

Pong analogico con amplificadores operacionales

Diseño, netlist en PySpice/ngspice y simulación de un motor de Pong totalmente analógico que ataca un osciloscopio en modo X/Y a partir de dos potenciómetros.

1. Arquitectura del sistema

El sistema reproduce el diagrama de partida: dos POTs entran a un **motor Pong** que entrega dos únicas tensiones, X e Y, a un osciloscopio en modo X/Y. Como el osciloscopio solo dispone de dos entradas, los tres objetos de la pantalla (paleta izquierda, bola, paleta derecha) se dibujan por **multiplexado en el tiempo**: una base de tiempos de 60 kHz divide cada trama en tres ranuras y en cada ranura el multiplexor conecta a las salidas las coordenadas del objeto correspondiente. La persistencia del tubo (y del ojo) integra las tres ranuras en una imagen estable.

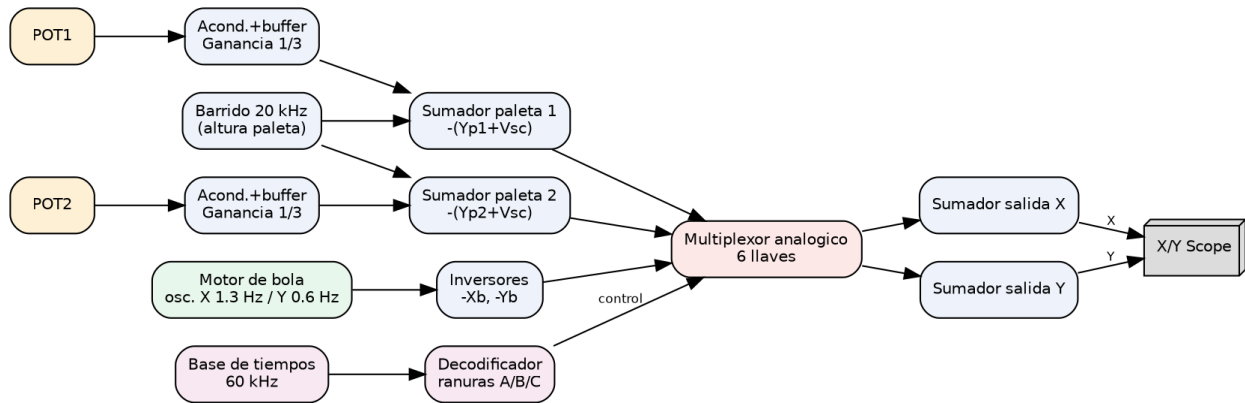


Fig. 1 - Diagrama de sistema.

Diagrama Mermaid equivalente:

```
graph LR
    P1[POT1 jugador 1] --> AC1[Acond. + buffer]
    P2[POT2 jugador 2] --> AC2[Acond. + buffer]
    subgraph PONG[MOTOR PONG]
        AC1 --> SUM1[Sumador paleta 1]
        AC2 --> SUM2[Sumador paleta 2]
        BALL[Motor de bola<br/>2 osc. triangulares] --> INV[Inversores]
        SCAN[Gen. de barrido 20 kHz] --> SUM1
        SCAN --> SUM2
        TB[Base de tiempos 60 kHz] --> DEC[Decodificador 3 ranuras]
        DEC --> MUX[Multiplexor analogico 6 llaves]
        SUM1 --> MUX
        SUM2 --> MUX
        INV --> MUX
    end
    MUX --> OX[Sumador salida X]
    MUX --> OY[Sumador salida Y]
    OX --> SC[X/Y Scope]
    OY --> SC
```

