

Circuitos Electrónicos 1

Laboratorio 3: Aplicaciones de Amplificadores Operacionales

Colarieti Sergio, `scolarieti2@gmail.com`

Vazquez Leonardo, `leonardo.vazquez@alumnos.fi.mdp.edu.ar`

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

Índice

1. Resolución teórica	4
1.1. Introducción	4
1.2. Generador de onda cuadrada	4
1.3. Integrador	7
1.4. Rectificador de onda completa	8
2. Simulación	12
2.1. Generador de onda cuadrada	12
2.2. Integrador	14
2.3. Rectificador de onda completa	14
3. Desarrollo de Laboratorio	16
3.1. Montaje del circuito	16
3.2. Generador de onda cuadrada	16
3.3. Integrador	17
3.4. Rectificador de onda completa	18
4. Conclusiones	20
5. Referencias	21

Resumen

En el presente trabajo, se propone diseñar y elegir los valores de los componentes de un circuito basado en amplificadores operacionales bajo ciertas condiciones de salida preestablecidas. El circuito consta de tres etapas: La primer etapa es un generador de onda cuadrada basado en un oscilador de relajación, la segunda etapa es un Integrador y la tercer etapa es un Rectificador de Onda Completa. Además, se propone efectuar las mediciones de tensión tanto teóricamente y por simulación, como de manera experimental.

1. Resolución teórica

1.1. Introducción

El circuito propuesto de la figura 1 consta de tres etapas: Generador de onda cuadrada, Integrador, y Rectificador de onda completa. Las especificaciones que se piden son:

- $v_a = 14.8V_{pp}$
- $f(v_a) = 100Hz$
- $4mA < I(R_3) < 5mA$
- $v_b = 2V$

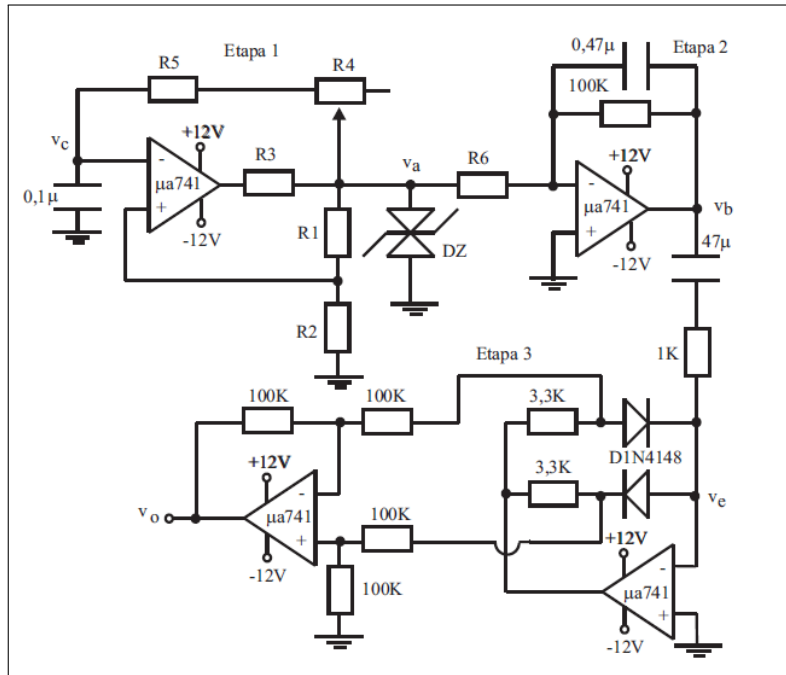


Figura 1: Circuito propuesto de estudio.

1.2. Generador de onda cuadrada

El proposito de este bloque es generar un oscilador de relajación utilizando el amplificador operacional como comparador, mediante realimentación positiva. El primer paso consiste en determinar las tensiones de inversa y de directa de cada uno de los diodos zener. Si la corriente es suficiente, la tensión pico a pico en V_a es $14.8V_{pp}$. Para cada semiciclo la tensión de salida es:

$$\hat{V}_a = \frac{14.8V}{2} = V_z + V_\gamma = V_A \quad (1)$$

Se eligen dos diodos zener iguales con $V_z = 6.8V$ y $V_\gamma = 0.6V$. Luego, si $R_1 = R_2 = 10k\Omega$, entonces a la entrada no inversora del amplificador operacional se tiene un divisor resistivo:

$$V^+ = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot V_z + V_\gamma = 3.7V \quad (2)$$

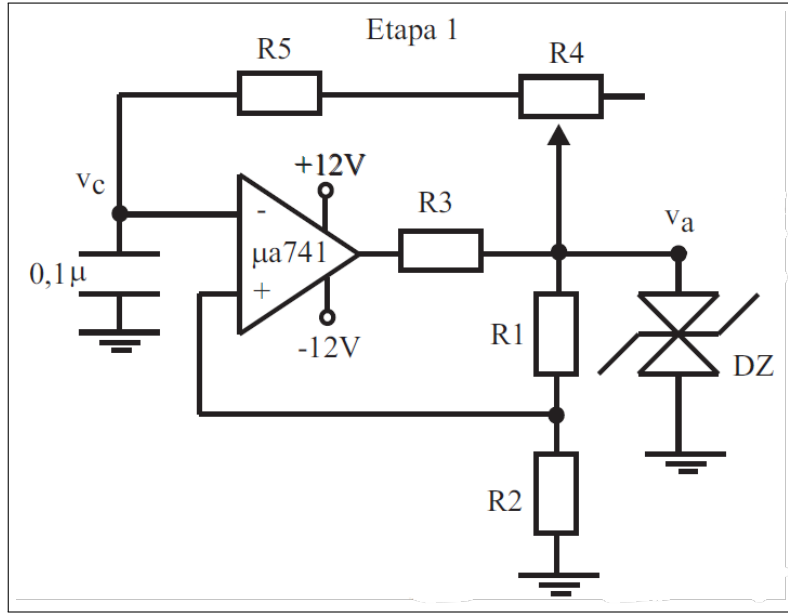


Figura 2: Circuito de la etapa 1.

