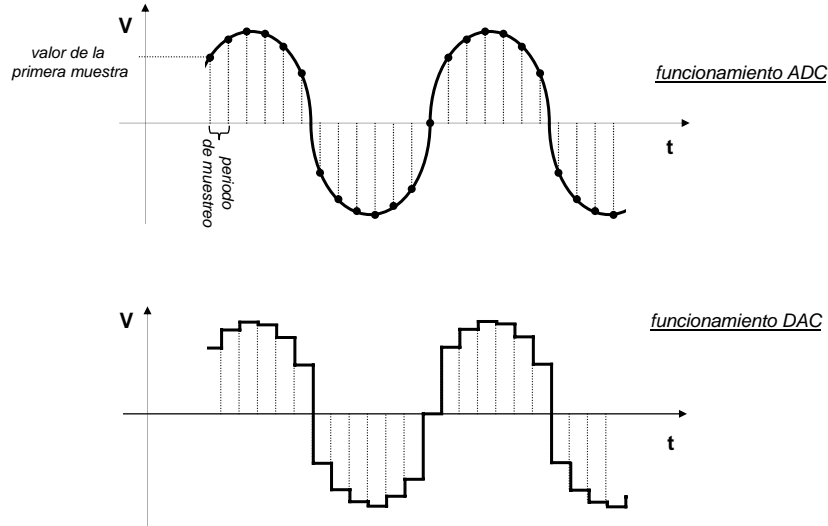
audio CODEC AK4520A: funcionamiento (i)

- ☒ **AK4520A** es un audio CODEC estéreo de 20 bits de resolución, con frecuencia de muestreo configurable en el rango de 16KHz a 54 KHz y transmisión serie síncrona de muestras.
- ☒ **Funcionamiento del ADC** (conversor analógico-digital):
 - Muestrea simultáneamente a una frecuencia configurable f_s , las dos entradas analógicas que tiene por canal (AINL+, AINL-) y (AINR+, AINR-).
 - Digitaliza y formatea las muestras según el valor de las entradas (DIF1, DIF0).
 - Transmite las muestras digitales en serie a través del puerto *STDO*.
- ☒ **Funcionamiento del DAC** (conversor digital-analógico)
 - Recibe en serie las muestras digitales a través del puerto *STDI*.
 - Interpreta las muestras según el formato indicado por el valor de las entradas (DIF1, DIF0).
 - Convierte las muestras en valores analógicos que enviará por los puertos (AOUTL y AOUTR).
- ☒ Su funcionamiento se controla por medio de 3 señales de reloj:
 - **MCLK:** determina la frecuencia de muestreo f_s .
 - **LRCK:** determina la muestra (izquierda o derecha) que se está transmitiendo a través del puerto serie *STDO*.
 - **SCLK:** sincroniza la transferencia serie de cada uno de los bits de la muestra.

diseño automático de sistemas

• • • • • • • •

audio CODEC AK4520A: funcionamiento (ii)

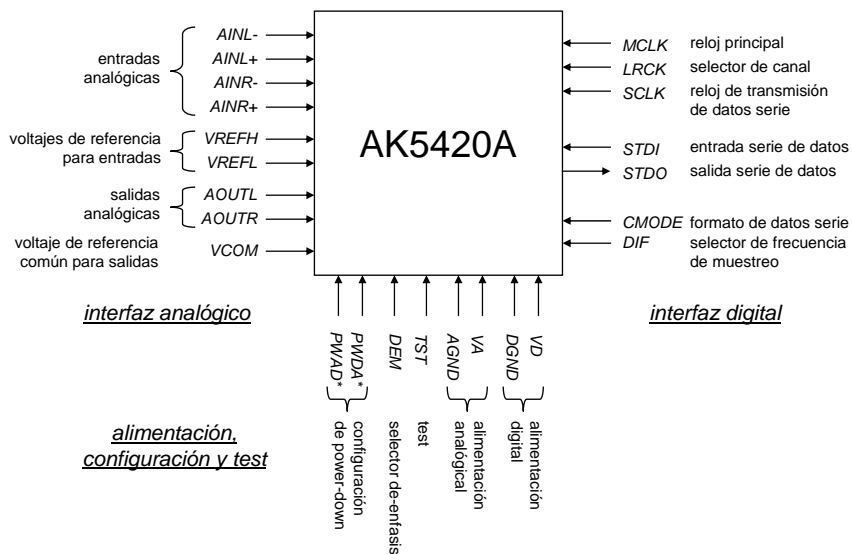


© J.M. Mendias, 2001

diseño automático de sistemas

• • • • • • •

audio CODEC AK4520A: pinout (ii)