2. Descripción de los bloques

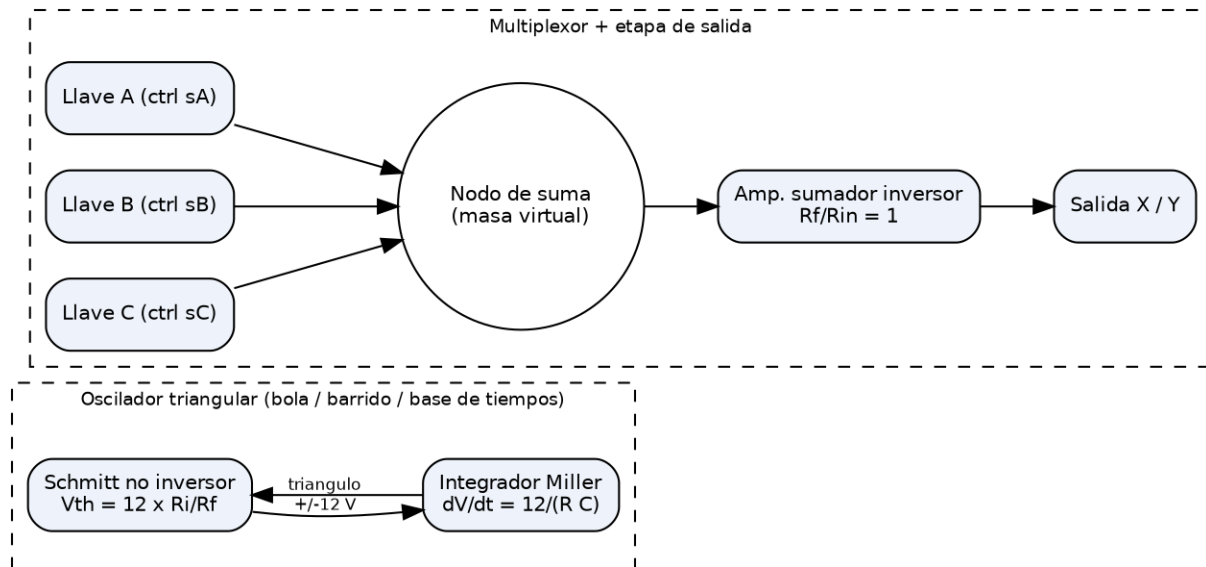


Fig. 2 - Diagrama de bloque: celda osciladora y cadena de salida.

B1. Motor de bola (4 op-amps)

Dos osciladores triangulares independientes generan $X_b(t)$ e $Y_b(t)$. Cada uno es un **integrador Miller** realimentado por un **Schmitt trigger no inversor**. El comparador entrega ± 12 V, el integrador lo convierte en una rampa de pendiente $12/(RC)$ y el Schmitt invierte el sentido cuando la rampa alcanza $V_{th} = 12 \cdot R_i/R_f$. El resultado es exactamente la física de una bola con velocidad constante que rebota en dos paredes. Con $R_i=100k$ y $R_f=240k$, $V_{th} = 5$ V (ancho de pista ± 5 V). Con $R=470k/1M$ y $C=1$ uF las velocidades son 25.5 V/s en X y 12 V/s en Y, es decir rebotes cada 0.39 s y 0.83 s.

B2. Acondicionamiento de mandos (2 op-amps)

Cada potenciómetro, alimentado entre ± 12 V, pasa por un divisor 200k/100k (ganancia 1/3) y un **seguidor de tension**. Salida $Y_p = \pm 4$ V, con impedancia de salida baja para no cargar la red de suma. El divisor también limita el recorrido de la paleta dentro de la pantalla.

B3. Generador de barrido de paleta (2 op-amps)

Misma celda triangular, pero a 20 kHz ($R=15k$, $C=10$ nF, $V_{th}=1$ V). Esta señal V_{sc} se suma a la posición de la paleta para **dibujarla como un segmento vertical** de ± 1 V de altura en lugar de un punto. Su frecuencia es muy superior a la de refresco de ranuras para que el trazo aparezca continuo.