Si la salida del amplificador operacional es $+V_{cc} = 15V$, ajustando $R = 10k\Omega$ se obtiene una corriente:

$$I(R_3) = \frac{V_{cc} - \hat{V}_a}{R_3} = 4.6mA \quad (3)$$

El cual verifica la condición impuesta de corriente. Con este valor se asegura superar al valor de corriente de codo en inversa, manteniendo su tensión V_z entre sus terminales.

La tensión en el capacitor posee la forma:

$$v_c(t) = v_c(\infty) - (v_c(\infty) - v_c(0)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

Para que funcione el oscilador de relajación, cuando $V^+ > V^-$ la tensión de salida del amplificador operacional es $+V_{cc} = 15V$. En cambio, cuando $V^+ < V^-$ la tensión de salida es $-V_{cc} = -15V$. Para poder variar la entrada inversora se utiliza la carga y descarga del capacitor C que depende de \hat{v}_a , que a su vez depende de la salida del amplificador operacional. En la figura 3 se observan dos curvas correspondientes a $v_a(t)$ y $v_c(t)$.

Para un tiempo $t = \frac{T}{2}$, siendo T el período de oscilación, se busca que la tensión en el capacitor logre disminuir desde $V^- = \frac{V_A}{2} = 3.7V$ hasta $V^- = -\frac{V_A}{2} = -3.7V$, mientras que la tensión \hat{v}_a vale $-V_A = -7.4V$. Luego, al despejar T :

$$v_c\left(\frac{T}{2}\right) = -V_A - \left(-V_A - \frac{V_A}{2}\right) \cdot e^{-\frac{T}{2\tau}} = -\frac{V_A}{2} \quad (5)$$

$$T = 2 \cdot \tau \cdot \ln \frac{1}{3} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

Siendo la frecuencia de oscilación $f = 100Hz$, se despeja la constante de tiempo τ . Pero $\tau = (R_4 + R_5) \cdot C$:

$$R_4 + R_5 = \frac{\tau}{C} \cong 45.5k\Omega \quad (7)$$

Se elige entonces un valor fijo $R_4 = 39k\Omega$ y un valor variable $R_5 = 10k\Omega$ que servirá como punto de ajuste en una futura implementación física.

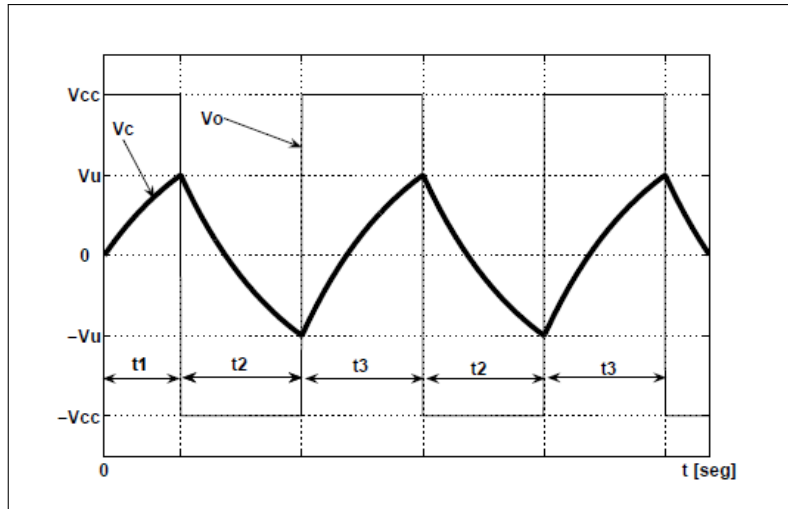


Figura 3: Tensión de salida del AO y tensión del capacitor.

1.3. Integrador

El propósito de este bloque es integrar la onda cuadrada del bloque anterior para poder generar una onda triangular cuyo valor pico a pico es $2V_{pp}$. La implementación de este integrador se observa en la figura 4. Se puede notar que, la función de la resistencia de $100k\Omega$ en paralelo al capacitor es evitar que las corrientes de desajuste del amplificador operacional carguen al capacitor en continua. Esto es muy importante ya que permite al capacitor cargarse y descargarse para poder funcionar en conjunto. En la figura 5 se observa la señal de salida deseada.

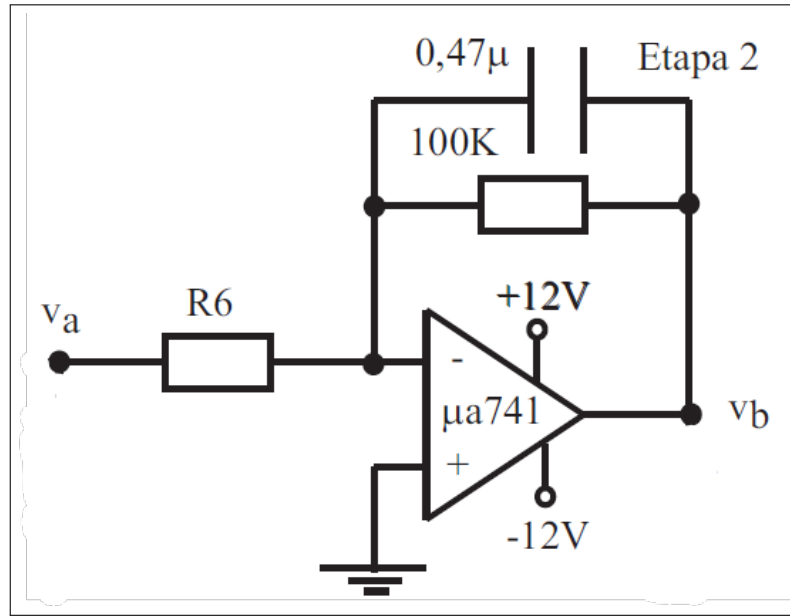


Figura 4: Circuito de la etapa 2.