© J.M. Mendias, 2001

diseño automático de sistemas

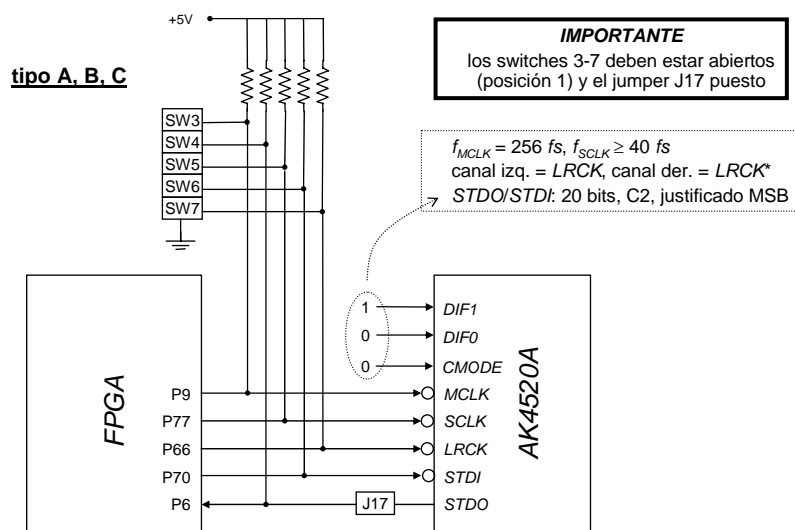
• • • • • • •

audio CODEC AK4520A: configuración (iii)

- ☒ **CMODE**, determina la relación entre la frecuencia de muestreo, f_s , y la frecuencia del reloj principal f_{MCLK}
- $CMODE = 0$: $f_{MCLK} = 256 f_s$
 - $CMODE = 1$: $f_{MCLK} = 384 f_s$
- ☒ **DIF**, determina el formato de transmisión serie de la muestra digital. Las muestras son enteros con signo codificados en C2.
- DIF = (00): canal izq. = LRCK, canal der. = LRCK*, $f_{SCLK} \geq 32 f_s$
 - ⇒ STDO: 20 bits, justificado MSB
 - ⇒ STD1: 16 bits, justificado LSB
 - DIF = (01): canal izq. = LRCK, canal der. = LRCK*, $f_{SCLK} \geq 40 f_s$
 - ⇒ STDO: 20 bits, justificado MSB
 - ⇒ STD1: 20 bits, justificado LSB
 - DIF = (10): canal izq. = LRCK, canal der. = LRCK*, $f_{SCLK} \geq 40 f_s$
 - ⇒ STDO: 20 bits, justificado MSB
 - ⇒ STD1: 20 bits, justificado MSB
 - DIF = (11): canal izq. = LRCK*, canal der. = LRCK, $f_{SCLK} = 32 f_s$ ó $f_{SCLK} \geq 40 f_s$
 - ⇒ STDO: IIS (I2S)
 - ⇒ STD1: IIS (I2S)

diseño automático de sistemas

AK4520A en las placas de prototipado (i)

