



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

EIE

Escuela de
Ingeniería Eléctrica

IE-0408: LABORATORIO DE ELECTRÓNICA II

PROF. VÍCTOR H. GRANADOS, PHD.

Fecha de entrega: 6 DE FEBRERO 2025

Sub-grupo: 02

Grupo: 901

III - 2024

Anteproyecto Final:

Ω -Pong

JOSE ANDRÉS GUERRERO ÁLVAREZ - B63162
ROGER DANIEL PIOVET GARCÍA - C15990

Índice

1. Objetivos	1
1.1. General	1
1.2. Específicos	1
2. Nota teórica	2
2.1. Descripción general	2
2.2. Descripción de cada etapa	3
2.2.1. Oscilador en cuadratura	3
2.2.2. Circuito desfasador de 360°	3
2.2.3. Comparador ajustable	4
2.2.4. Comparador + flip flop	4
2.2.5. Control de dibujo y paleta	5
2.2.6. Multiplexor analógico 2 a 1, sumador	6
2.2.7. Flip flop y circuito RC	7
2.2.8. Comparadores de ventana	8
2.2.9. Comparadores de ventana (límites horizontales/verticales)	9
2.2.10. Control de dirección de la pelota	10
2.2.11. Control de turnos y LEDs indicadores	11
2.2.12. Efectos de sonido	11
2.3. Diagrama de bloques	12
3. Lista de componentes	13
4. Lista de equipo	17
5. Diseño	18
5.1. Circuito oscilador en cuadratura	18
5.2. Circuitos desfasadores de 360° y comparadores ajustables	20
5.3. Circuito con comparador y flip flop	21
5.4. Circuito para el control de dibujo de paleta	22
5.5. Circuitos multiplexores analógicos 2 a 1, sumadores	24
5.6. Circuito con flip flop y circuito RC	24
5.7. Circuitos comparadores de ventana	26
5.8. Circuito comparador de ventana para límites horizontales y verticales	26
5.9. Circuito para el control de dirección de la pelota	28
5.10. Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores	30
5.11. Circuito para efectos de sonido	31
6. Referencias	34

Índice de figuras

1.	Captura de una partida del juego [1]	2
2.	Topologías de osciladores de cuadratura	3
3.	Circuitos desfasadores de 360° [1]	4
4.	Circuito con comparador y flip-flop [1]	5
5.	Circuito para el control de dibujo y paleta [1]	6
6.	Circuito multiplexor analógico 2 a 1, sumador [1]	7
7.	Circuito con flip flop y circuito RC [1]	8
8.	Circuitos comparadores de ventana [1]	9
9.	Circuitos comparadores de ventana para los límites horizontales y verticales de la pantalla del juego [1]	10
10.	Circuito para el control de dirección de la pelota [1]	11
11.	Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores [1]	11
12.	Circuito para efectos de sonido [1]	12
13.	Diagrama de bloques de Ω -Pong	12
14.	Oscilador en cuadratura simulado en LTSpice	19
15.	Salidas del oscilador en cuadratura simulado en LTSpice	19
16.	Circuito desfasador de 360° y comparador ajustable simulado en LTSpice	20
17.	Entrada, señal intermedia, y salida del circuito desfasador de 360° y comparador ajustable simulado en LTSpice	20
18.	Circuito con comparador y flip flop simulado en LTSpice	21
19.	Entrada y salida del circuito con comparador y flip flop simulado en LTSpice	21
20.	Circuito para el control de dibujo de paleta simulado en LTSpice	22
21.	Entrada y salida del circuito con comparador y flip flop simulado en LTSpice	23
22.	Circuito con flip flop y circuito RC simulado en LTSpice	25
23.	Graficas de salida con las señales <i>BallX</i> y <i>BallY</i> para el circuito con flip flop y circuito RC simulado en LTSpice	25
24.	Circuitos comparadores de ventana para los límites horizontales y verticales de la pantalla del juego simulados en LTSpice	27
25.	Entrada y salida del circuito comparador de ventana para los límites horizontales simulado en LTSpice	28
26.	Circuito para el control de direccion de la pelota	29
27.	Circuito para el control de direccion de la pelota Graficas de XREV Y YREV	29
28.	Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores	30
29.	Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores, Grafica de TURN y TURN negado.	30

1. Objetivos

1.1. General

- Diseñar e implementar un circuito electrónico que permita jugar una versión analógica del clásico juego Pong utilizando la pantalla de un osciloscopio en modo XY.

1.2. Específicos

- Desarrollar un oscilador en cuadratura que genere las señales sinusoidales necesarias para representar la pelota y las paletas en el osciloscopio.
- Integrar circuitos de control de colisiones y dirección para simular el rebote de la pelota en las paletas y los límites de la pantalla.
- Implementar un sistema de control de turnos e indicadores visuales mediante LEDs para identificar el turno de cada jugador durante el juego.

2. Nota teórica

El circuito que se plantea construir en este proyecto está altamente basado en el diseño de Jon Stanley [1].

2.1. Descripción general

Como experimento final del curso IE408 – Laboratorio de Electrónica II, se desea implementar un circuito que permita jugar el famoso juego de Atari, Pong, en la pantalla de un osciloscopio que disponga el modo XY. El circuito contará con los siguientes controles:

- Ajuste del tamaño de paletas
- Ajuste del tamaño de pelota
- Ajuste de la velocidad de la pelota
- Posición de la paleta A
- Posición de la paleta B
- Reiniciar partida (colocar pelota en el centro de la pantalla)

En la pantalla se mostrarán dos paletas en forma de arco, y una pelota se desplazará por la pantalla. El juego contará con control de turnos, por lo que únicamente el jugador al que le corresponda el turno actual podrá interactuar con la pelota, hasta que cambie el turno actual cuando la pelota choque contra la paleta correspondiente.

En la [Figura 1](#) se muestra una captura de como se vería una partida del juego en la pantalla de un osciloscopio analógico. En el siguiente [enlace](#) se muestra un video de una partida completa del juego.

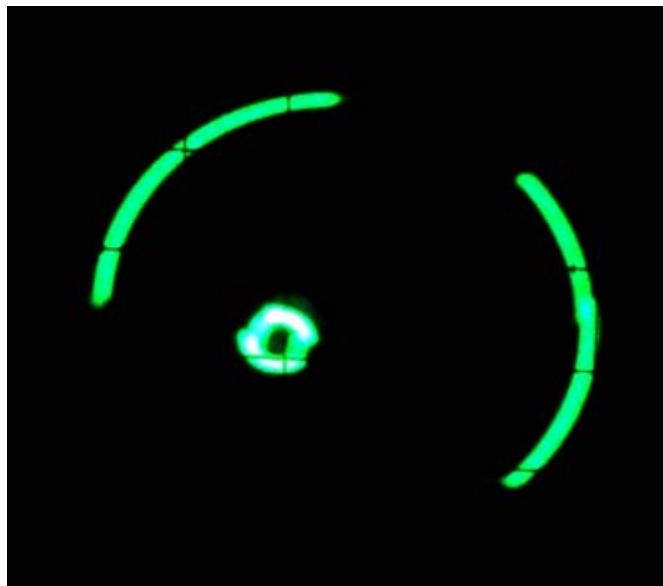


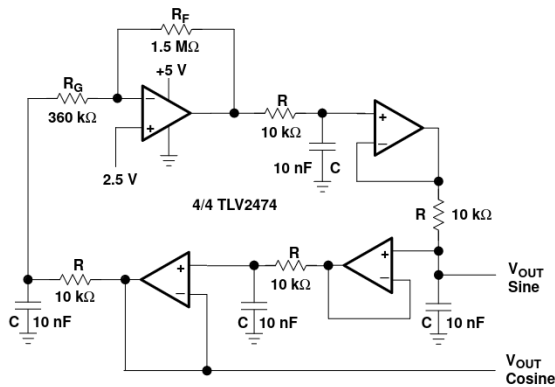
Figura 1: Captura de una partida del juego [1]

2.2. Descripción de cada etapa

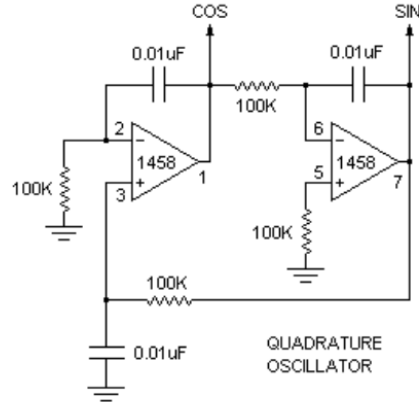
2.2.1. Oscilador en cuadratura

Esta etapa genera dos ondas sinusoidales, una desfasada 90° con respecto a la otra. Dichas ondas sinusoidales son alimentadas a otras etapas del circuito para ser comparada con otras señales, o para ser procesadas. Esta es la etapa más esencial del circuito, debido a que estas ondas sinusoidales son las que se utilizan para dibujar arcos y círculos en el osciloscopio. Esto es logrado por medio del modo XY del osciloscopio, en donde se toman los voltajes en dos de los canales de entrada del equipo y se grafican considerando que corresponden a coordenadas cartesianas. Un caso especial de esto es cuando se alimenta $\cos(\omega t)$ al canal asociado al eje X, y $\sin(\omega t)$ al canal asociado al eje Y. Esto genera un círculo en la pantalla del osciloscopio. A partir de las transformaciones de estas señales analógicas y señales de control producidas por el resto de las etapas del circuito, se logra simular una pelota circular, paletas, y rebotes.

Se propone alterar el diseño original utilizando un oscilador de Bubba en vez de un oscilador en cuadratura, con el propósito de evaluar si un oscilador con esta topología tiene alguna ventaja con respecto al oscilador del diseño original. En la [Figura 2](#) se muestran ambas topologías de osciladores.



(a): Bubba [\[2\]](#)



(b): Original [\[1\]](#)

Figura 2: Topologías de osciladores de cuadratura

2.2.2. Circuito desfasador de 360°

Esta etapa utiliza un potenciómetro de doble gang (Pot DG) con el cual se desfasa la señal sinusoidal de entrada en el rango de desfases $[0, 360]$. Las etapas siguientes aprovechan esta señal desfasada para ajustar la posición angular de la paleta, por lo que el jugador controla la posición de la paleta a través de dicho potenciómetro. Hay dos circuitos como estos en el circuito, uno encargado de la paleta A y otro de la paleta B. En la [Figura 3](#), se muestran dichos circuitos.

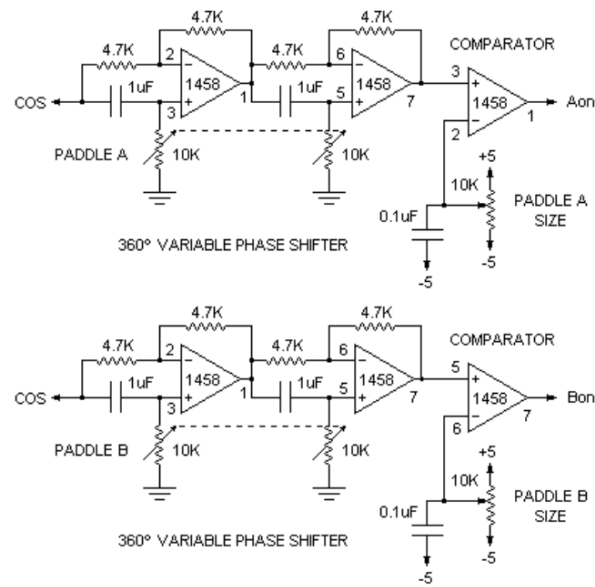


Figura 3: Circuitos desfasadores de 360° [1]

2.2.3. Comparador ajustable

Esta etapa genera una onda cuadrada en base a un nivel de tensión DC ajustado por medio de un potenciómetro. Esta etapa es conectada después de los circuitos desfasadores, como se muestra en la Figura 3. Esto permite ajustar el tamaño de cada una de las paletas. Se propone utilizar un potenciómetro de doble gang para ajustar el tamaño de las paletas, con el propósito de que el tamaño de estas sea simétrico. Estas ondas cuadradas son denominadas A_{on} y B_{on} , una para cada paleta. Los tiempos que estas ondas están en alto indican los momentos en que se deben dibujar las paletas para lograr un tamaño en particular.