La salida del integrador está dada por la siguiente expresión:

$$v_b(t) = v_b(t_o) + \int_{t_o}^t -\frac{v_a(\lambda)}{C \cdot R_6} \cdot d\lambda \quad (8)$$

Si la señal $v_b(t)$ varía entre $1V$ y $-1V$ para un tiempo $\frac{T}{2}$, es decir, $2V_{pp}$, entonces:

$$-1V = 1V + \int_0^{\frac{T}{2}} -\frac{V_A}{2 \cdot C \cdot R_6} \cdot d\lambda \quad (9)$$

Despejando la resistencia R_6 :

$$R_6 = \frac{V_A \cdot T}{4(V) \cdot C} \cong 39.3k\Omega \quad (10)$$

Se adopta entonces un valor comercial $R_6 = 39k\Omega$.

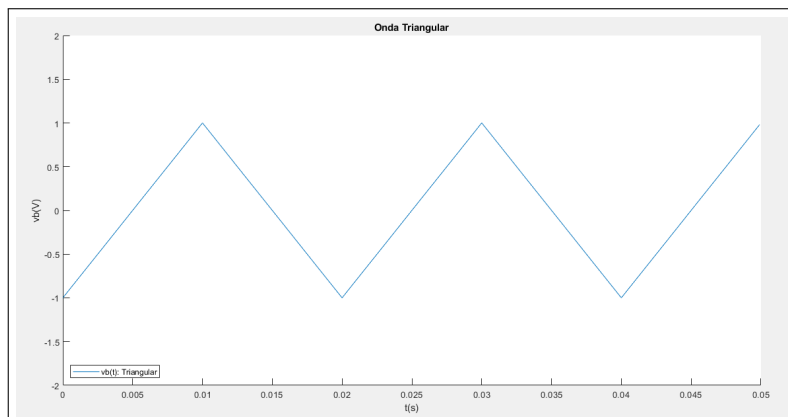


Figura 5: Tensión de salida del integrador. Realizado con MATLAB[1].

1.4. Rectificador de onda completa

La función de este bloque es obtener una replica de la señal de entrada pero en valor absoluto. Para ello se rectifica la señal en forma de corriente para luego convertirla en tensión de salida. La implementación del circuito se observa en la figura 6.

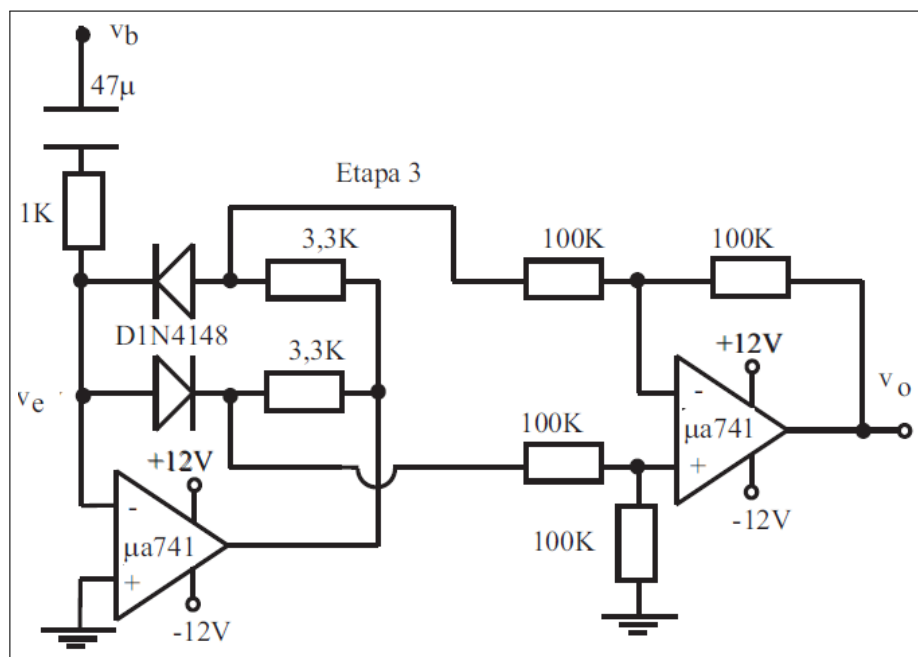


Figura 6: Circuito de la etapa 3.

Para el semiciclo positivo de la señal de entrada v'_b , que corresponde a la tensión v_b pero sin su componente de continua (debido al capacitor de $47\mu f$), se plantean las corrientes i_1, i_2, i_3 e i_4 y las tensiones de nodo V_A y V_B , como se observa en la figura 7

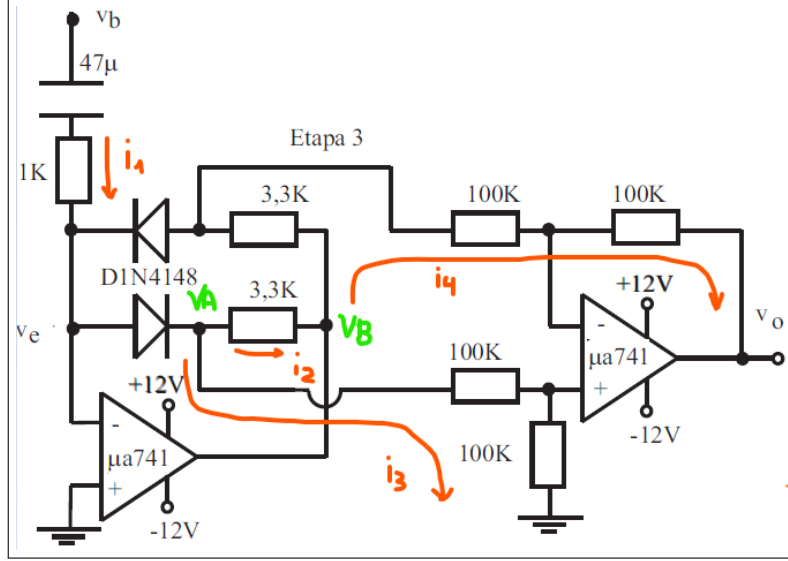


Figura 7: Planteo de corrientes. Semiciclo positivo.