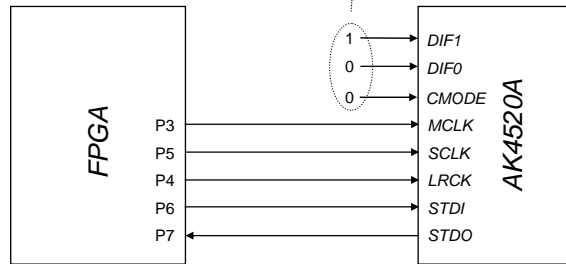


diseño automático de sistemas

AK4520A en las placas de prototipado (ii)

tipo D

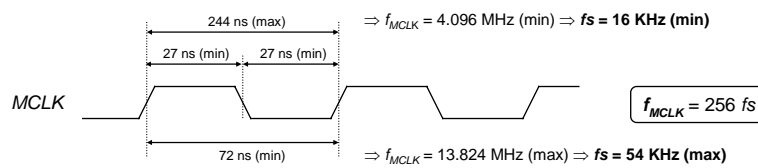
$f_{MCLK} = 256 \text{ fs}$, $f_{SCLK} \geq 40 \text{ fs}$
 canal izq. = LRCK, canal der. = LRCK*
 → STDO/STDI: 20 bits, C2, justificado MSB



© J.M. Mendias, 2001

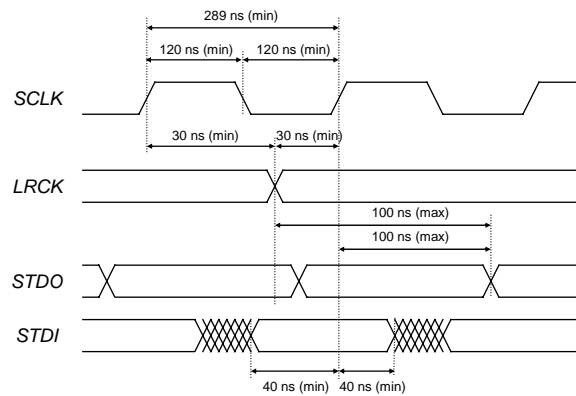
diseño automático de sistemas

audio CODEC AK4520A: temporización (i)



$f_{SCLK} \geq 40 \text{ fs} = 40 f_{MCLK} / 256$
 $f_{SCLK} = 64 \text{ fs} = f_{MCLK} / 4$ (típico)

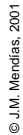
$f_{LRCK} = f_s$
 ciclo de trabajo 45-55%



© J.M. Mendias, 2001

diseño automático de sistemas

audio CODEC AK4520A: temporización (i)

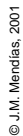


• • • • •

control del audio CODEC AK4520A (i)

