



# **Generación de Funciones basada en el Amplificador Operacional**

Liliana M. Barbosa E.  
Angee L. Ocampo R.

# Procedimiento

01

## Estudio

Estudio teórico de las diferentes configuraciones a trabajar en el laboratorio

02

## Análisis

Con el conocimiento previamente adquirido se procede con los cálculos

03

## Simulación

Con Pspice y Matlab se hace una aproximación del modelo teórico a lo real

04

## Implementación

Circuito físico en board para medidas pertinentes

**Etapa 1:** circuito comienza a oscilar formando la señal cuadrada en la entrada (gracias a la carga y descarga del capacitor)

**Etapa 2:** La señal ingresa, y gracias a la configuración de integrador, y debido a que oscila entre el voltaje positivo se forma la señal triangular.

**Etapa 3:** la onda triangular ingresa nuevamente en la misma configuración de la etapa anterior, formando la onda "sinusoidal".

# Generador de Onda Cuadrada

## ANÁLISIS MATEMÁTICO:

1. Se asume inicialmente que  $V_- = 0$ , cuando la fuente DC es encendida, pero  $V_+$  tiene un valor muy pequeño, por lo cual,  $V_d = V_+ - V_- = V_+$ .
2.  $V_d$  es posteriormente amplificado por la ganancia del amplificador operacional, llevando la salida a saturación positiva ( $+V_{sat}$ ).
3. El capacitor conectado a  $V_-$  comienza a cargarse hacia  $+V_{sat}$  a través de la resistencia que lo conecta a  $V_O$ .
4. Tan pronto el voltaje en  $V_-$  es levemente mayor que  $V_+$ ,  $V_d$  se vuelve negativo y el valor de la salida pasa a saturación negativa ( $-V_{sat}$ ).

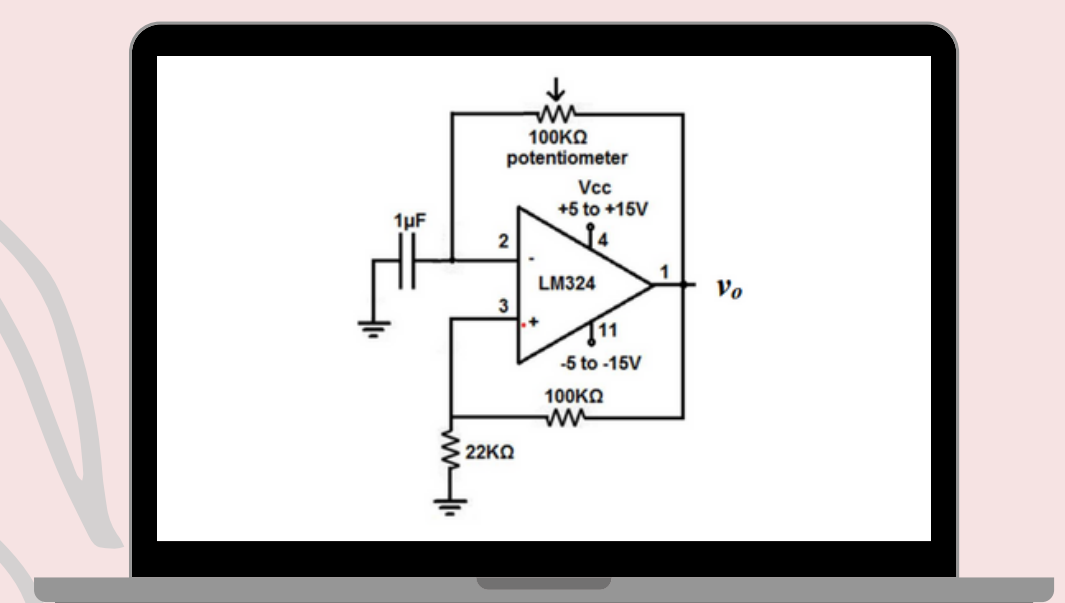
ASÍ, EL COMPORTAMIENTO DEL VOLTAGE INICIAL EN EL CAPACITOR ES DE UN DIVISOR DE VOLTAGE ENTRE LAS RESISTENCIAS  $R_1$  Y  $R_F$ , O EQUIVALENTEMENTE, LAS RESISTENCIAS  $22K\Omega$  Y  $100K\Omega$ :  $V_{th} = \frac{11}{61} V_{sat}$

- Asumiendo que  $+V_{sat}$  es la salida del amplificador operacional  $V_O$  y el capacitor tiene un voltaje inicial de  $-V_{th}$ , entonces:

$$V_{sat} = Ri_c(t) + \frac{1}{C} \int i_c(t) dt - V_{th} \longrightarrow i_c(t) = \frac{V_{sat} + V_{th}}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

- Asumiendo inicialmente que el capacitor  $C$  se encuentra descargado:

$$V_{sat} = Ri_c(t) + \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \longrightarrow v_c(t) = V_{sat} - (V_{sat} + V_{th}) e^{-\frac{t}{RC}}$$