B4. Base de tiempos y decodificador de ranuras (2 + 3 op-amps)

Un tercer oscilador triangular a 60 kHz ($R=5k$, $C=10$ nF) genera V_r . Tres comparadores lo trocean: sA activo si $V_r < -0.6$ V (paleta 1), sC activo si $V_r > +0.6$ V (paleta 2) y sB, obtenido por una **función NOR analógica** (suma resistiva de sA y sC comparada con -4 V), activo en la zona central (bola). Al ser triangular, la secuencia por periodo es A-B-C-B-A, lo que reparte el brillo de forma simétrica entre los tres objetos.

B5. Sumadores de paleta e inversores (4 op-amps)

Dos sumadores inversores de ganancia unidad producen $-(Y_{p1}+V_{sc})$ y $-(Y_{p2}+V_{sc})$. Dos inversores producen $-X_b$ y $-Y_b$. El signo negativo es intencionado: la etapa de salida vuelve a invertir, de modo que la polaridad final es correcta sin etapas adicionales.

B6. Multiplexor analógico (6 llaves)

Seis llaves analógicas (CD4066) gobernadas por sA/sB/sC conectan, en cada ranura, la fuente adecuada a los nodos de suma X e Y a través de resistencias de 100 k. Para X las fuentes son dos referencias fijas de ± 8 V (posición horizontal de cada paleta) y $-X_b$ (bola). Para Y son $-(Y_{p1}+V_{sc})$, $-(Y_{p2}+V_{sc})$ y $-Y_b$. Como el nodo de suma es una masa virtual, la R_{on} de la llave (~ 100 ohm frente a 100 k) introduce un error de solo el 0.1 %.

B7. Etapas de salida X e Y (2 op-amps)

Dos amplificadores sumadores inversores con $R_f = 100\text{ k}$ cierran la cadena y presentan una salida de baja impedancia al osciloscopio. Su ancho de banda debe ser holgado frente a la ranura de 3-6 μs ; en la simulación se usa un macromodelo con GBW de 10 MHz.

Diagrama Mermaid de bloque:

```
graph TD
    subgraph OSC[Bloque generador triangular]
        SQ[Comparador Schmitt<br/> $V_{th} = V_{sat} \times R_i/R_f$ ] -->|+/-12 V| INT[Integrador Miller<br/> $dV/dt = V_{sat}/RC$ ]
        INT -->|triangulo| SQ
    end
    end
    subgraph MUXB[Bloque multiplexor + salida]
        S1[Llave A] --> N((nodo suma))
        S2[Llave B] --> N
        S3[Llave C] --> N
        N --> OA[Amp. sumador inversor<br/> $R_f/R_{in} = 1$ ] --> OUT[Salida X o Y]
    end
    end
```

3. Implementacion en PySpice

El circuito se describe con la API de PySpice sobre ngspice. Se definen dos macromodelos: OPAMP (ganancia $1e4$, polo dominante 1 kHz, GBW 10 MHz, saturacion suave a ± 12 V mediante una fuente B con tanh) y COMP (mismo esquema con polo en 500 kHz, equivalente a un comparador rapido). La celda osciladora se instancia con una funcion reutilizable, lo que evita repetir netlist.

```
OPAMP = """
.subckt OPAMP inp inn out
Rin inp inn 2Meg
Eg n1 0 inp inn 1e4
Rp n1 n2 1k
Cp n2 0 0.159u
Bo n3 0 V=12*tanh(V(n2)/12) ; saturacion suave +/-12 V
Ro n3 out 50
.ends
.model SWMOD SW(vt=6 vh=1 ron=100 roff=1e9)
"""

def osc(c, name, R, C, Ri, Rf, tri, sq, cmp='OPAMP'):
    """Integrador Miller + Schmitt = oscilador triangular"""
    c.X(f'{name}i', 'OPAMP', c.gnd, f'{name}s', tri)
    c.R(f'{name}R', sq, f'{name}s', R); c.C(f'{name}C', f'{name}s', tri, C)
    c.X(f'{name}c', cmp, f'{name}p', c.gnd, sq)
    c.R(f'{name}i', tri, f'{name}p', Ri); c.R(f'{name}f', f'{name}p', sq, Rf)

osc(c, 'bx', 470@u_kOhm, 1@u_uF, 100@u_kOhm, 240@u_kOhm, 'xb', 'xbq') # bola X
osc(c, 'mr', 5@u_kOhm, 10@u_nF, 100@u_kOhm, 1.2@u_MOhm, 'vr', 'vrq', 'COMP') # 60 kHz
```