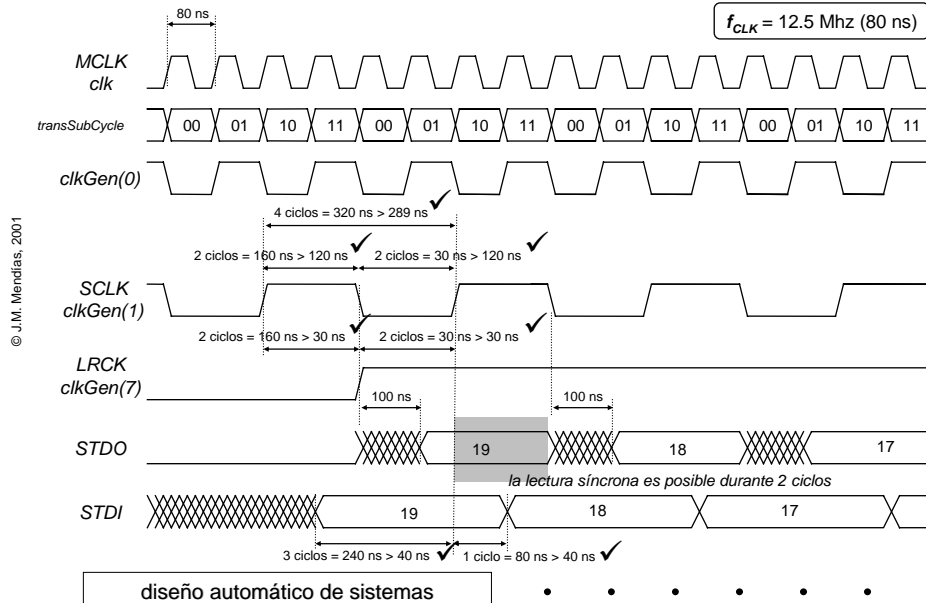
Selección y generación de frecuencias

- ☒ Selección de f_{MCLK}
 - $f_{MCLK} = f_{CLK} = 12.5 \text{ MHz} \Rightarrow fs = f_{MCLK} \div 256 = 48.828 \text{ KHz}$
 - $13.824 \text{ Mhz} \geq f_{MCLK} \geq 4.096 \text{ MHz} \checkmark$
 - ☒ Selección de f_{SCLK}
 - $f_{SCLK} = 64 fs \geq 40 fs \checkmark$
 - $f_{SCLK} = 64 fs \Rightarrow f_{SCLK} = f_{CLK} \div 4$
 - ☒ Selección de f_{LRCK}
 - $f_{LRCK} = fs \Rightarrow f_{LRCK} = f_{CLK} \div 256$



• • • • •

control del audio CODEC AK4520A (ii)

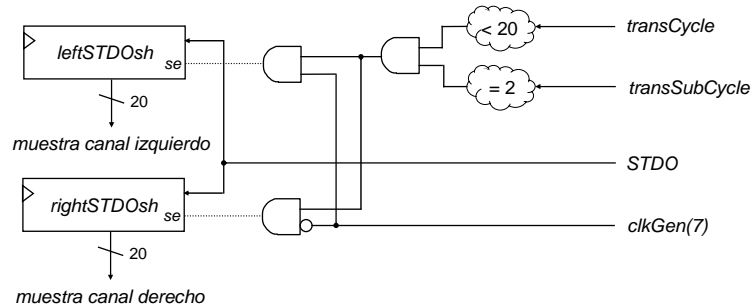


control del audio CODEC AK4520A (iii)

Receptor de muestras

- ☒ La conversión serie/paralelo requiere 2 registros de desplazamiento de 20 bits (uno por canal), cada uno de los cuales deberá desplazar cuando:
- STDO esté transmitiendo los datos correspondientes a su canal:
 - ⇒ $clkGen(7) = '1'$ para canal izquierdo, $clkGen(7) = '0'$ para canal derecho
 - STDO esté transmitiendo datos válidos, es decir pertenecientes a la muestra en curso:
 - ⇒ $transCycle < 20$
 - los datos que transmite STDO estén estabilizados:
 - ⇒ $transSubCycle = 2$ (podría ser también $transSubCycle = 3$)

© J.M. Mendias, 2001



diseño automático de sistemas

control del audio CODEC AK4520A (iv)

Transmisor de muestras

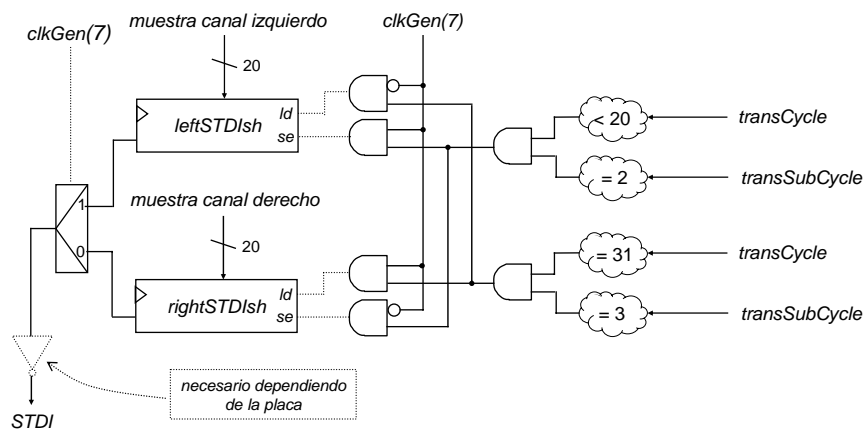
- ☒ La conversión paralelo/serie también requiere 2 registros de desplazamiento de 20 bits (uno por canal).
- ☒ Cada uno de estos registros deberá desplazar cuando:
 - por *STDl* se deban transmitir los datos correspondientes a su canal:
 - ⇒ $clkGen(7) = '1'$ para canal izquierdo, $clkGen(7) = '0'$ para canal derecho
 - por *STDl* se deban transmitir datos válidos, es decir pertenecientes a la muestra en curso:
 - ⇒ $transCycle < 20$
 - de manera que los datos que transmite *STDl* estén estabilizados con antelación suficiente:
 - ⇒ $transSubCycle = 2$
- ☒ Cada uno de estos registros deberá cargar un nuevo dato en algún instante anterior al comienzo de su transmisión, en particular en el último ciclo de reloj del intervalo de transmisión de datos correspondientes al canal contrario:
 - para canal izquierdo cuando:
 - ⇒ $clkGen(7) = '0'$ y $transCycle = 31$ y $transSubCycle = 3$
 - para canal derecho cuando:
 - ⇒ $clkGen(7) = '1'$ y $transCycle = 31$ y $transSubCycle = 3$
- ☒ Los valores a transmitir por la línea *STDl* se obtendrán multiplexando (según el valor de $clkGen(7)$) las salidas serie de los registros de desplazamiento.