Matemáticamente, se definen las corrientes:

$$i_1 = \frac{v_b}{1k\Omega} \quad (11)$$

$$i_3 = \frac{V^+}{100k\Omega} \quad (12)$$

$$i_2 = i_1 - i_3 \quad (13)$$

$$i_4 = \frac{V^+ - v_o}{100k\Omega} \quad (14)$$

y las tensiones:

$$V_B = V_A - 3.3k\Omega \cdot i_2 \quad (15)$$

$$V_A = V^+ + 100k\Omega \cdot i_3 = 2 \cdot V^+ \quad (16)$$

$$v_o = V_B - 203k\Omega \cdot i_4 \quad (17)$$

Combinando las ecuaciones 17 con 14 y las ecuaciones 16, 15 con 13 se llega a:

$$v_o \cdot \frac{103.3k\Omega}{100k\Omega} = V^+ \cdot \left(1 - 2 + \frac{103.3k\Omega}{100k\Omega} - \frac{3.3k\Omega}{100k\Omega}\right) + v_b \cdot \frac{3.3k\Omega}{100k\Omega} \quad (18)$$

De esta forma, se llega a la siguiente expresión, para $v_b > 0$

$$v_o \cong 3.2 \cdot v'_b \quad (19)$$

De manera análoga, para el semiciclo negativo, se plantean las corrientes i_1, i_2, i_3 e i_4 y las tensiones de nodo V_A y V_B , como se observa en la figura 8.

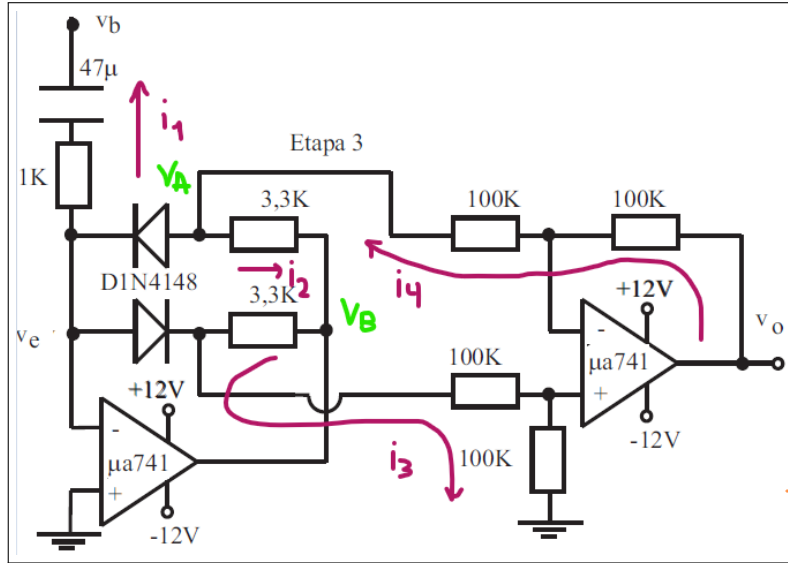


Figura 8: Planteo de corrientes. Semiciclo negativo.

Definiendo:

$$i_1 = -\frac{v_b}{1k\Omega} \quad (20)$$

$$i_3 = \frac{V^+}{100k\Omega} \quad (21)$$

$$i_4 = \frac{V^+ - v_o}{100k\Omega} \quad (22)$$

$$i_2 = i_4 - i_1 \quad (23)$$

y las tensiones:

$$V_B = 2 \cdot V^+ + 3.3k\Omega \cdot i_3 \quad (24)$$

$$V_A = V_B + 3.3k\Omega \cdot i_2 \quad (25)$$

Combinando las ecuaciones 24 con 25 y las ecuaciones 23 y 22 se llega a:

$$v_o \cdot \left(\frac{1}{100k\Omega} + \frac{1}{3.3k\Omega} \right) = V^+ \cdot \left(\frac{1}{100k\Omega} - \frac{3.3k\Omega}{100k\Omega \cdot 3.3k\Omega} \right) - v_b \cdot \frac{1}{1k\Omega} \quad (26)$$

De esta forma, se llega a la siguiente expresión, para $v_b < 0$

$$v_o \cong -3.2 \cdot v'_b \quad (27)$$

Combinando las ecuaciones 27 y 19 se obtiene la salida del rectificador:

$$v_o \cong 3.2 \cdot |v'_b| \quad (28)$$

En la siguiente figura (9) se observa cómo sería la señal resultante de forma cualitativa, cuya frecuencia de oscilación es $f_c = 2 \cdot f_a = 200Hz$.

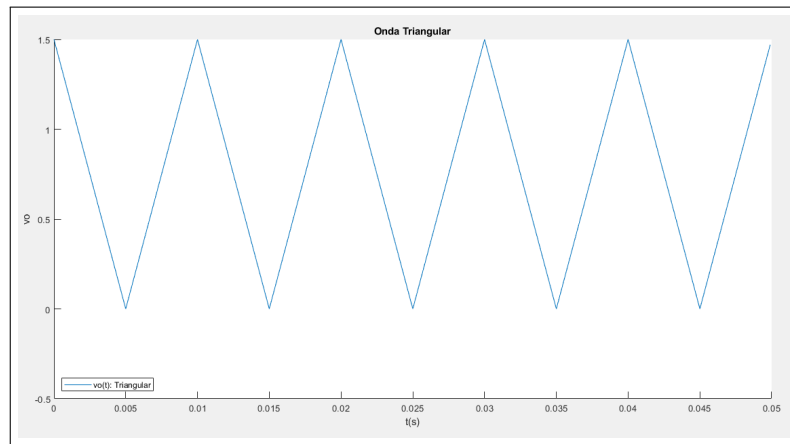


Figura 9: Posible tensión de salida. Realizado con MATLAB[1].