Los osciladores necesitan una condicion inicial (.ic) para arrancar, ya que el punto de reposo con la salida a cero es un equilibrio inestable. Se realizan dos analisis transitorios: uno **largo de 10 s** sobre el subsistema lento (bola y mandos) y uno **corto de 2 ms con paso de 100 ns** sobre el sistema completo, necesario para resolver las ranuras de 60 kHz.

4. Resultados de simulacion

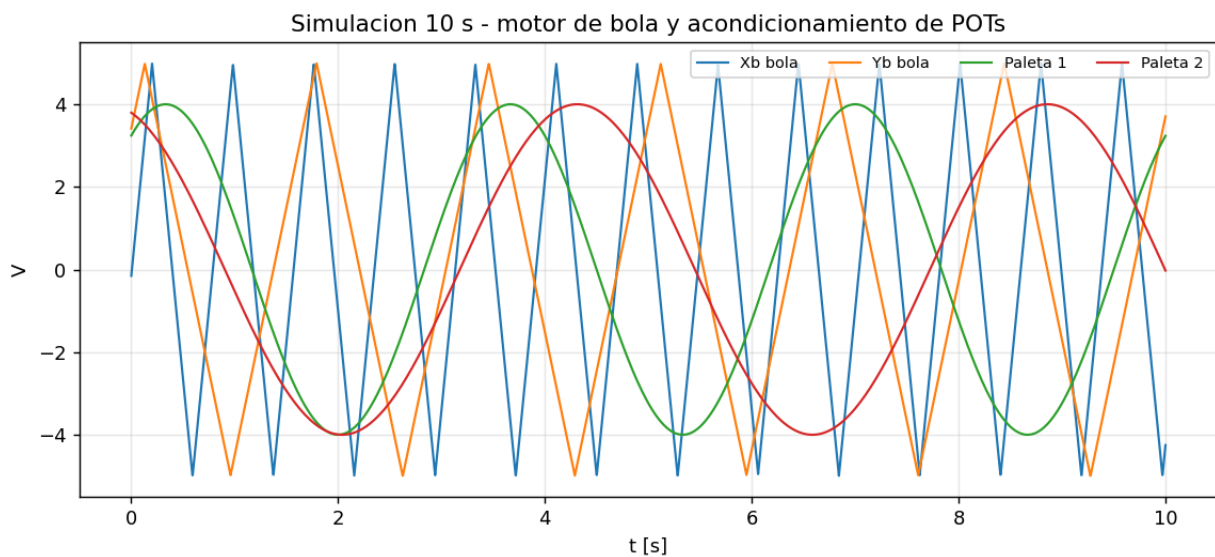


Fig. 3 - Transitorio de 10 s. Triangulos de la bola (rebotes en ± 5 V) y posicion de las paletas.