2.2.4. Comparador + flip flop

Esta etapa genera una onda cuadrada con un ciclo de trabajo del 50 % aproximadamente, debido a que es producida a partir de la señal coseno proveniente del oscilador en cuadratura. Gracias al uso de un flip flop en este circuito, como salidas de esta etapa se tienen las señales de reloj CLK y \overline{CLK} , las cuales son utilizadas para generar distintas señales de control en el circuito. Dicho circuito se muestra en la Figura 4.

Nota: Para todas las etapas y señales del circuito que realicen algún procesamiento digital, se consideraron los niveles lógicos $V_H = 5\text{ V}$ y $V_L = -5\text{ V}$.

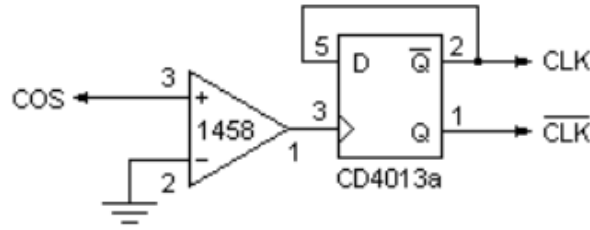


Figura 4: Circuito con comparador y flip-flop [1]

2.2.5. Control de dibujo y paleta

Esta etapa realiza procesamiento digital únicamente. La razón del porque el circuito ocupa señales de control se debe a que se quieren dibujar varios elementos en la pantalla del osciloscopio a la vez (paletas y pelota), y solo se tienen los canales de salida *ScopeX* y *ScopeY*, los cuales se ocupan ambos cuando se quiere dibujar un elemento en particular en la pantalla. Se propone multiplexar todos los elementos que se desean dibujar en la pantalla, controlando los momentos de dibujado a través de distintas señales de control. Esto es definido de la siguiente manera:

- Si CLK está en alto, se dibujan las paletas.
- Si CLK está en bajo, se dibuja la pelota.

Lo anterior se resume en la señal de control T , la cual es descrita a través de la función combinatorial (1).

$$T = \overline{(A_{on} + B_{on}) \cdot CLK} \quad (1)$$

La negación en esta función se debe a la polaridad de los switches analógicos utilizados para cambiar entre la señal de la paleta y la de la pelota, en la etapa “Multiplexor analógico 2 a 1, sumador”. Dichos switches analógicos son implementados utilizando el circuito integrado CD4066B, disponible para su compra en la tienda costarricense MicroJPM en el siguiente [enlace](#).

Como se multiplexan las señales de la pelota y la paleta en la pantalla del osciloscopio, se debe realizar con cuidado la verificación del choque entre la pelota y la paleta. Esto debido a que ambas señales no están presentes en el circuito a la misma vez. Por cuanto, es necesario una señal de control adicional, denominada PL , la cual es encargada de indicar el momento correcto en donde se puede dar un choque entre alguna de las paletas y la pelota, para que la señal $BOUNCE$ se ponga en alto en caso de que se de un choque. Dicha señal se muestra en la ecuación (2).

$$PL = \overline{((A_{on} \cdot TURN + B_{on} \cdot \overline{TURN}) \cdot \overline{CLK})} \quad (2)$$

Note que esta ecuación es equivalente a (1), con la excepción de que utiliza la señal \overline{CLK} , y combina las señales $TURN$ y \overline{TURN} con las señales de las paletas correspondientes, con el propósito de verificar choques únicamente con la paleta del jugador que le toca el turno actual. El circuito que implementa esta etapa se muestra en la [Figura 5](#).

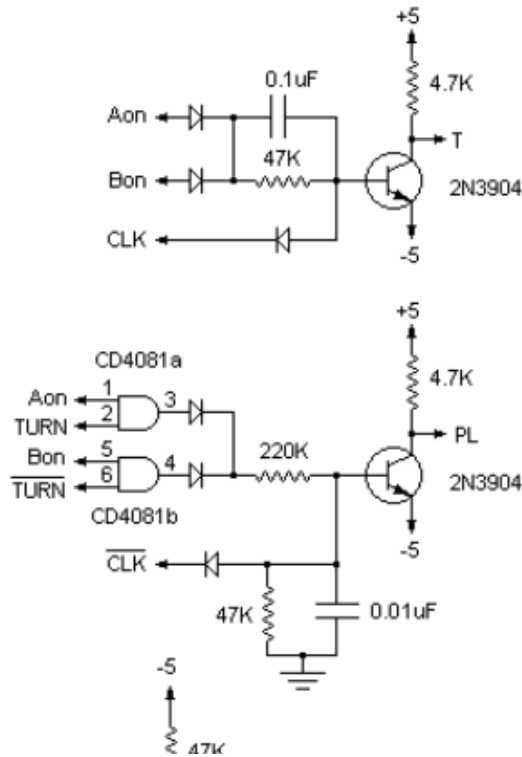


Figura 5: Circuito para el control de dibujo y paleta [1]

2.2.6. Multiplexor analógico 2 a 1, sumador

Esta etapa es la encargada de multiplexar las señales de la paleta y de la pelota. La paleta es dibujada a partir de las señales en cuadratura producidas por el oscilador, mientras que la pelota es dibujada reescalando dichas señales por medio de un divisor de tensión y sumándole un offset DC a estas señales en cuadratura. Esto produce un círculo más pequeño que las pelotas que se puede desplazar por la pantalla del osciloscopio a partir del offset DC. Dicho offset DC es manejado por la etapa “Flip flop + circuito RC” con las señales *BallX* y *BallY*. La multiplexación es realizada por medio de un switch analógico, el cual conduce de acuerdo a lo dictado por la señal *T* descrita por la ecuación (1). Este circuito se implementó para ambos canales del osciloscopio utilizado para dibujar el juego. Dicho circuito se muestra en la Figura 6.

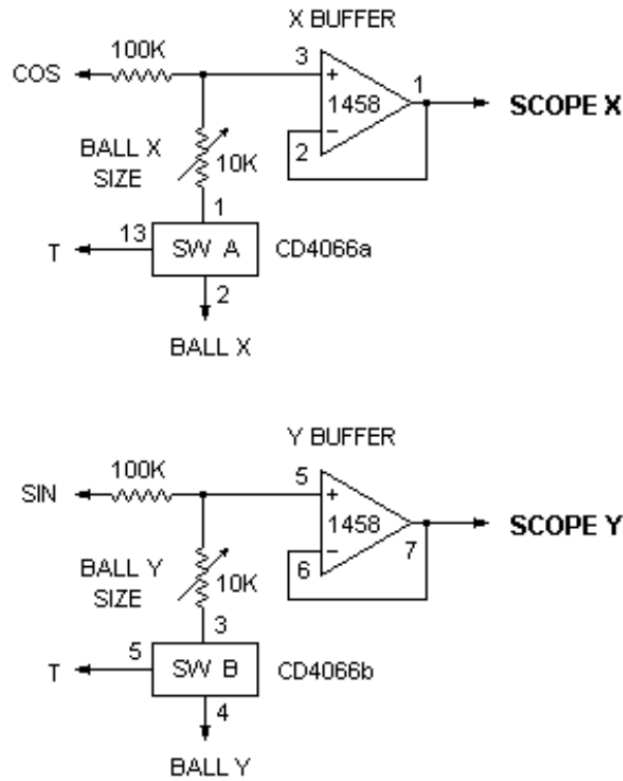


Figura 6: Circuito multiplexor analógico 2 a 1, sumador [1]

Es importante resaltar que, como tal, este circuito no suma como un sumador convencional que utiliza amplificadores operacionales. El circuito habilita y deshabilita un divisor de tensión, permitiendo escoger entre una señal en cuadratura (paletas), o una señal en cuadratura de menor amplitud y con un offset DC (pelota).

2.2.7. Flip flop y circuito RC

Esta etapa es la encargada de controlar la dinámica de la pelota. Cuando la pelota rebota, las señales X_{rev} y Y_{rev} conmutan, causando que cambie la salida del flip flop al que están conectadas estas señales, provocando que el capacitor en el circuito RC se cargue o descargue, produciendo las señales $BallX$ y $BallY$. Esto simula el movimiento de la pelota, el cual es rápido al principio, y poco a poco se realentiza, hasta que la tensión del capacitor llega a estado estacionario. Es posible ajustar la velocidad de la pelota por medio de un potenciómetro de doble gang, el cual cambia la constante τ del circuito RC al rotar el potenciómetro, provocando una velocidad de carga o descarga distinta, acelerando o realentizando la pelota. El circuito que implementa esta etapa se muestra en la [Figura 7](#).

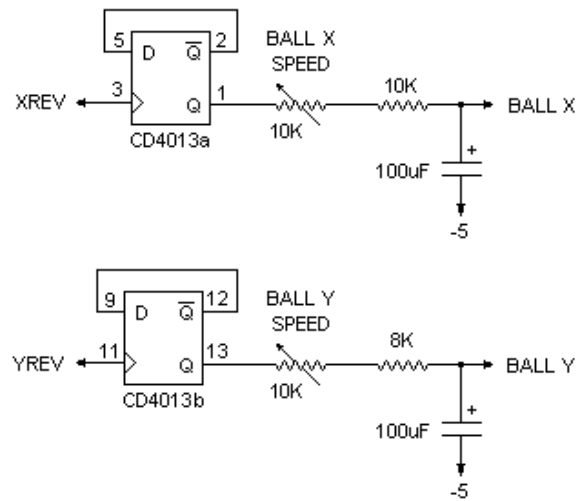


Figura 7: Circuito con flip flop y circuito RC [1]

2.2.8. Comparadores de ventana

Esta etapa es la encargada de determinar una colisión entre la paleta y la pelota. Siempre y cuando las condiciones para que se de una colisión de acuerdo a la señal de control *PL*, si se da una colisión, los comparadores de ventana para el eje X y el eje Y se activan, provocando que la salida del circuito se ponga en alto, correspondiente a la señal *BOUNCE*. Se utiliza un switch analógico como pulldown para la señal *BOUNCE* en caso de que *PL* esté en alto (es decir, no es posible que se de un rebote en estas condiciones). El circuito que implementa esta etapa se muestra en la [Figura 8](#).

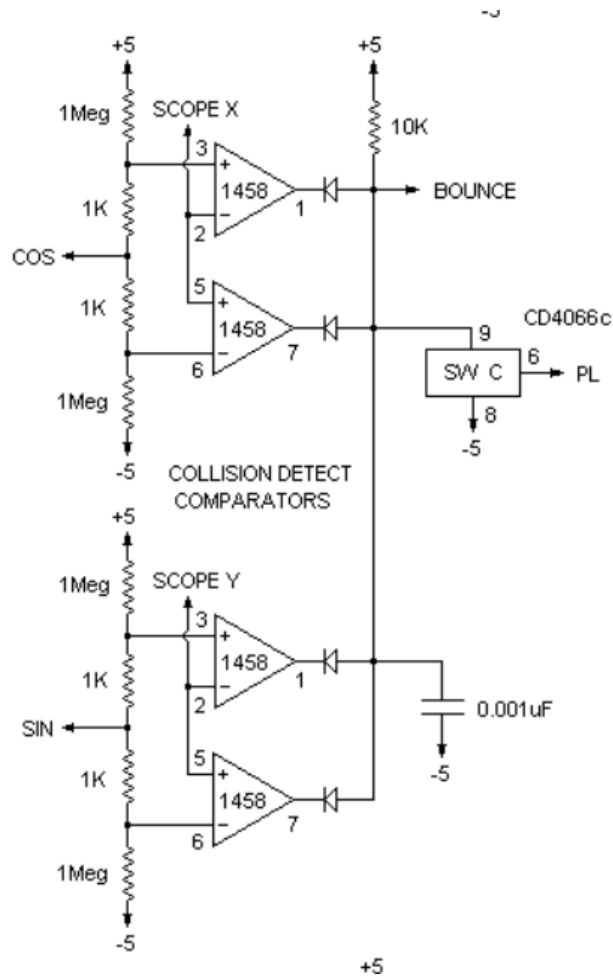


Figura 8: Circuitos comparadores de ventana [1]

2.2.9. Comparadores de ventana (límites horizontales/verticales)

Esta etapa es encargada de determinar si la pelota ha llegado a los límites de la pantalla del juego. Las señales de salida XR y YR son utilizadas para ejecutar un rebote, en caso de que $BOUNCE$ se ponga en alto también cuando XR y YR lo hagan. El circuito que implementa esta etapa se muestra en la [Figura 9](#).