diseño automático de sistemas

• • • • •

control del audio CODEC AK4520A (v)

Transmisor de muestras (cont.)

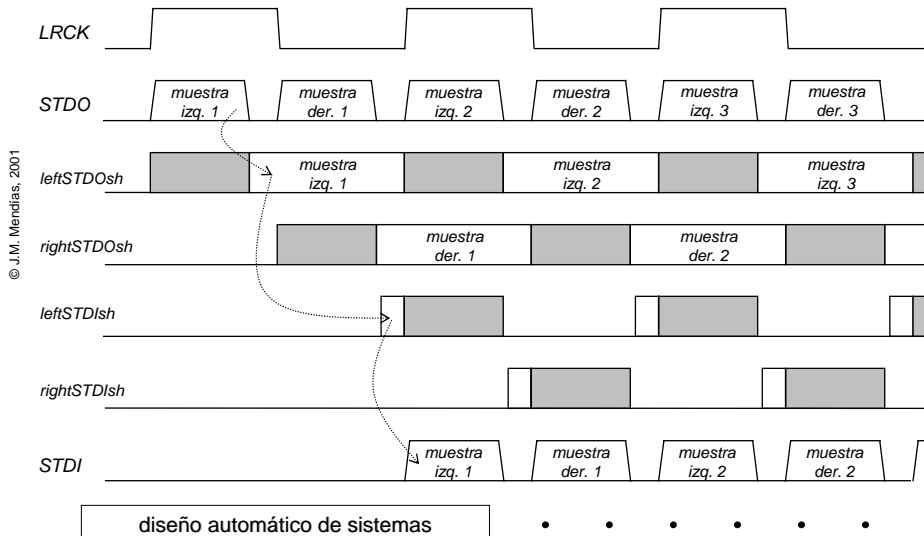


diseño automático de sistemas

• • • • •

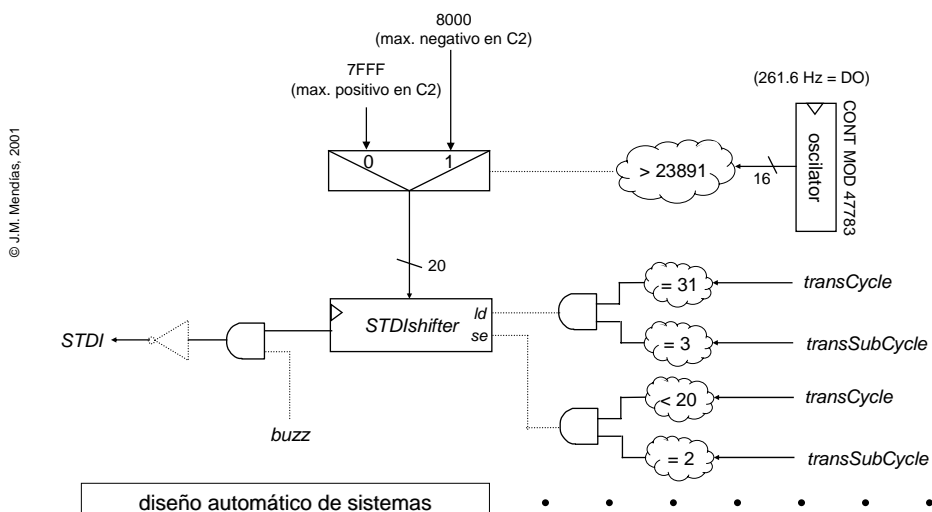
control del audio CODEC AK4520A (vi)