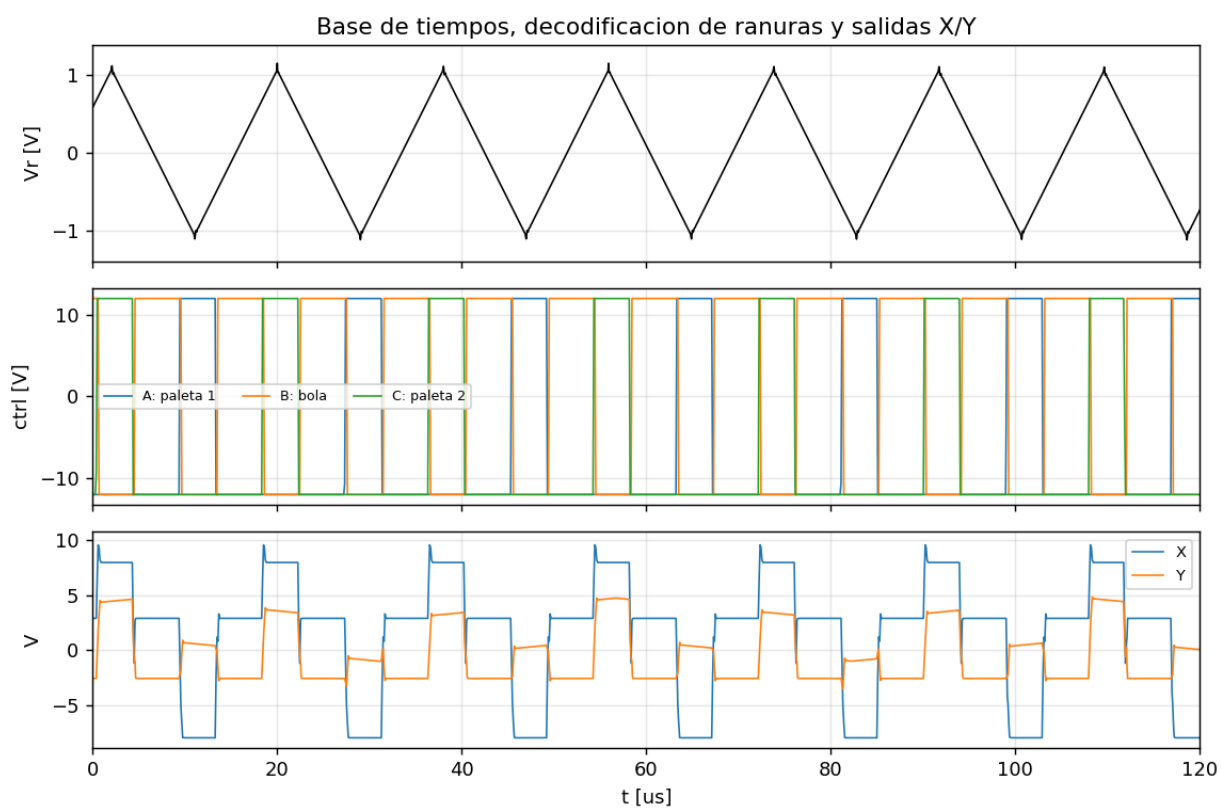


Fig. 4 - Detalle a 60 kHz: base de tiempos, senales de ranura y salidas X/Y multiplexadas.