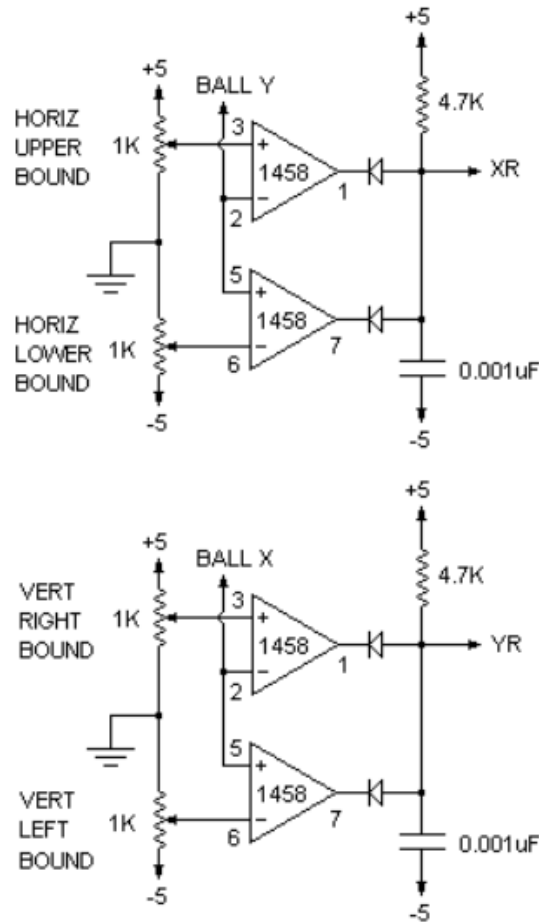


Figura 9: Circuitos comparadores de ventana para los límites horizontales y verticales de la pantalla del juego [1]

2.2.10. Control de dirección de la pelota

Esta etapa se encarga de controlar a que próxima dirección se moverá la pelota. Cuando XR y $BOUNCE$, o YR y $BOUNCE$ se ponen en alto, las señales X_{rev} o Y_{rev} conmutan, provocando que la pelota rebote en alguna dirección debido a las etapas “flip flop + circuito RCz también “Mux analógico 2 a 1, sumador”. Adicionalmente, este circuito proporciona un botón de reinicio, que al ser presionado, coloca la pelota en el centro de la pantalla. Esto es útil en caso de que la pelota se haya desplazado a alguno de los límites de la pantalla y no sea posible recuperarla por medio de las paletas. El circuito que implementa esta etapa se muestra en la [Figura 10](#).

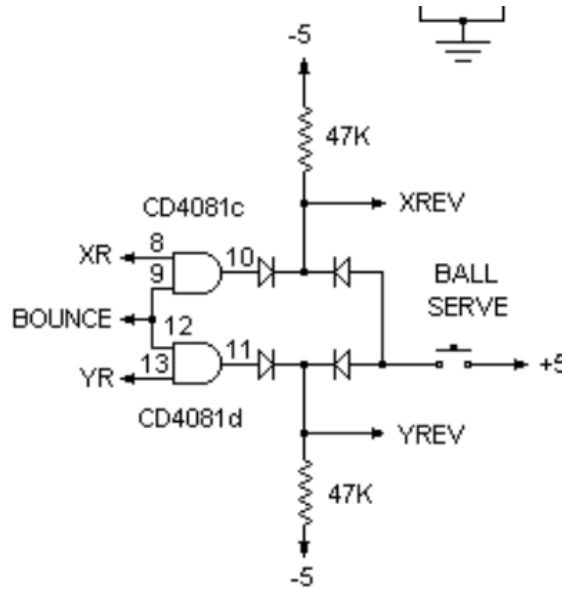


Figura 10: Circuito para el control de dirección de la pelota [1]

2.2.11. Control de turnos y LEDs indicadores

Esta etapa se encarga de controlar las señales $TURN$ y \overline{TURN} , así como dos LEDs indicadores que le indican a los jugadores de quien es el turno actual. El circuito consiste simplemente de un flip flop, y una rama con LEDs y resistencia para regular la corriente. Cuando haya un flanco positivo en $BOUNCE$, las salidas del flip flop conmutan, provocando que un LED se apague y otro se prenda, permitiendo identificar de cual jugador es el turno actual. El circuito que implementa esta etapa se muestra en la Figura 11.

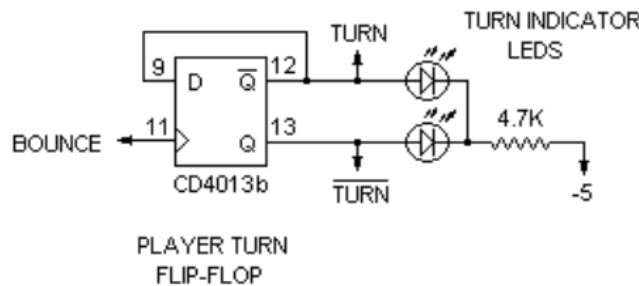


Figura 11: Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores [1]

2.2.12. Efectos de sonido

Este circuito genera un zumbido cada vez la bola rebota en algun de las paletas. Esto es logrado por medio de un buzzer. El circuito que realiza esta función se muestra en la Figura 12.

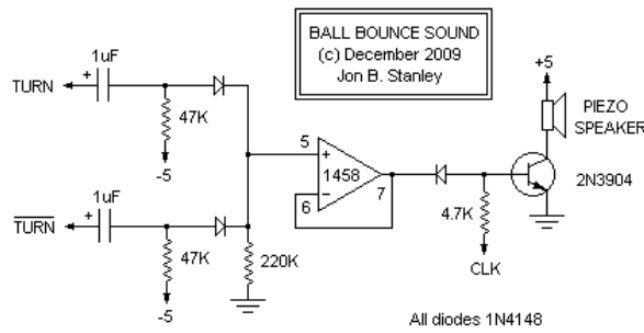
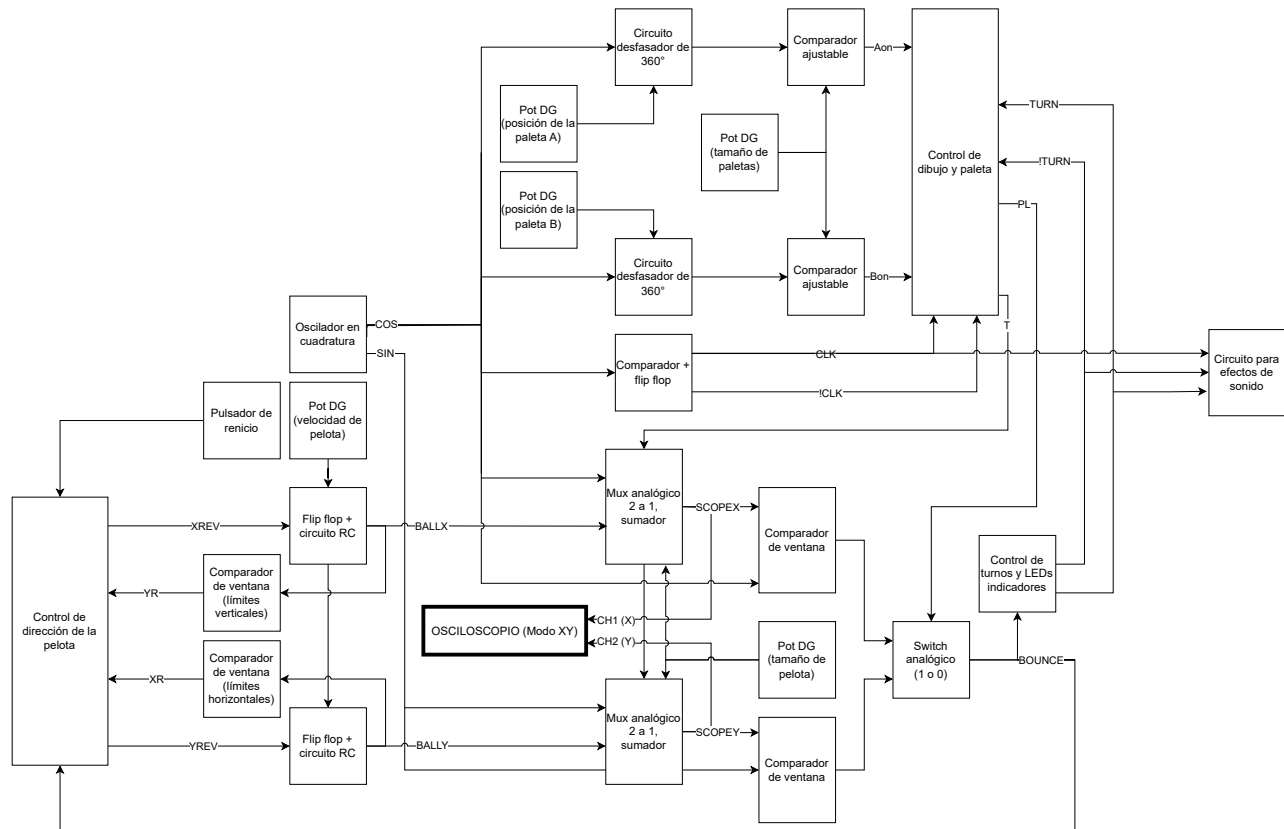


Figura 12: Circuito para efectos de sonido [1]

2.3. Diagrama de bloques

En la Figura 13 se muestra un diagrama de bloques que incluye cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

Figura 13: Diagrama de bloques de Ω -Pong

3. Lista de componentes

Cuadro 1: Lista de componentes

Componente	Sigla	Cantidad	Valor teórico
Oscilador en cuadratura			
Trimmer	R1a	1	250 k Ω
Trimmer	R2a	1	250 k Ω
Trimmer	R3a	1	250 k Ω
Capacitor	C1a	1	100 nF
Capacitor	C2a	1	100 nF
Capacitor	C3a	1	100 nF
Amplificador operacional	U1a	1	LM358
Amplificador operacional	U2a	1	LM358
Circuito desfasador de 360° y comparador ajustable			
Resistor	R1b	1	4.7 k Ω
Resistor	R2b	1	4.7 k Ω
Resistor	R3b	1	4.7 k Ω
Resistor	R4b	1	1 k Ω
Potenciometro	P1b	1	1 k Ω
Potenciometro	P2b	1	1 k Ω
Potenciometro	P3b	1	5 k Ω
Amplificador operacional	U1b	1	LM358
Amplificador operacional	U2b	1	LM358
Amplificador operacional	U3b	1	LM358
Comparador y flip flop			
Resistor	R1c	1	1 k Ω
Resistor	R2c	1	1 k Ω
Amplificador operacional	U1c	1	LM358
Flip Flop JK	FF1c	1	CD4027BE
Control de dibujo y paleta T			
Transistor NPN	Q1d	1	2N3904
Resistor	R1dt	1	4.7 k Ω
Resistor	R2dt	1	47 k Ω
Capacitor	C2dt	1	100 nF
Diodo	D1dt	1	-
Diodo	D2dt	1	-
Continúa en la próxima página			