2. Simulación

Utilizando el software LTSpice [2], se realiza el siguiente esquemático para realizar la simulación del circuito.

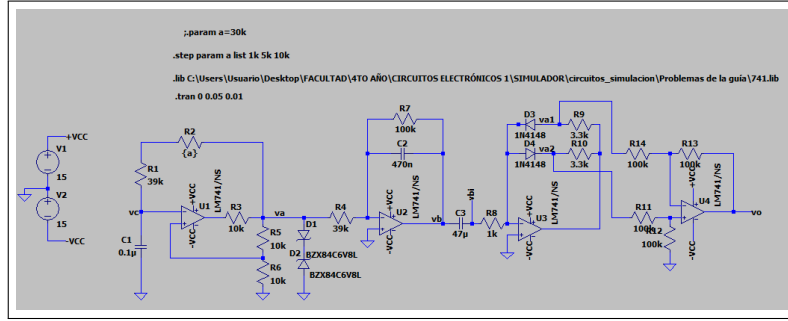


Figura 10: Circuito completo montado en la interfaz del simulador[2].

En esta simulación, así como también en el desarrollo físico del laboratorio, hay algunas diferencias con respecto al desarrollo teórico. En primer lugar, los amplificadores operacionales utilizados, son LM741 [3], es decir, éstos no son ideales. En segundo lugar, los diodos tampoco son ideales: se utiliza el modelo BZX84C6V8L, el cual, si bien tiene una $V_z = 6.8V$, posee una $V_\gamma = 0.8V$ en lugar de $0.6V$.

La simulación se llevo a cabo por etapas, al igual que en el análisis teórico.

2.1. Generador de onda cuadrada

La primera simulación, correspondiente a la primera etapa, corresponde a un generador de onda cuadrada. Como puede observarse en la siguiente figura, la cual corresponde a la tensión en v_a del circuito simulado, ésto se cumple, obteniendo una tensión de $\pm 7.5V$. Comparando con el valor obtenido teóricamente, debido a que los diodos no son ideales, se puede apreciar que v_a es ligeramente mayor al esperado.

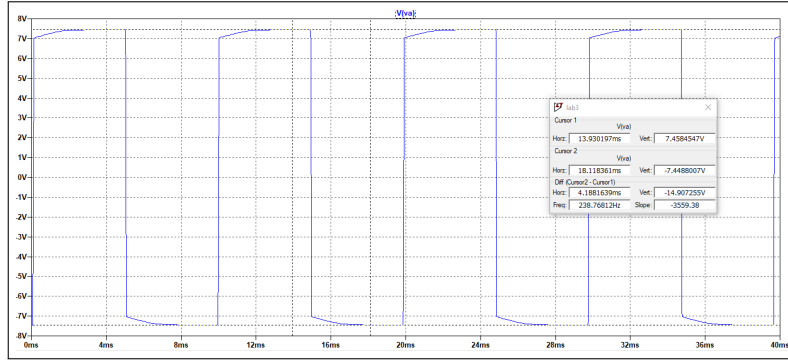


Figura 11: Tensión en v_a .

La tensión v_c , dada por la carga y descarga del capacitor, se encarga de fijar la frecuencia de la señal cuadrada de la salida de esta etapa, tal como puede observarse en la siguiente figura.

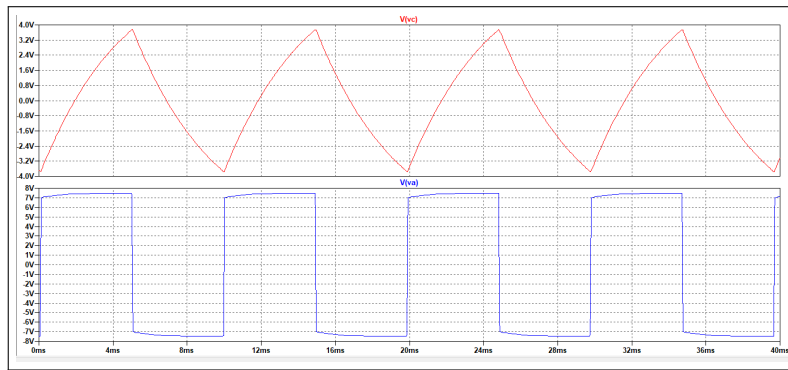


Figura 12: Tensión en el capacitor y en el nodo v_a .

A simple vista se ve que la forma de onda es similar a la vista en la sección teórica de este informe, además de que el valor de tensión en el capacitor es de 3.8 V. Nuevamente, este valor es ligeramente mayor al calculado teóricamente.

Otra prueba que se realiza mediante simulación es la variación del ancho del pulso de salida cuando se varía la resistencia que se ha dejado variable en el análisis teórico, R_2 . Esta resistencia, se encarga de cambiar la constante de tiempo τ del circuito, lo cual se realiza el análisis con tres valores distintos de resistencias, $1k\Omega$, $5k\Omega$ y $10k\Omega$. En la siguiente figura, se puede apreciar como al aumentar el valor de la resistencia R_2 , aumenta el periodo de la señal.