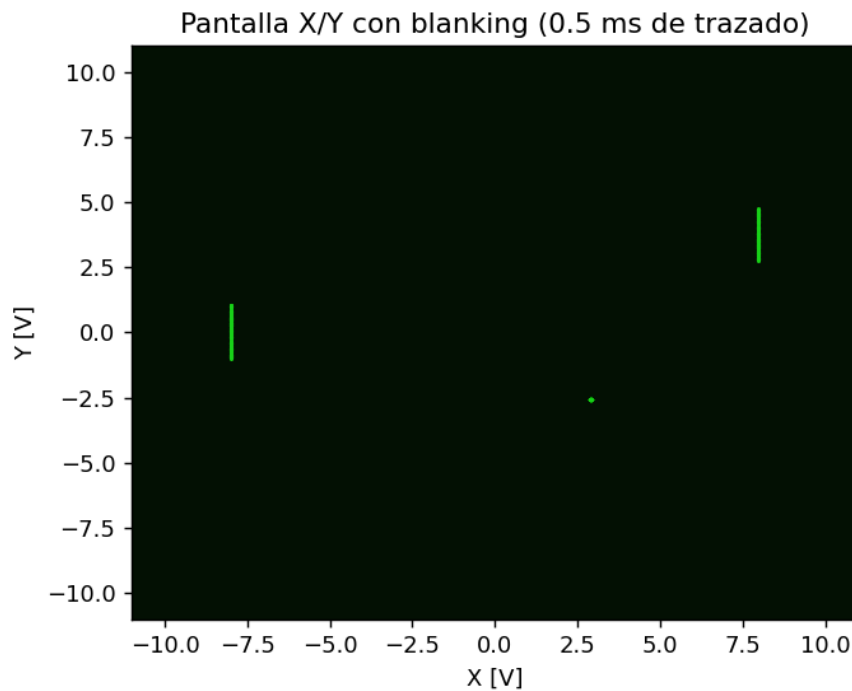


Fig. 5 - Pantalla X/Y reconstruida a partir de las tensiones simuladas: las dos paletas (segmentos verticales en $X = -8\text{ V}$ y $+8\text{ V}$) y la bola.

En la Fig. 5 se aplica un **blanking**: se descartan las muestras de los 2.2 μs posteriores a cada cambio de ranura. En hardware esto corresponde a la entrada Z del osciloscopio, gobernada por un monoestable disparado en cada flanco de ranura. Sin blanking aparecen los trazos de retorno entre objetos, típicos de los displays vectoriales.

5. Animación

El archivo pong.gif anima 100 fotogramas de la simulación de 10 s, reconstruyendo la pantalla del osciloscopio (paletas y bola) a partir de las tensiones Y_{p1} , Y_{p2} , X_b e Y_b .

6. Lista de materiales (BOM)

Ref.	Componente	Cant.	Descripción / uso
U1-U5	TL074 (quad JFET op-amp)	5	16 op-amps: integradores, sumadores, buffers, inversores
U6	LM339 (quad comparador)	1	2 Schmitt rápidos + 3 comparadores de ranura
U7-U8	CD4066B (quad switch analógico)	2	6 llaves del multiplexor X/Y
POT1-2	Potenciometro lineal 10 k	2	Mando de cada jugador
R (100k)	Resistencia 100 k 1%	18	Redes de suma, realimentación, divisores
R (200k)	Resistencia 200 k 1%	2	Atenuador de mando (1/3)
R (240k)	Resistencia 240 k 1%	2	Histeresis Schmitt bola ($V_{th} = 5\text{ V}$)
R (1M2)	Resistencia 1.2 M 1%	2	Histeresis Schmitt rápidos ($V_{th} = 1\text{ V}$)
R (470k/1M)	Resistencia 470 k / 1 M 1%	2	Integradores de bola (velocidad X/Y)
R (15k/5k)	Resistencia 15 k / 5 k 1%	2	Integradores de barrido y base de tiempos
C1-C2	Condensador film 1 μF	2	Integradores de bola
C3-C4	Condensador film 10 nF	2	Integradores de 20 kHz y 60 kHz
C5-C12	Condensador 100 nF cerámico	8	Desacoplo de alimentación
PSU	Fuente simétrica $\pm 12\text{ V}$	1	Alimentación analógica
J1	Conector BNC x2	2	Salidas X e Y al osciloscopio

Total: 8 circuitos integrados, 21 op-amps/comparadores utilizados, 28 resistencias y 12 condensadores. Todo el diseño es analógico salvo las llaves CMOS del multiplexor.

7. Limitaciones y mejoras

- **Sin señal Z:** el osciloscopio del enunciado solo tiene X e Y, por lo que los trazos de retorno son visibles; añadir un monoestable de blanking los elimina.
- **Sin detección de golpe:** la bola rebota en paredes virtuales fijas. Un comparador de ventana que compare Y_b con Y_{p1}/Y_{p2} en el instante en que X_b alcanza ± 8 V permitiría invertir el Schmitt de X solo si hay impacto, e implementar el tanteo.
- **Deriva del integrador:** con op-amps reales conviene una resistencia de fuga en paralelo con C o usar amplificadores de bajo offset (por ejemplo OP07) en los integradores lentos.
- **Solape de ranuras:** la NOR analógica genera un breve estado no unívoco en las transiciones; un decodificador con puertas lógicas (74HC02) lo eliminaría.