Componente	Sigla	Cantidad	Valor teórico
Diodo	D3dt	1	-
Control de dibujo y paleta PL			
Transistor NPN	Q1d	1	2N3904
Resistor	R1dpl	1	220 k Ω
Resistor	R2dpl	1	47 k Ω
Resistor	R3dpl	1	4.7 k Ω
Capacitor	C2dpl	1	10 nF
Diodo	D1dpl	1	-
Diodo	D2dpl	1	-
Diodo	D3dpl	1	-
Multiplexor analógico 2 a 1 y sumador			
Resistor	R1e	1	100 k Ω
Resistor	R2e	1	100 k Ω
Potenciómetro doble gang	P1e	1	10 k Ω
Potenciómetro doble gang	P2e	1	10 k Ω
Switch analógico	SW A	1	CD4066B
Switch analógico	SW B	1	CD4066B
Amplificador operacional	U1e	1	LM358
Amplificador operacional	U1e	1	LM358
Flip flop y circuito RC			
Resistor	R1f	1	10 k Ω
Resistor	R2f	1	10 k Ω
Resistor	R3f	1	10 k Ω
Resistor	R4f	1	10 k Ω
Potenciómetro doble gang	P1f	1	10 k Ω
Capacitor	C1f	1	100 nF
Capacitor	C2f	1	100 nF
Flip Flop JK	A1	1	CD4027BE
Flip Flop JK	A2	1	CD4027BE
Comparadores de ventana			
Resistor	R1g	1	1 M Ω
Resistor	R2g	1	1 k Ω
Resistor	R3g	1	1 k Ω
Resistor	R4g	1	1 M Ω
Resistor	R5g	1	1 M Ω
Resistor	R6g	1	1 k Ω
Continúa en la próxima página			

Componente	Sigla	Cantidad	Valor teórico
Resistor	R7g	1	1 k Ω
Resistor	R8g	1	1 M Ω
Resistor	R9g	1	10 k Ω
Capacitor	C1g	1	0.001 uF
Amplificador operacional	U1g	1	LM358
Amplificador operacional	U2g	1	LM358
Amplificador operacional	U3g	1	LM358
Amplificador operacional	U4g	1	LM358
Switch analógico	U2g	1	CD4066B
Comparadores de ventana para límites horizontales/verticales			
Amplificador operacional	U1h	1	LM358
trimmer	P1h	1	1 k Ω
trimmer	P2h	1	1 k Ω
trimmer	P3h	1	1 k Ω
trimmer	P4h	1	1 k Ω
Resistor	R1h	1	4.7 k Ω
Resistor	R2h	1	4.7 k Ω
Capacitor	C1g	1	0.001 uF
Amplificador operacional	U1h	1	LM358
Amplificador operacional	U2h	1	LM358
Amplificador operacional	U3h	1	LM358
Amplificador operacional	U4h	1	LM358
Control de dirección de la pelota			
Resistor	R1i	1	47 k Ω
Resistor	R2i	1	47 k Ω
Flip Flop JK	U1i	1	CD4027BE
NAND	Nand1i	1	CD4011
NAND	Nand2i	1	CD4011
Inversor	Inver1i	1	CD4069BE
Inversor	Inver2i	1	CD4069BE
Diodo	D1i	1	-
Diodo	D2i	1	-
Diodo	D3i	1	-
Diodo	D4i	1	-
Pulsador	P1i	1	Pulsador de reinicio
Control de turnos y LEDs indicadores			
Flip Flop JK	FF1j	1	CD4027BE
Continúa en la próxima página			

Componente	Sigla	Cantidad	Valor teórico
Resistor	R1j	1	4.7 k Ω
LED	LED1j	1	LED indicador
LED	LED2j	1	LED indicador

4. Lista de equipo

Cuadro 2: Lista de equipo

Equipo	Modelo	Número de placa
Fuente DC Programable	RIGOL DP832	—
Generador de funciones	BK PRECISION 4011A	—
Multímetro Digital	RIGOL DM3058E	—
Osciloscopio Digital	TEKTRONIX TDS1012	—
Fuente DC Digital	Agilent E3630A	—

5. Diseño

Todos los amplificadores operacionales utilizados en las etapas a continuación corresponden a LM358, todos los transistores NPN corresponden a 2N3904, y todos los diodos corresponden a 1N4001.

5.1. Circuito oscilador en cuadratura

Se escogió utilizar el oscilador en cuadratura original que se muestra en la [Figura 2](#). De forma similar a como fue realizado en el experimento #2 del curso, este circuito presenta realimentación positiva, a partir la cual se busca satisfacer el criterio de Barkenhausen para que el circuito genere una oscilación mantenida. Sean R_1 , C_1 , R_2 , C_2 , y R_3 , C_3 los pares de componentes RC en los lazos de retroalimentación negativa de los amplificadores operacionales que se muestran en la [Figura 2](#), así como el circuito RC que realimenta una etapa de amplificación con otra. Se debe satisfacer la condición (3) para que se genere una oscilación mantenida en el circuito [3], asumiendo que la salida del circuito es la salida de la primera etapa de amplificación del circuito (COS).

$$R_1C_1 = R_2C_2 = R_3C_3 \quad (3)$$

La frecuencia de oscilación del circuito viene dada por la ecuación (4). Esta se escoge que tenga un valor de 260 Hz.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

Donde RC es la multiplicación de los valores de alguno de los pares RC del circuito, los cuales todos deben de tener el mismo valor, idealmente. Adicionalmente, debido a que el circuito tiene una segunda etapa de amplificación que consiste de un amplificador integrador, se obtiene una salida adicional correspondiente a la integral de la primera salida de tensión. Debido a que la primera salida corresponde a una señal coseno, la segunda salida corresponderá a una señal seno. Gracias a esto se obtienen dos señales sinusoidales desfasadas $\pi/2$ una con respecto a la otra.

Se simuló este oscilador en LTSpice, dando una tensión inicial distinta de 0 V a los capacitores en el circuito, lo cual permite que arranque la oscilación mantenida en un ambiente controlado como lo es el software de simulación. El circuito simulado se muestra en la [Figura 14](#), mientras que ambas salidas del circuito se muestran en la [Figura 15](#).

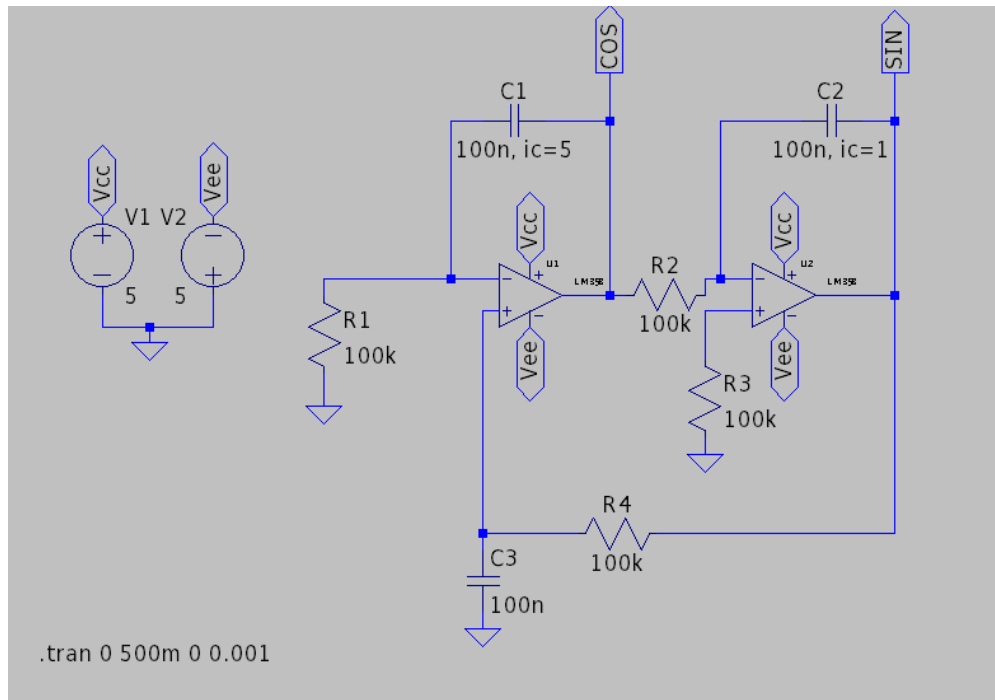


Figura 14: Oscilador en cuadratura simulado en LTSpice

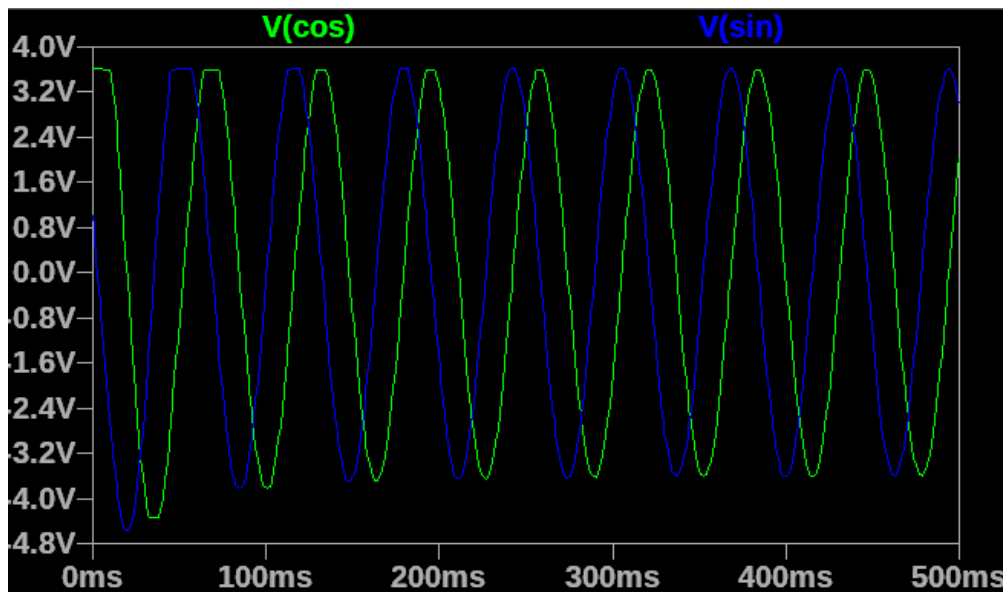


Figura 15: Salidas del oscilador en cuadratura simulado en LTSpice

Como se puede observar en la [Figura 15](#), ambas señales están desfasadas por $\pi/2$, siendo este el resultado esperado de la simulación. Tomando en cuenta la experiencia adquirida en el segundo laboratorio del curso con circuitos osciladores, se escoge que las resistencias R_1 , R_2 , y R_3 se implementen por medio de trimmers de 250kΩ cada una, T_1 , T_2 , y T_3 , con el propósito de ajustar lo mejor posible la condición de oscilación (3), ya que puede ser afectada por múltiples aspectos reales del circuito, como por ejemplo, la tolerancia en las capacitancias, la cual suele ser alta.

5.2. Circuitos desfasadores de 360° y comparadores ajustables

Estos circuitos no fueron modificados con respecto al diseño original [1]. Se simuló solo uno de ellos, debido a que ambos circuitos son equivalentes uno con respecto al otro, siendo la única diferencia la fase de la entrada sinusoidal aplicada. Debido a que no se pudo encontrar el modelo de un potenciómetro en LTSpice, se simularon por medio de resistencias individuales. Las resistencias variables implementadas por medio del potenciómetro de doble gang fueron ajustadas a $1\text{ k}\Omega$ para poder observar un desfase en la salida del circuito desfasador con respecto a la entrada. Adicionalmente, se ajustó el otro potenciómetro a su valor central para que se genere una señal cuadrada de aproximadamente el 50 % del ciclo del trabajo en la salida del comparador. El circuito simulado se muestra en la Figura 16, mientras que la señal de entrada, señal desfasada, y señal desfasada cuadrada se muestran en la Figura 17.