Conectando directamente *leftSTDOSH* a *leftSTDISH* y *rightSTDOSH* a *rightSTDISH* es posible hacer un puente digital estéreo de audio



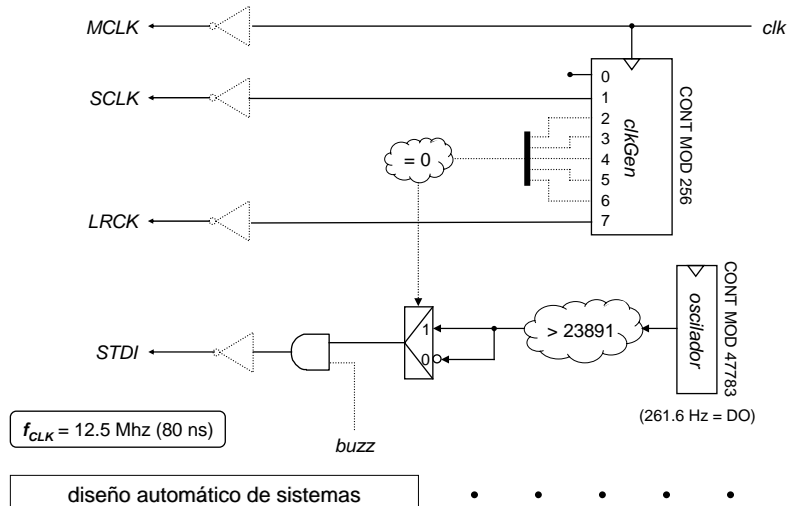
control del audio CODEC AK4520A (vi)

- ☒ Diseñar un zumbador usando como dispositivo de salida un audio CODEC.
 ➤ **buzz**: cuando vale 1 genera un DO.

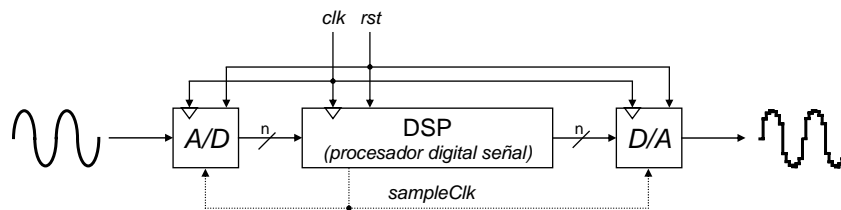


control del audio CODEC AK4520A (vii)

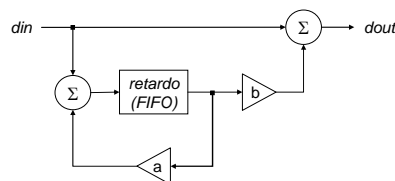
☒ Dado que sólo se transmiten 2 valores diferentes, el diseño se puede simplificar eliminando el desplazador.



procesado digital de señal (i)



circuito de eco digital



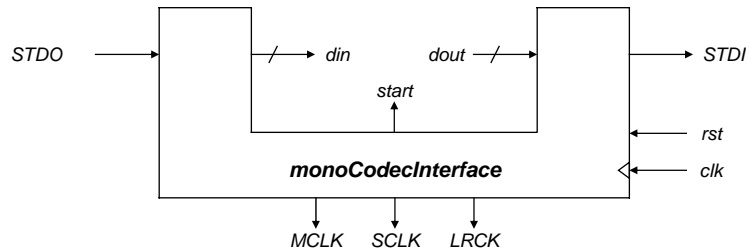
simulación digital de eco

- pared situada a 100 m del emisor
- velocidad sonido: 340 m/s
- frecuencia de muestreo: 48.828 KHz.
- retardo = $200 / 340 = 0.59$ s
- capacidad FIFO: $0.59 \times 48828 = 28722$ muestras
- $a < 1$ (factor de realimentación < 1)