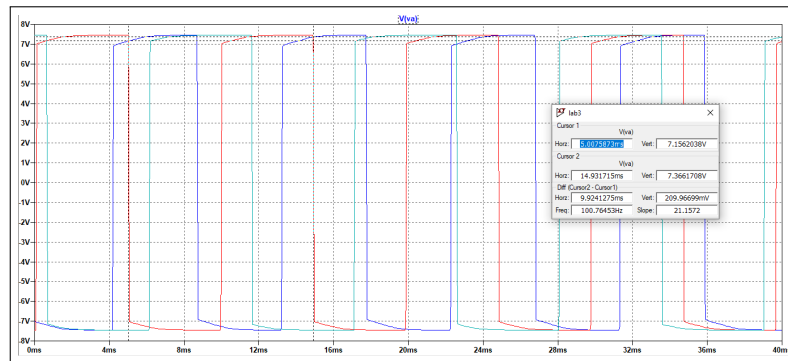


Figura 13: Ajuste de la resistencia variable.

2.2. Integrador

Lo próximo que se observa es el voltaje de salida de la segunda etapa del circuito. Esta etapa corresponde a un integrador, por lo que, al ingresar una onda cuadrada, y como puede apreciarse en la siguiente figura, la salida será una onda triangular. Además se observa que la tensión pico de la señal es de 1.16V. Esto resulta ser un poco mayor al voltaje pedido en las especificaciones de diseño, debido nuevamente a los diodos de la primera etapa.

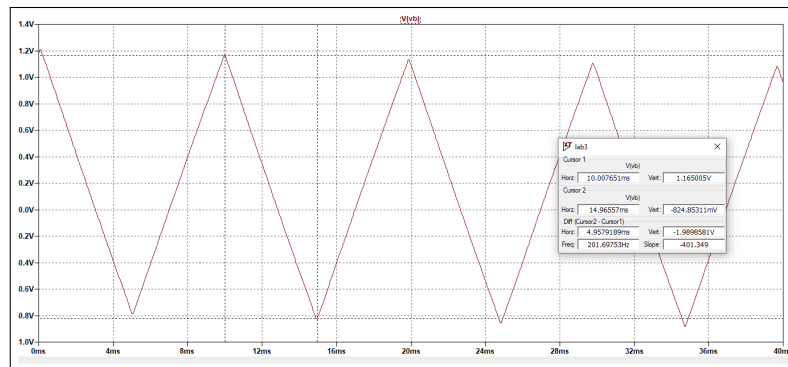


Figura 14: Tensión a la salida del integrador.

2.3. Rectificador de onda completa

Por último se realiza el análisis de la última etapa correspondiente a un rectificador de onda completa. En la siguiente imagen se puede observar las tensiones sobre los diodos.

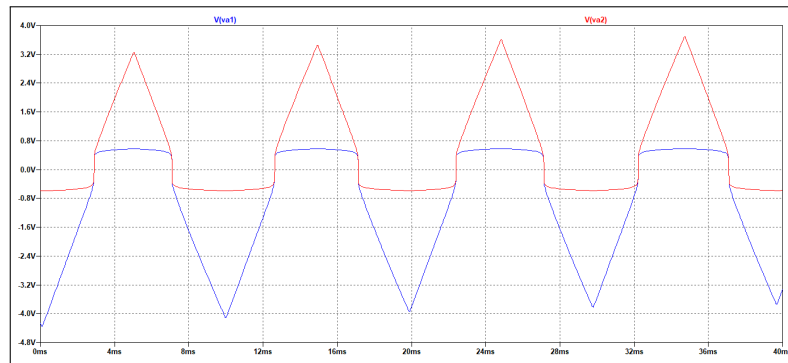


Figura 15: Tensión de los diodos rectificadores.

Mientras que en la siguiente figura se compara la tensión de entrada en la tercer etapa frente a la salida del circuito

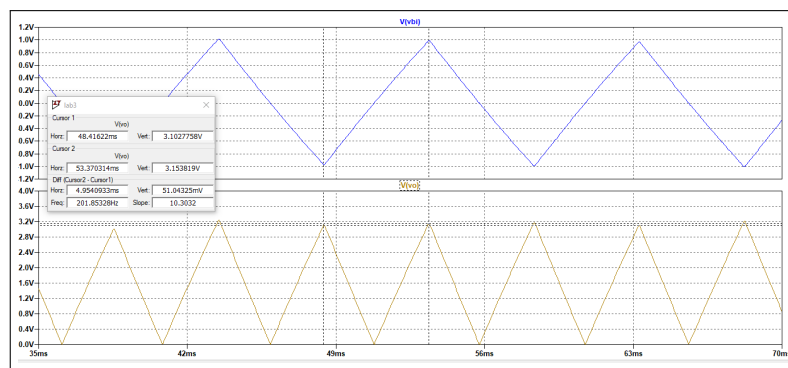


Figura 16: Tensión de salida comparada con la tensión a la entrada del rectificador.

De ésta ultima imagen, se pueden corroborar algunas cosas. Primero que, como era de esperarse, la salida de la tercera etapa, rectifica la señal que se presenta a su entrada. Segundo, la tensión de uno de los picos, con respecto al siguiente, tiene una diferencia de 50mV, debido a la tensión presente en los diodos de esta etapa.

3. Desarrollo de Laboratorio

3.1. Montaje del circuito

Se montan en la protoboard todos los componentes del circuito propuesto de estudio de la figura 1. Cabe destacar que, mediante potenciómetros, se utilizan dos puntos de ajuste para las resistencias R_5 y R_6 .