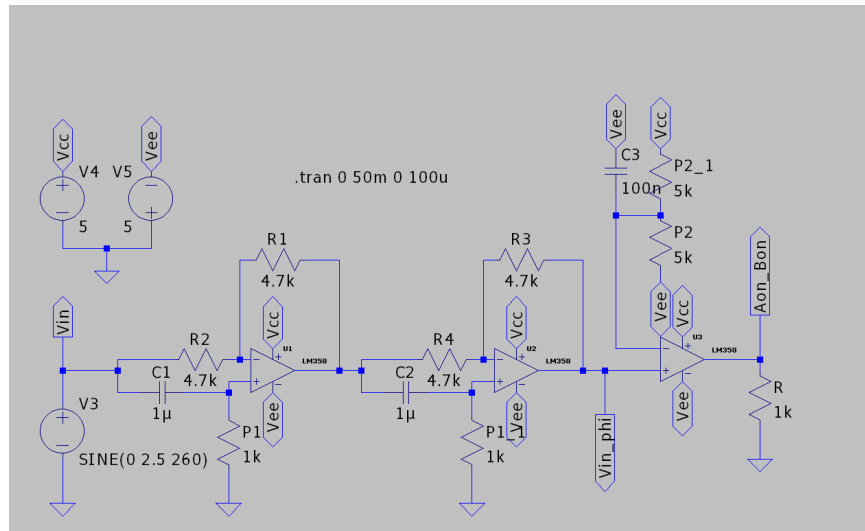


Figura 16: Circuito desfasador de 360° y comparador ajustable simulado en LTSpice

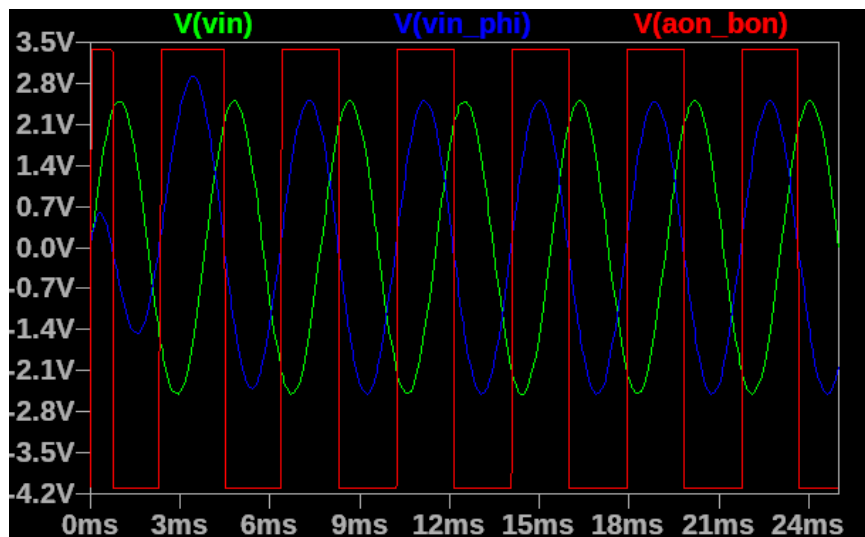


Figura 17: Entrada, señal intermedia, y salida del circuito desfasador de 360° y comparador ajustable simulado en LTSpice

Como se puede observar en la [Figura 17](#), el comportamiento de las señales del circuito es el esperado. Un detalle importante que se debe tomar en cuenta en la forma que este circuito desfasa la señal de entrada es que se realiza de forma lineal debido a la función \tan^{-1} que aparece al obtener la respuesta en frecuencia de cada desfaseador de 180° , por lo que el movimiento de las paletas no será simétrico con respecto a la posición de las paletas en la pantalla en algún momento.

5.3. Circuito con comparador y flip flop

Se simuló este circuito en LTSpice, el cual se muestra en la [Figura 18](#). Las señales de entrada y salida del circuito se muestran en la [Figura 19](#).

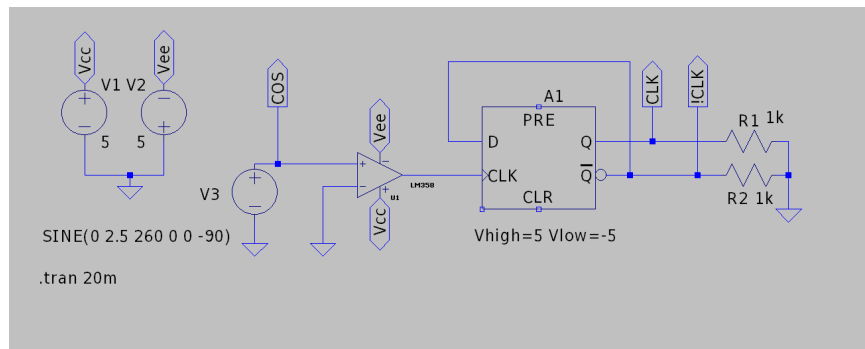


Figura 18: Circuito con comparador y flip flop simulado en LTSpice

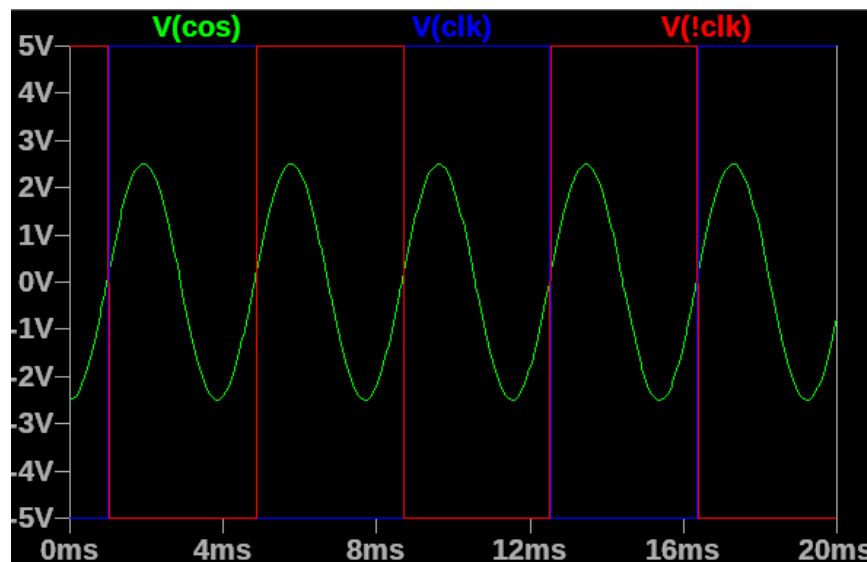
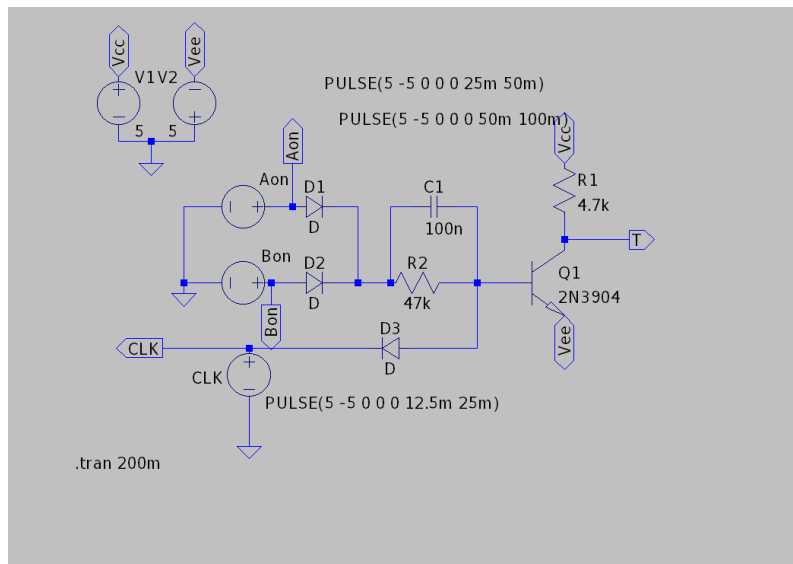


Figura 19: Entrada y salida del circuito con comparador y flip flop simulado en LTSpice

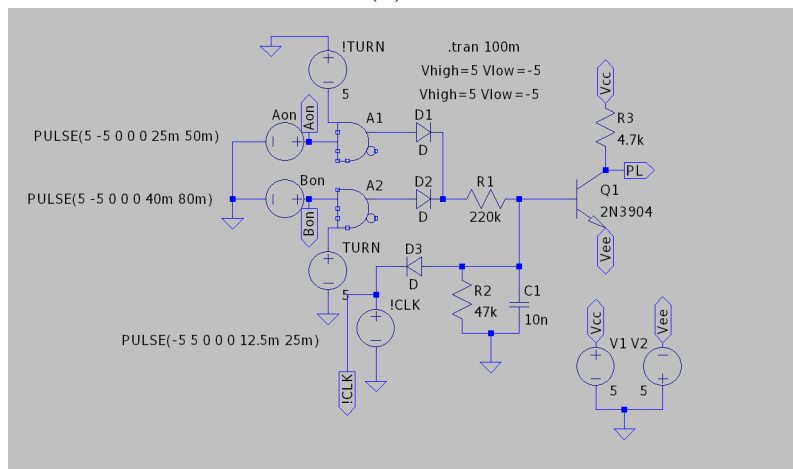
Como se puede ver en la [Figura 19](#), la señal cuadrada generada posee un ciclo de trabajo de aproximadamente el 50 % con la mitad de la frecuencia de la señal sinusoidal aplicada a la entrada, así como se obtienen las señales CLK y \overline{CLK} con las amplitudes adecuadas.

5.4. Circuito para el control de dibujo de paleta

Se simularon ambos circuitos correspondientes a esta etapa en LTSpice. Dichos circuitos han sido diseñados para obedecer las ecuaciones combinacionales (1) y (2). Para simular A_{on} y B_{on} , se colocaron señales cuadradas con los niveles lógicos del circuito de periodo y ciclo de trabajo cercano, pero diferente, al de la señal CLK y \overline{CLK} . Esto con el propósito de simular varias de las combinaciones binarias entre A_{on} , B_{on} , CLK y \overline{CLK} , para verificar que corresponden al valor correcto de T y PL de acuerdo a las ecuaciones combinacionales que implementan estos circuitos. Una simulación más rigurosa implicaría analizar toda la tabla de verdad de estos circuitos para asegurar que el circuito corresponde adecuadamente ante cualquier combinación de las señales de entrada. Sin embargo, debido a cuestiones de tiempo y simplicidad, no se realizará este tipo de simulación. Estos circuitos se muestran en la Figura 20, mientras que las formas de onda obtenidas de ambos circuitos se muestran en la Figura 21.