diseño automático de sistemas

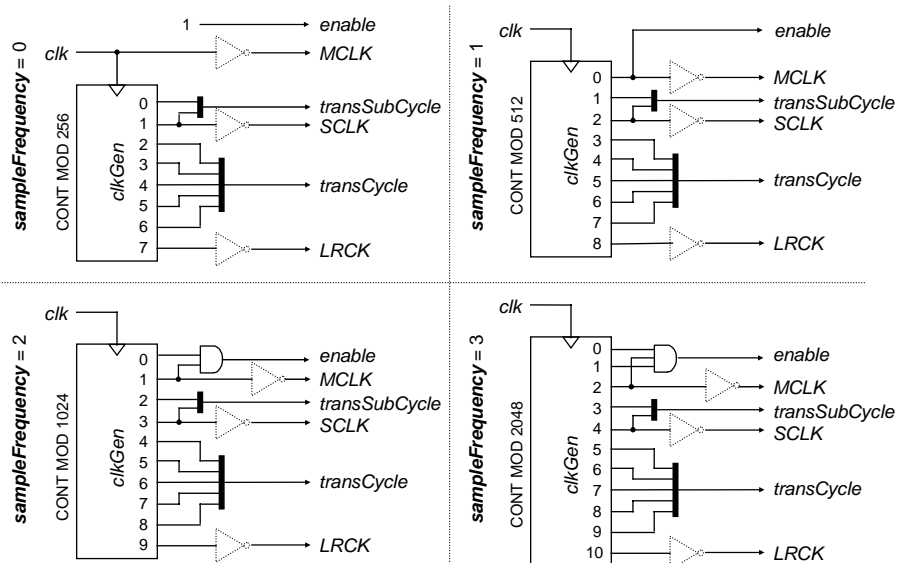
procesado digital de señal (ii)

- ☒ Diseñar un interfaz monocal, parametrizable, orientado a DSP, con un audio CODEC (AK4520A).
 - **wordLength**: anchura de la muestra (de 20 a 1 bits, truncando los menos significativos).
 - **sampleFrequency**: frecuencia de muestreo
 - ⇒ 0: 48.828 KHz, 1: 24.414 KHz, 2: 12.207 KHz, 3: 6.103 KHz, 4: 3.051 KHz
 - **channel**: canal usado
 - ⇒ 0: izquierdo, 1: derecho
- ☒ El interfaz debe usar un protocolo tipo strobe sin espera
 - el tiempo de cálculo máximo del DSP que lo utilice estará relacionado con f_{CLK} y los parámetros *sampleFrequency* y *wordLength*.



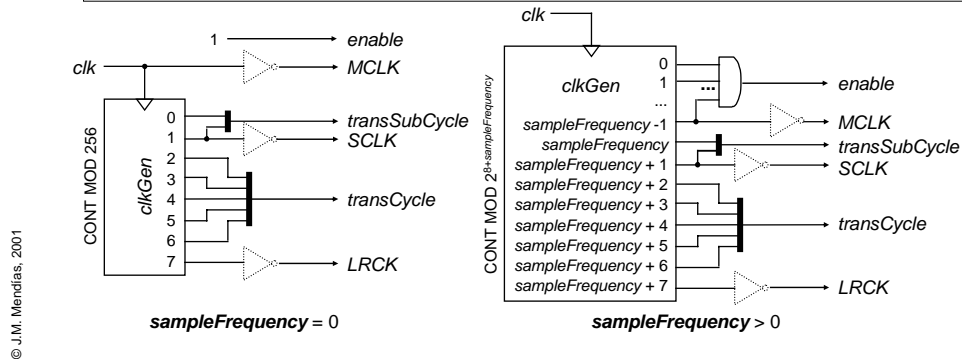
diseño automático de sistemas

procesado digital de señal (iii)



diseño automático de sistemas

procesado digital de señal (iv)