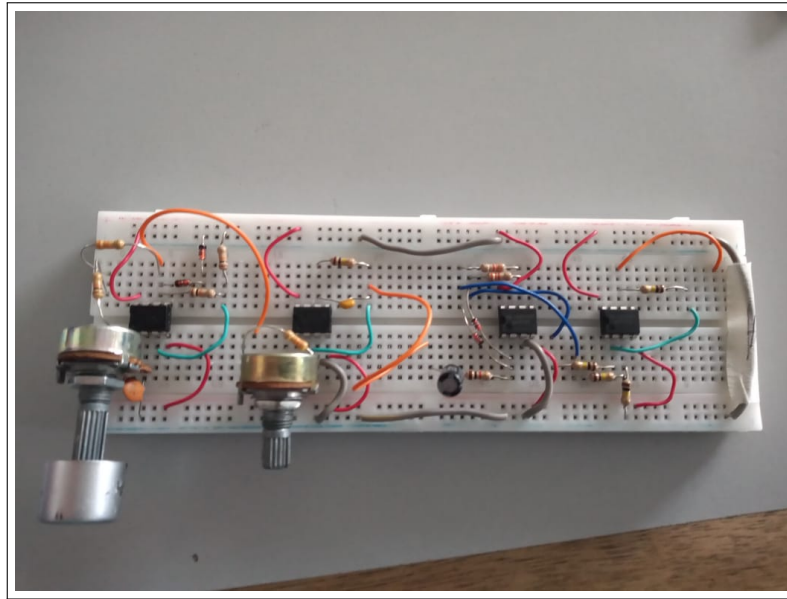


Figura 17: Circuito montado en una protoboard.

Utilizando una fuente simétrica de $\pm 15.6V$, se alimenta el circuito para poder medir las tensiones de interés v_c , v_a , v_b y v_o mediante el uso de un osciloscopio.

3.2. Generador de onda cuadrada

Una vez alimentado el circuito se procede a medir las tensiones correspondientes al primer bloque: tensión del capacitor v_c y tensión de salida v_a . Se ajusta la frecuencia de oscilación de la señal cuadrada mediante el potenciómetro R_5 . A partir de la figura 18 se obtiene: $v_c(V_{pp}) = 7.6V_{pp}$, $v_a(V_{pp}) = 16V$, $f = 97.74Hz$.

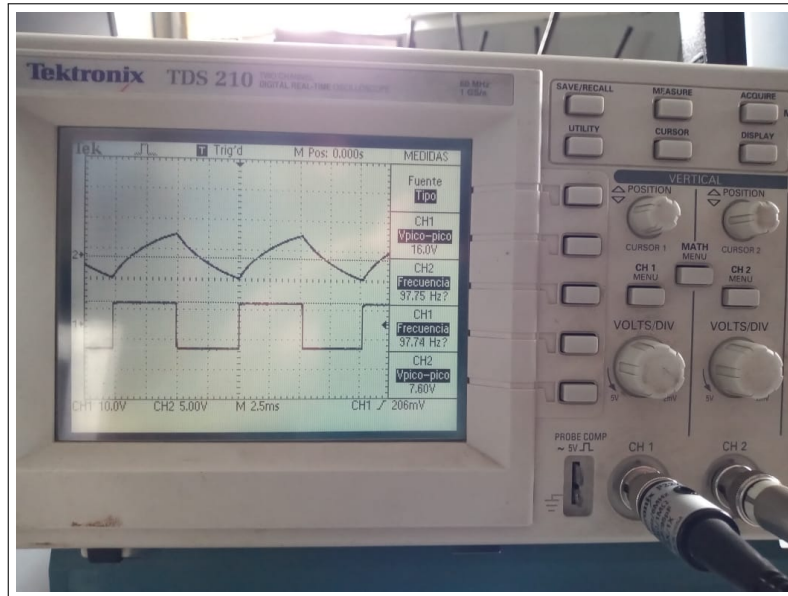


Figura 18: Mediciones de la primer etapa.

Se observa entonces que la tensión de salida difiere de la esperada. Esto se debe a que la tensión V_z de ambos diodos es diferente y puede que alguno o ambos sea distinto de $6.8V$.

3.3. Integrador

En esta segunda etapa, se mide la tensión de salida resultante como se observa en la figura 19. En ella se observa una peculiar y no menos importante señal de ruido cuya fuente no se pudo determinar con precisión. Durante el desarrollo de laboratorio, se cambiaron de lugar algunos amplificadores operacionales y, al mover algunos componentes, como el punto de ajuste R_6 , el ruido se atenuó de manera considerable. Se obtiene entonces una señal de salida de poco ruido con $v_b(V_{pp}) = 3.04V$, valor que no corresponde a la figura 19 debido al cambio del punto de ajuste.

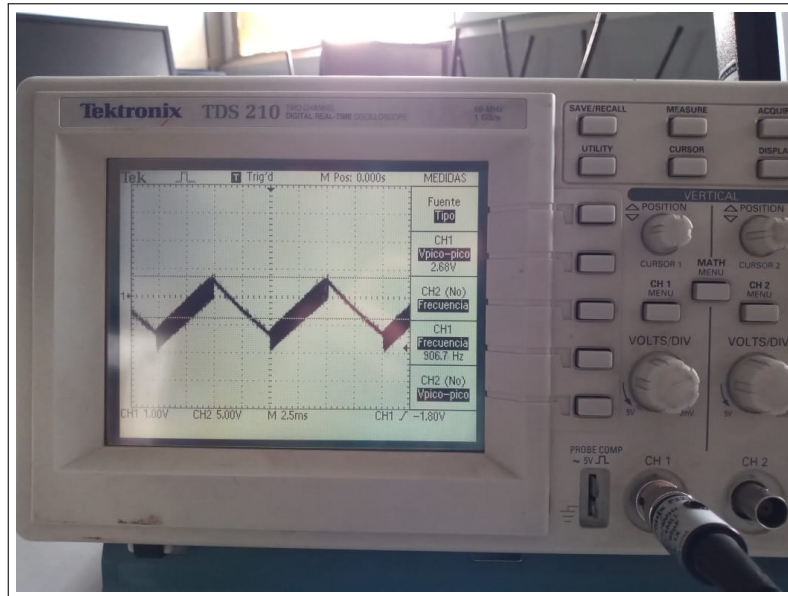


Figura 19: Mediciones de la segunda etapa.