(a): T



(b): PL

Figura 20: Circuito para el control de dibujo de paleta simulado en LTSpice

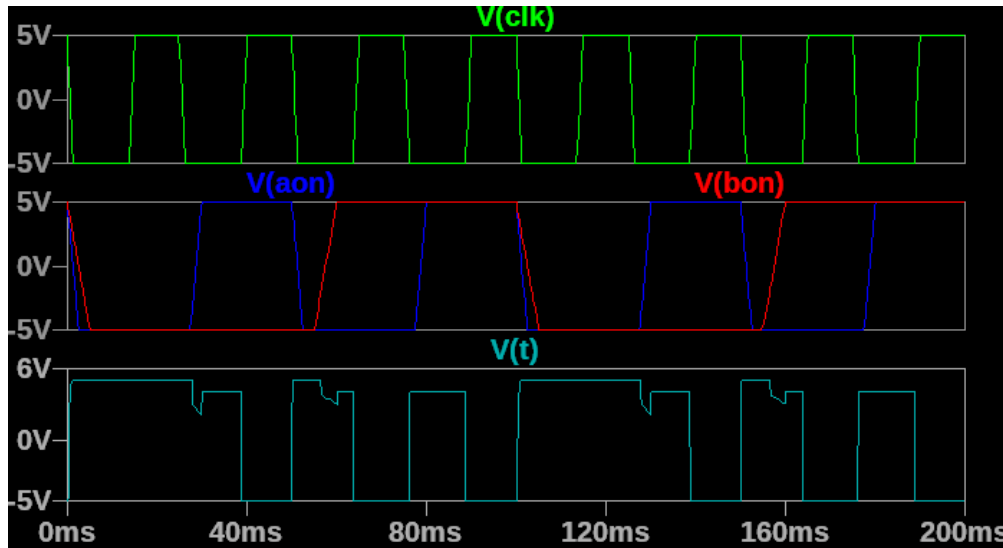
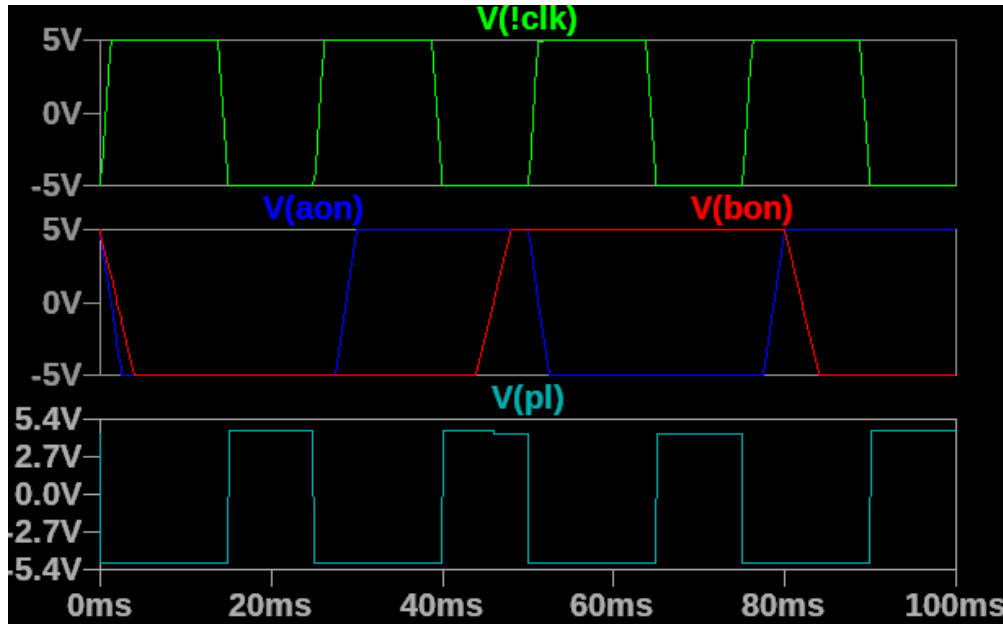
(a): T (b): PL

Figura 21: Entrada y salida del circuito con comparador y flip flop simulado en LTSpice

Se tomaron las combinaciones binarias en las formas de onda que se muestran en la [Figura 21](#) y se verificaron por medio de las ecuaciones combinacionales (1) y (2). Se comprobó que el circuito sí realiza las operaciones lógicas correctamente, así como posee los niveles lógicos adecuados. Las señales de salida T y PL presentan ciertas distorsiones ante el cambio de señales. Esto es provocado por la tensión V_{ce} del transistor, la cual no se mantiene constante cuando las señales de entrada cambian, pero se preserva un nivel lógico en la salida. Esto puede causar problemas si las señales cambian con alta frecuencia, pero para efectos de este circuito, no resultará ser un gran problema debido a la baja frecuencia producida por el oscilador en cuadratura, del cual se basan el resto de señales periódicas del circuito.

5.5. Circuitos multiplexores analógicos 2 a 1, sumadores

Este circuito no fue simulado en LTSpice debido a que no se encontró un modelo adecuado del componente CD4066 para LTSpice. Las salidas de estos circuitos vienen dadas por las ecuaciones (5) y (6).

$$ScopeX = \begin{cases} \cos(\omega t), & T = 0 \\ \cos(\omega t) \frac{P_1}{R_1 + P_1} + BallX \frac{R_1}{R_1 + P_1}, & T = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$ScopeY = \begin{cases} \sin(\omega t), & T = 0 \\ \sin(\omega t) \frac{P_1}{R_2 + P_1} + BallY \frac{R_2}{R_2 + P_1}, & T = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Donde $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ y P_1 se implementa por medio de un potenciómetro de doble gang de valor $10 \text{ k}\Omega$ con el propósito de ajustar simétricamente el tamaño en X y en Y del tamaño de la pelota. De esta manera, es posible multiplexar las señales de la pelota y la paleta, siendo la pelota dibujada en los ciclos bajos de CLK y la paleta dibujada en los ciclos en alto de la misma señal, en caso de que sea necesario dibujarla de acuerdo a las señales A_{on} y B_{on} . Adicionalmente, es posible incrementar el tamaño de la pelota desde un punto en la pantalla XY del osciloscopio hasta un tamaño equivalente al círculo del cual se extraen los arcos que corresponden a las paletas.

5.6. Circuito con flip flop y circuito RC

Este circuito fue simulado en LTSpice. Los potenciómetros se implementarán por medio de un potenciómetro de doble gang de $10 \text{ k}\Omega$ con el propósito de ajustar de forma vectorial la velocidad de la pelota, y no cada componente por aparte con potenciómetros distintos. La constante de tiempo mínima y máxima ya ha sido diseñado para estos circuitos, de tal forma que las tensiones de salida del circuito vienen dadas por las ecuaciones (7) y (8).

$$BallX = 10 \left(1 - e^{\frac{-t}{R_1 + P_1}} \right) - 5 \quad (7)$$

$$BallY = 10 \left(1 - e^{\frac{-t}{R_2 + P_1}} \right) - 5 \quad (8)$$

Donde $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$. En la [Figura 22](#) se muestra el circuito simulado, y en la [Figura 23](#) ambas señales de salida de estos circuitos, a los cuales se les aplicó una señal de entrada cuadrada.

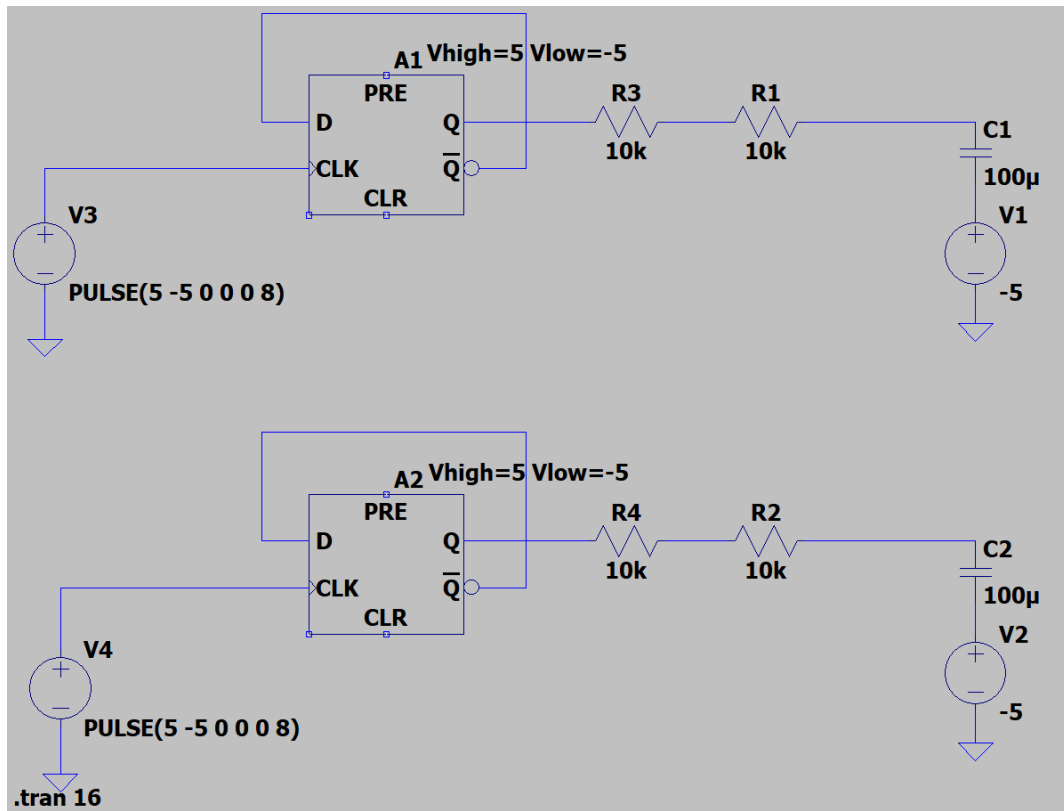


Figura 22: Circuito con flip flop y circuito RC simulado en LTSpice

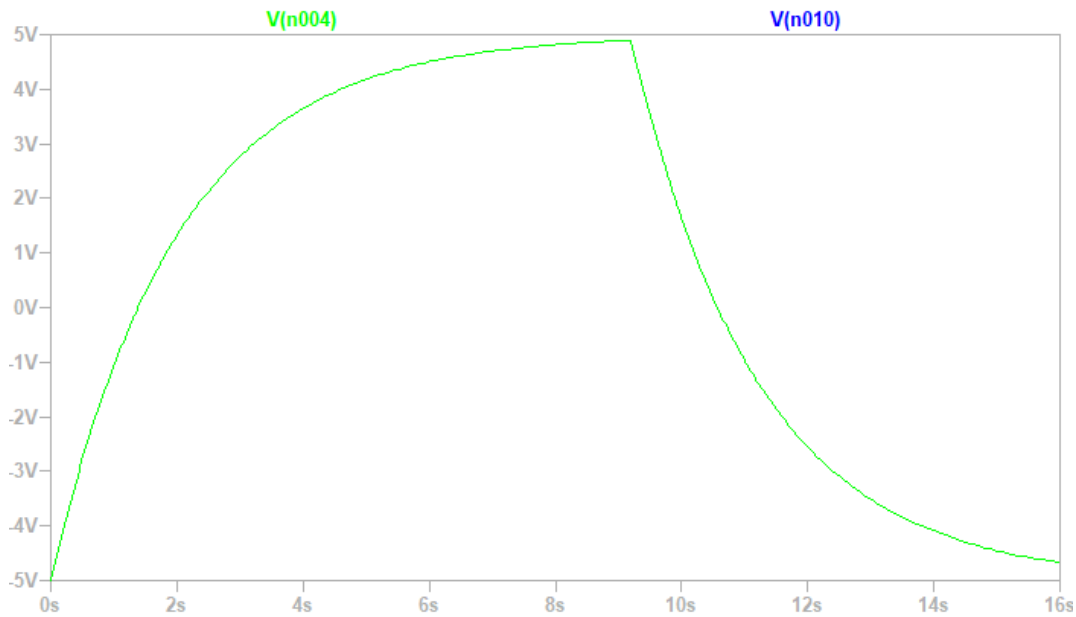


Figura 23: Graficas de salida con las señales *BallX* y *Bally* para el circuito con flip flop y circuito RC simulado en LTSpice

Como se puede ver en la [Figura 23](#), inicialmente el capacitor empieza a cargarse debido a que $Q = 5\text{ V}$, y cuando llega el siguiente flanco positivo de la señal de entrada, la salida del flip flop

conmuta, y el capacitor se empieza a descargar. Debido a que ambos flip flops deben de poseer niveles lógicos de 5 V para un 1 lógico y -5 V para un 0 lógico, se tuvo que buscar un modelo de flip flop que admitiera esto. No se encontraron flip flops D que logaran esto en tiendas de electrónica costarricenses, pero sí se encontraron flip flops tipo JK, CD4027BE, disponible en la página [MicroJPM](#). Estos flip flops serán alambrados como un flip tipo T con las entradas J y K cortocircuitadas y conectada a 5 V, lo cual cumple la misma función que el flip flop D del diseño original.