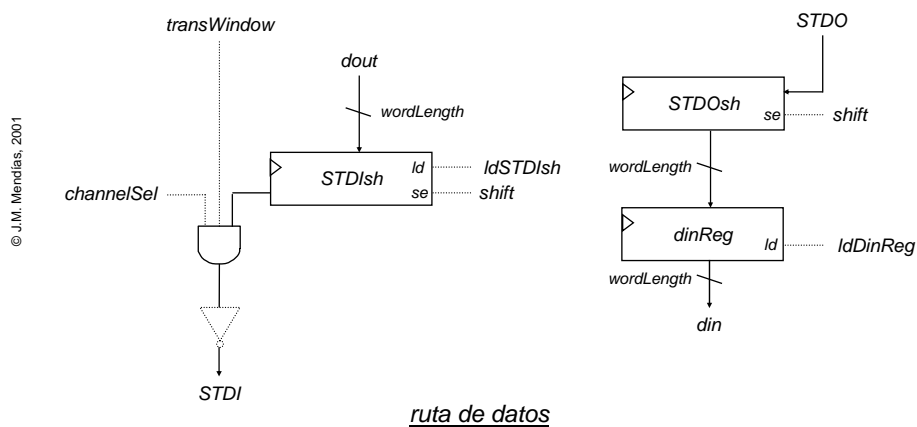
- ⊗ SampleFrequency = 0
 - tiempo cálculo = $256 - 4 \cdot \text{wordLength} \Rightarrow$ tiempo cálculo min. = $256 - 4 \cdot 20 = 248$ ciclos
- ⊗ SampleFrequency = 1
 - tiempo cálculo = $512 - 8 \cdot \text{wordLength} \Rightarrow$ tiempo cálculo min. = $512 - 8 \cdot 20 = 352$ ciclos

$$\text{tiempo cálculo} = 2^{8+\text{sampleFrequency}} - \text{wordLength} \cdot 2^{2+\text{sampleFrequency}}$$

diseño automático de sistemas

• • • • •

procesado digital de señal (v)

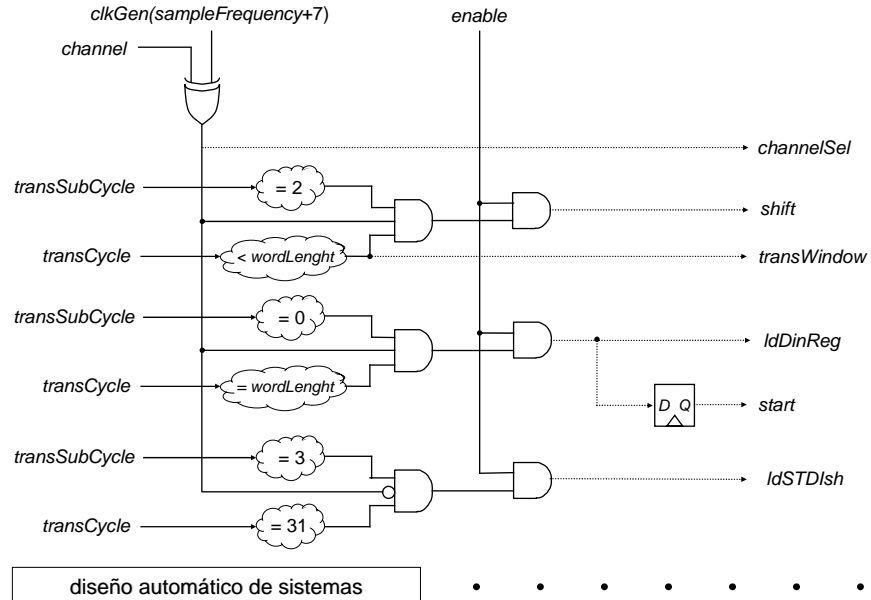


diseño automático de sistemas

• • • • •

procesado digital de señal (vi)

© J.M. Mendias, 2001



• • • • •