3.4. Rectificador de onda completa

Por último, se mide la tensión de entrada al rectificador v'_b y la señal de salida v_o como se observa en la figura 20. En ella se observa claramente el efecto de la rectificación y la multiplicación por dos de la frecuencia. Se obtiene entonces: $v_o(V_{pp}) = 4.88$ y $f_o = 181.8Hz$.

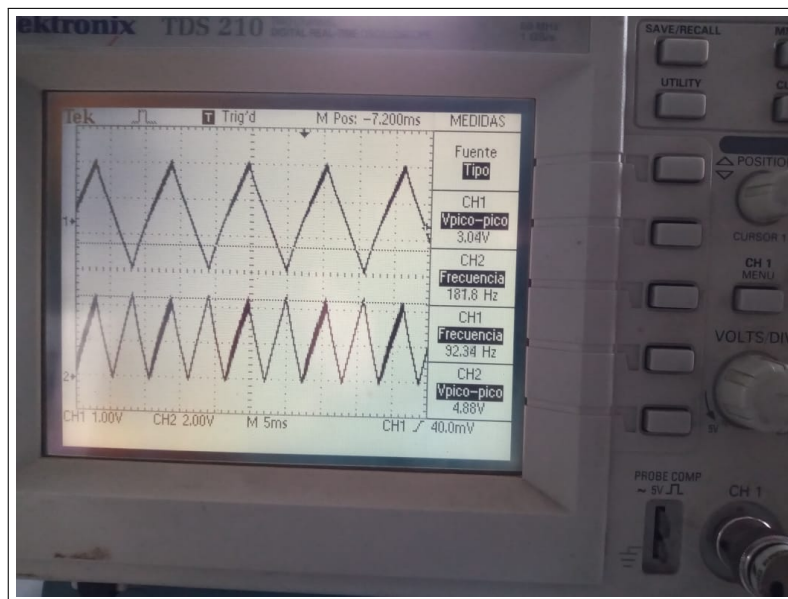


Figura 20: Mediciones de la tercer etapa.

Con los valores medidos de v'_b y v_o se calcula la ganancia del rectificador:

$$G = \frac{v_o}{v'_b} \approx 3.25 \quad (29)$$

Como medición extra, se midieron las tensiones de los diodos V_{A1} y V_{A2} como se observa en la figura 21. Se puede afirmar entonces que, la tensión de salida del rectificador v_o es la diferencia de ambas tensiones de los diodos, cancelando así a las tensiones umbrales V_γ .

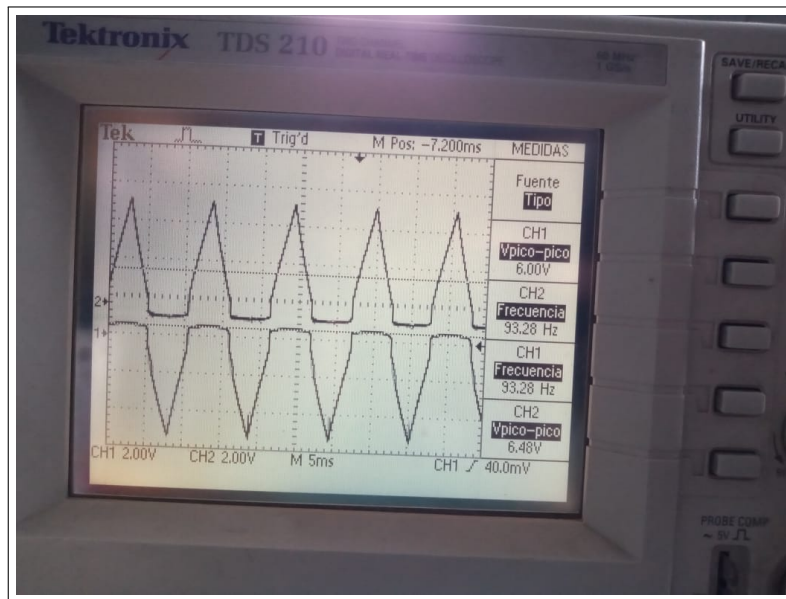


Figura 21: Mediciones de tensión de ambos diodos.

4. Conclusiones

En la siguiente tabla se realiza un resumen de resultados a partir de los cuales se sacarán distintas conclusiones.

Parámetro	Teórico	Simulación	Experimental
$V_{cc}(V)$	± 15	± 15	± 15.6
$v_c(V_{pp})$	7.4	7.6	7.6
$v_a(V_{pp})$	14.8	14.9	16
$v_b(V_{pp})$	2	2	3
$v_o(V_{pp})$	3.2	3.1	3.25
$f_a(Hz)$	100	100.8	98
$f_c(Hz)$	200	202	182
$G = \frac{v_c}{v_b}$	3.2	3.1	1.6

Tabla 1: Comparación de resultados obtenidos.

Se puede observar en la tabla una diferencia minima entre los valores calculados teóricamente y los simulados, mientras que la tensión a la salida de la primer etapa presenta una variación mayor debido a los componentes utilizados en el laboratorio. Además, en las etapas 2 y 3, se presentaba un ruido del cuál no se pudo conocer la procedencia, e influyó en la frecuencia de la señal en la salida del circuito.

Este trabajo permitió asentar los conocimientos teóricos a la hora de utilizar amplificadores operacionales. Además, se pudo comprobar la diferencia entre usar diodos reales y diodos ideales, como se venía haciendo en la práctica. Por otro lado, se pudo apreciar los efectos de la estabilización de los elementos activos del circuito, en forma de transitorios, por lo que los análisis se tuvieron que tener en cuenta a partir de unos milisegundos después de empezar las mediciones. Por último, se puede destacar la importancia de trabajar el circuito por etapas en lugar de hacerlo en su totalidad, para simplificar el análisis del mismo.

5. Referencias

- [1] Matlab. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [2] Ltspice-XVII Simulator. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [3] uA741. Texas Instruments. <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/96584/TI/UA741.html>