5.7. Circuitos comparadores de ventana

Como ya se había dicho antes, el componente CD4066c no existe en LTspice, por lo tanto, no se logró simular esta etapa. Esta etapa controla la señal *BOUNCE*, y obedece la ecuación por partes (9).

$$BOUNCE = \begin{cases} 1 & ScopeX = \cos(\omega t) \text{ y } ScopeY = \sin \omega t \text{ y } PL = 0 \\ 0 & PL = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Es decir, si la posición de la pelota llega a ser la misma que la de las paletas, se levanta la señal *BOUNCE* para poder determinar si estaba debe rebotar de acuerdo a la circuitería de control correspondiente.

5.8. Circuito comparador de ventana para límites horizontales y verticales

Este circuito fue simulado en LTSpice. Para ambos comparadores, uno para los límites horizontales y otro para los límites verticales, se utilizarán potenciómetros de doble gang de valor 1 k Ω para ajustar las tensiones de umbral de ambos comparadores de forma simétrica, lo cual permite que se ajusten los límites también de forma simétrica. El circuito simulado se muestra en la [Figura 24](#). La simulación consistió en aplicar una señal rampa que barriese todas las posibles tensiones que se pueden aplicar a la entrada del comparador, desde -5 V hasta 5 V, y analizar el comportamiento de la señal de salida. Las señales simuladas se muestran en la [Figura 25](#). Asumiendo que la ventana de tensiones de los comparadores de ventana son $V_x = [V_L^x, V_H^x]$ y $V_y = [V_L^y, V_H^y]$, los comparadores de ventana por construir responden de acuerdo a las ecuaciones (10) y (11).

$$XR = \begin{cases} 1, & BallY \in V_y \\ 0, & BallY \notin V_y \end{cases} \quad (10)$$

$$YR = \begin{cases} 1, & BallX \in V_x \\ 0, & BallX \notin V_x \end{cases} \quad (11)$$

Como se puede ver en la [Figura 25](#), la tensión de salida del circuito se encuentra en alto únicamente cuando la tensión de entrada se encuentra dentro de ciertas tensiones de umbral. Para efectos de esta simulación, se simuló por medio de resistencias a que el potenciómetro estuviera en su posición central, de tal manera que las tensiones de umbral vienen dadas por $V_H = 2.5$ V y $V_L = -2.5$ V.

Esto confirma el correcto funcionamiento del comparador de ventana. Solo es necesario simular uno de los comparadores de ventana, ya que ambos circuitos son una copia uno del otro, con diferentes tensiones de entrada.

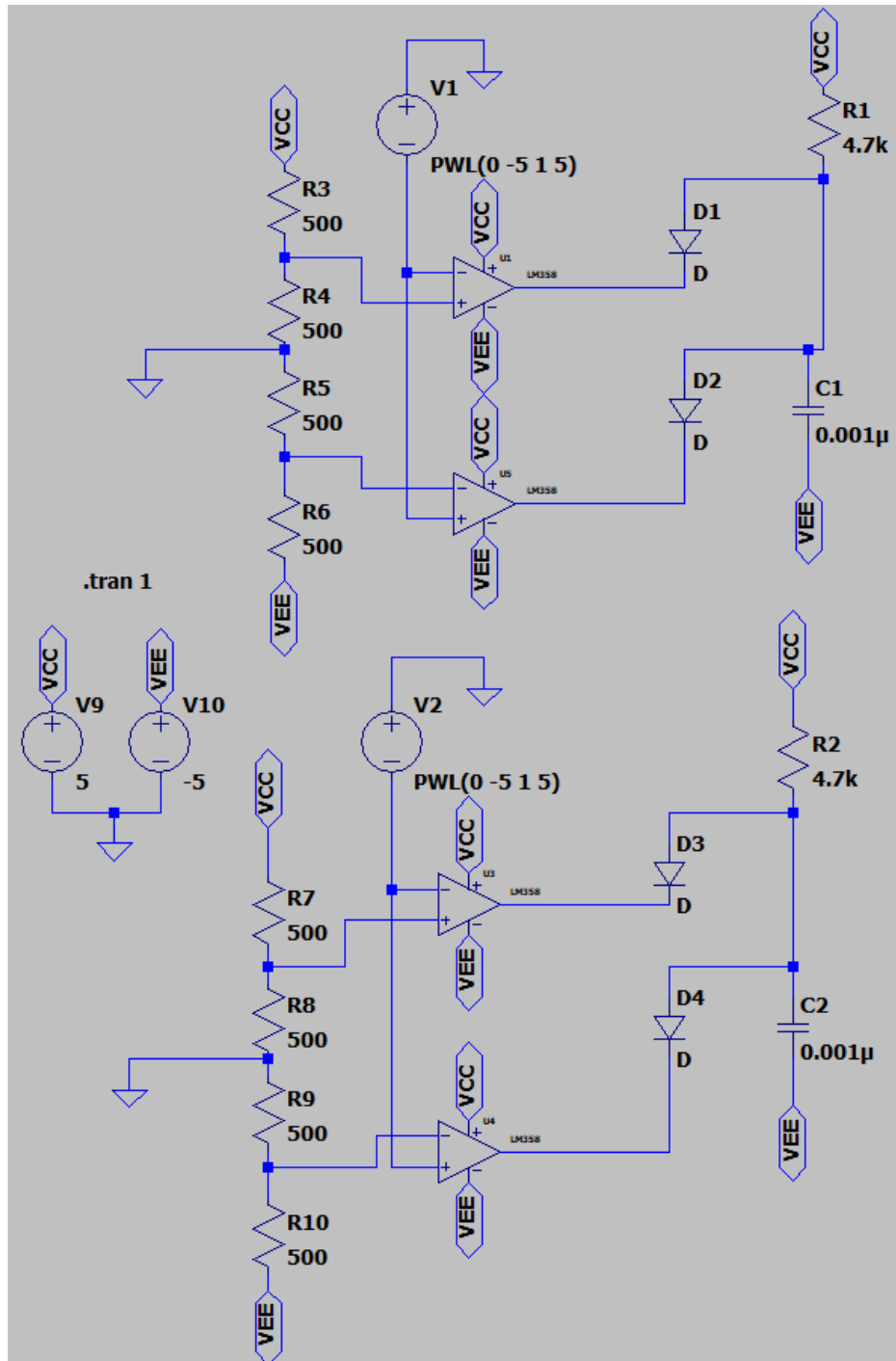


Figura 24: Circuitos comparadores de ventana para los límites horizontales y verticales de la pantalla del juego simulados en LTSpice

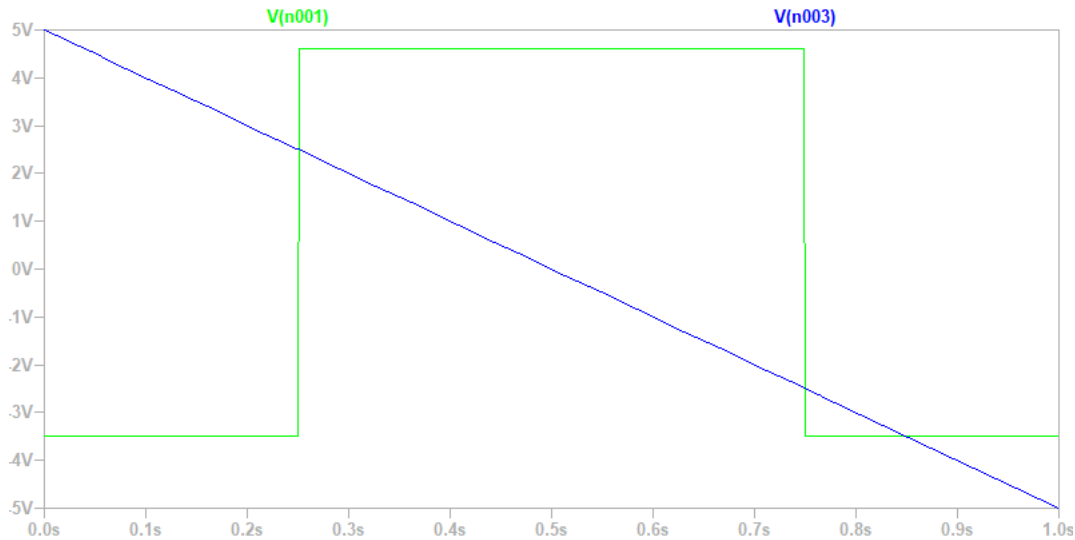


Figura 25: Entrada y salida del circuito comparador de ventana para los límites horizontales simulado en LTSpice

5.9. Circuito para el control de dirección de la pelota

Este circuito permite determinar las señales $XREV$ y $YREV$, cuyo flanco positivo invierte la dirección de desplazamiento de la pelota. Esto sucede si se detecta un rebote a partir de la señal $BOUNCE$ y se activan las señales XR o YR . Este circuito cuenta con un botón para posicionar la pelota en la posición central de la pantalla del osciloscopio. Debido a que no se encontró una forma de simular el pulsado de un botón en LTSpice en un momento en particular, no se simuló esta parte. El circuito simulado se muestra en la [Figura 26](#). Se simuló el circuito con la señal $BOUNCE$ con un valor constante, y una onda cuadrada en XR y YR . Las señales de entrada y salida del circuito se muestran en la [Figura 27](#). Como se puede ver en la gráfica, la señal $XREV$ reacciona de la misma manera que la entrada aplicada al circuito, gracias a que la compuerta AND se convierte transparente una vez la señal $BOUNCE$ está en alto, mostrando el correcto funcionamiento del circuito. Las señales de salida del circuito obedecen las ecuaciones (12) y (13).

$$XREV = \begin{cases} 1, & XR \cdot BOUNCE + Pulsador = 1 \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (12)$$

$$YREV = \begin{cases} 1, & YR \cdot BOUNCE + Pulsador = 1 \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (13)$$

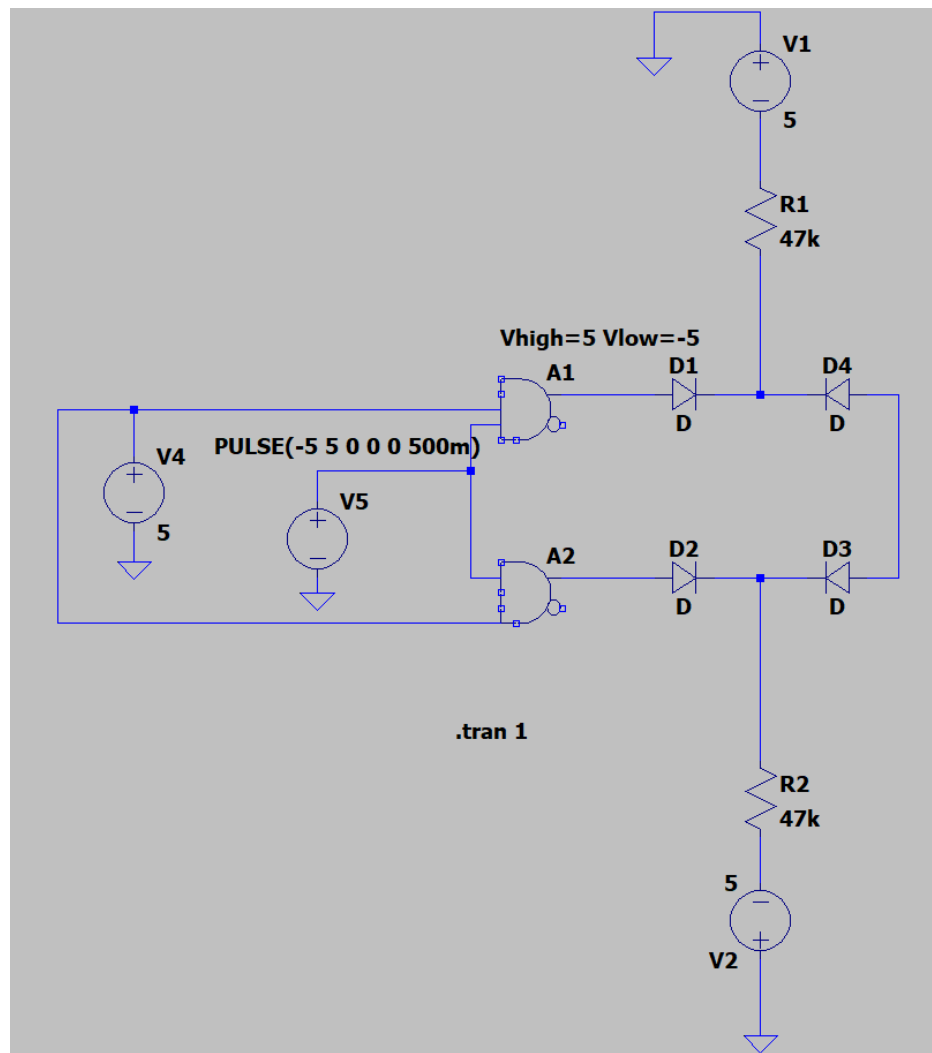


Figura 26: Circuito para el control de direccion de la pelota

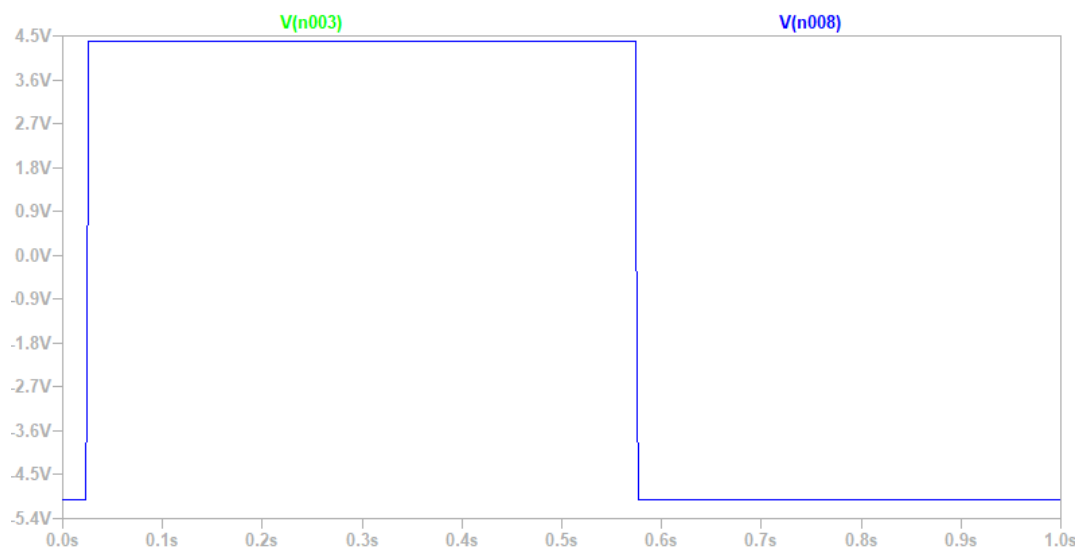


Figura 27: Circuito para el control de direccion de la pelota Graficas de XREV Y YREV

5.10. Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores

Este circuito fue simulado en LTSpice, aplicando una señal cuadrada a la entrada. Se verificó que las señales $TURN$ y \overline{TURN} tuvieran el comportamiento adecuada, siendo cada una de estas una el inverso de la otra. En la [Figura 28](#) se muestra el circuito simulado, y habiendo aplicado una señal cuadrada a la entrada del circuito, se muestra en [Figura 29](#) las señales de salida del circuito. Como se puede observar, se obtienen las salidas complementarias, mostrando el correcto funcionamiento del circuito.

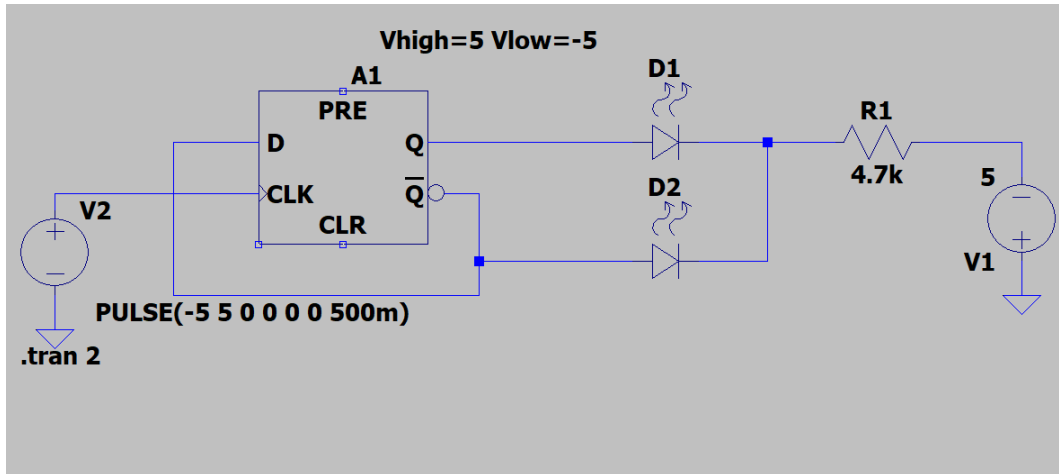


Figura 28: Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores

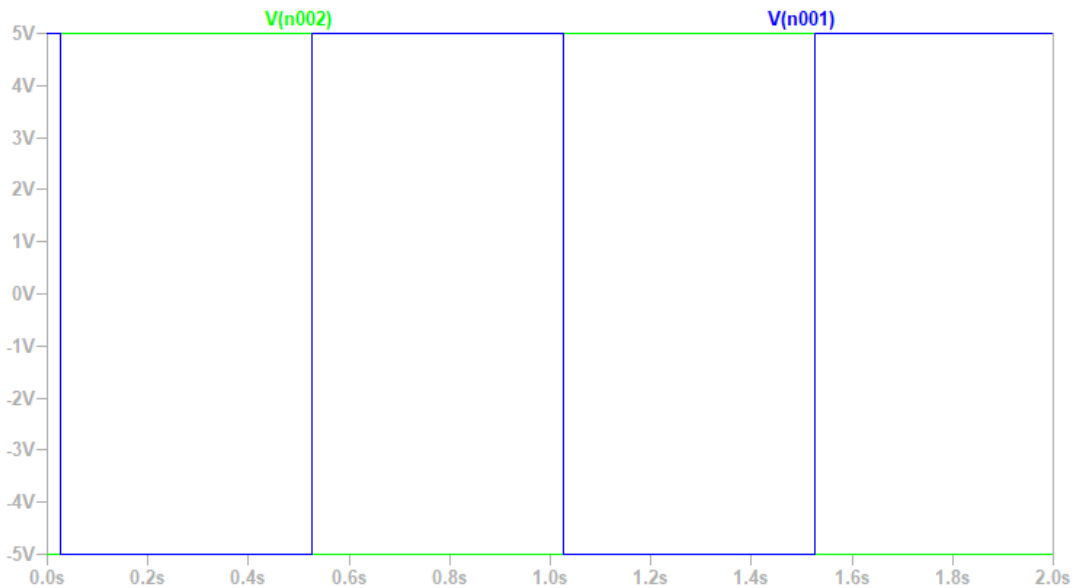


Figura 29: Circuito para el control de turnos y LEDs indicadores, Grafica de $TURN$ y \overline{TURN} negado.

5.11. Circuito para efectos de sonido

Para esta etapa se decidió qué debido a que este proyecto tiene muchas etapas y esta etapa no agrega funcionalidad al circuito. Se decidió quitarla del experimento, y si existiera tiempo adicional después de que todas las etapas estén construidas, se reconsiderará construirla.

Procedimiento

Este procedimiento describe los pasos necesarios para la implementación del circuito, y se omite la última etapa que incluye el altavoz (efectos de sonido).

1. Preparación del Área de Trabajo y Componentes

- Reúne todos los componentes listados en la sección de *Lista de componentes* del documento, incluyendo amplificadores operacionales, flip-flops, comparadores, resistencias, capacitores, potenciómetros y el multiplexor analógico CD4066B.
- Verifica el funcionamiento del osciloscopio con modo XY, asegurándote de que esté correctamente calibrado.
- Organiza el equipo de medición como fuentes de alimentación DC, multímetros y generadores de señales si es necesario.

2. Construcción del Oscilador en Cuadratura

- Ensambla el circuito oscilador en cuadratura según el diseño proporcionado. Este circuito debe generar dos señales sinusoidales desfasadas 90° (y).
- Asegúrate de que las condiciones de Barkhausen se cumplan: $R_1C_1 = R_2C_2 = R_3C_3$ y $A\beta = 1$.
- Verifica las salidas en el osciloscopio: una señal debería aparecer en el eje X y la otra en el eje Y, generando un círculo perfecto en el modo XY del osciloscopio.

3. Implementación de los Circuitos Desfasadores de 360° y Comparadores Ajustables

- Conecta los desfasadores de 360° utilizando potenciómetros de doble gang para ajustar la posición de las paletas A y B. Este circuito permitirá modificar el ángulo de las paletas en la pantalla.
- Posteriormente, conecta los comparadores ajustables que generarán ondas cuadradas (Aon y Bon) para controlar el tamaño de las paletas.
- Verifica que al ajustar los potenciómetros, las paletas cambien de tamaño y posición de manera simétrica.

4. Montaje del Sistema de Control de Dibujo y Multiplexado

- Ensambla el circuito comparador con flip-flop que genera la señal de reloj (CLK) y su inversa ($\overline{\text{CLK}}$), necesarias para alternar entre el dibujo de la pelota y las paletas.
- Implementa el multiplexor analógico 2 a 1 utilizando el CD4066B. Este circuito seleccionará si se dibujan las paletas o la pelota en función de la señal .
- Configura las señales de control PL para gestionar los rebotes de la pelota contra las paletas.

5. Control del Movimiento de la Pelota

- Conecta el circuito flip-flop y el circuito RC para controlar la dinámica de la pelota. Este circuito regula la velocidad de la pelota y su dirección, ajustada mediante potenciómetros que controlan la constante de tiempo .
- Implementa los comparadores de ventana para detectar colisiones entre la pelota y las paletas. Verifica que la señal *BOUNCE* se active correctamente en caso de colisión.

6. Detección de Límites y Control de Direcciones

- Ensambla los comparadores de ventana que detectan los límites horizontales y verticales de la pantalla. Estas señales determinarán si la pelota debe rebotar al llegar al borde.
- Integra el circuito de control de dirección que invertirá las señales *Xrev* y *Yrev*, cambiando la trayectoria de la pelota en función de las colisiones detectadas.

7. Control de Turnos y Señalización con LEDs

- Conecta el circuito flip-flop para gestionar los turnos de los jugadores. La señal *TURN* alternará entre los jugadores cada vez que la pelota rebote en una paleta.
- Añade LEDs indicadores para mostrar de quién es el turno actual, asegurando que un LED se apague y otro se encienda tras cada rebote.

8. Pruebas Finales y Ajustes

- Conecta todas las etapas del circuito y verifica el funcionamiento global en el osciloscopio. Asegúrate de que las paletas y la pelota se dibujen correctamente y que los controles de posición, tamaño y velocidad funcionen según lo esperado.
- Ajusta las constantes de tiempo y las configuraciones de los comparadores para optimizar el rendimiento del circuito.

6. Referencias

- [1] J. Stanley. “Analog Oscilloscope Pong,” Electronixandmore. (2024), dirección: <https://www.electronixandmore.com/projects/scopepong/index.html>.
- [2] R. Mancini, *Op Amps for Everyone Design Guide (Rev. B)*. 2002, Advanced Analog Products.
- [3] S. Franco, *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*, 4th. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015, ISBN: 978-0-07-802816-8.