De la ecuación del voltaje del capacitor se tiene que la expresión matemática de  $v_o$ :

$$v_o(t) = 12 ; \text{ si } 0 \leq t < \frac{T}{2}$$

$$v_o(t) = -12 ; \text{ si } \frac{T}{2} \leq t < T$$

$$V_{th} = V_{sat} - (V_{sat} + V_{th}) e^{-\frac{t_1}{RC}}$$

$$\ln(e^{-\frac{t_1}{RC}}) = \ln\left(\frac{V_{sat} - V_{th}}{V_{sat} + V_{th}}\right)$$

$$t_1 = RC \ln\left(\frac{V_{sat} + V_{th}}{V_{sat} - V_{th}}\right), \quad V_{th} = \frac{11}{61} V_{sat}$$

$$t_1 = RC \ln(1.44)$$

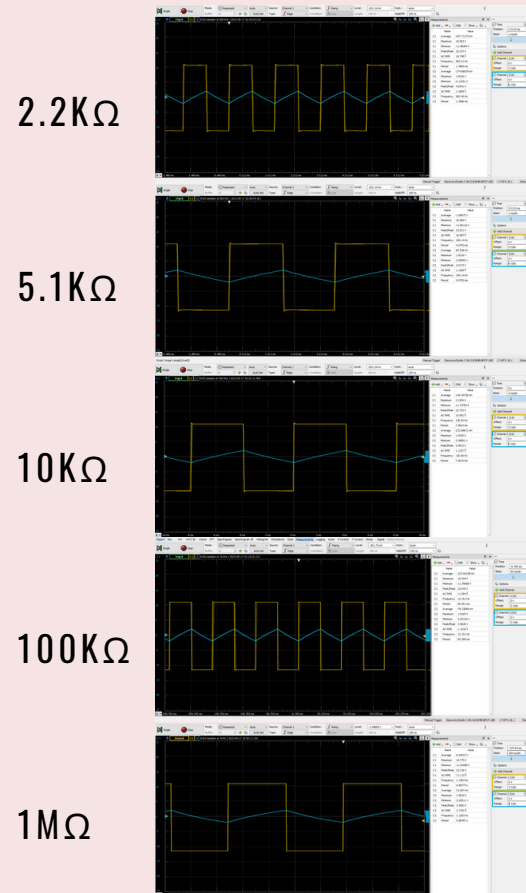
Asimismo, para  $T$  (periodo),  $T = t_1 + t_2 = 2t_1$  donde  $t_1 = t_2$ , por simetría de la señal cuadrada. Así, la frecuencia corresponde a:

$$f = \frac{1}{2RC \ln(1.44)} = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{2(10^{-6}) \ln(1.44)} \right)$$



# Generador de Onda Cuadrada

Medidas físicas

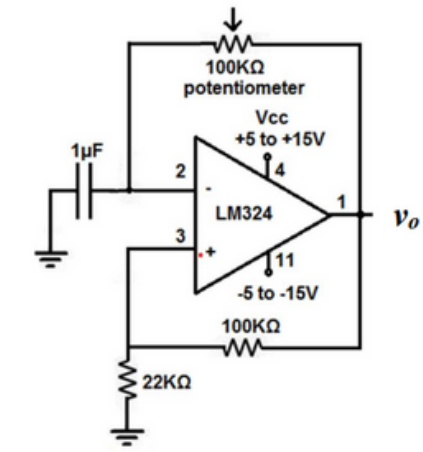


Simulación en Pspice



## Observaciones:

- ENTRE MAYOR SEA LA RESISTENCIA R, MÁS SE DEMORA EN CARGAR EL CAPACITOR, POR LA OPOSICIÓN A LA CORRIENTE.
- VOLTAJE DC RELACIONADO AL V-OFFSET DEL AMPLIFICADOR.



Valor de R	Vpp	Vrms	Vdc	Frecuencia
2.2kΩ	23.0924	9.428	0.8495	623.2744Hz
5.1kΩ	23.0781	8.998	0.8508	268.8635Hz
10kΩ	23.0914	8.4753	0.8494	137.1204Hz
100kΩ	23.0902	8.928	0.8474	13.7120Hz
1MΩ	23.0900	8.728	0.8471	1.3712Hz

**Tabla 1:** Variación de las resistencias del circuito generador de onda cuadrada.

Valor de R	Vpp	Vrms	Vdc	Frecuencia
2.2kΩ	22.337	10.748	0.437	565.31
5.1kΩ	22.621	10.897	1.0697	245.14
10kΩ	22.732	10.992	0.1445	126.54
100kΩ	22.643	11.094	0.2276	12.151
1MΩ	22.318	11.113	0.9433	1.1264

**Tabla 5:** Variación de las resistencias del circuito generador de onda cuadrada, en montaje experimental.

## Observaciones:

- EL VOLTAJE CONSUMIDO POR EL AMPLIFICADOR FÍSICO ES MENOR A 1.7VY EN SIMULACIÓN ES MENOR A 1V.
- EL PORCENTAJE DE ERROR RELACIONADO AL VALOR RMS ENTRE LA SIMULACIÓN Y LA FASE EXPERIMENTAL, SE DEBE A LA MEDIDA EN PSPICE YA QUE CORRESPONDE A UNA APROXIMACIÓN MÁS NO A LA SUMA TOTAL.

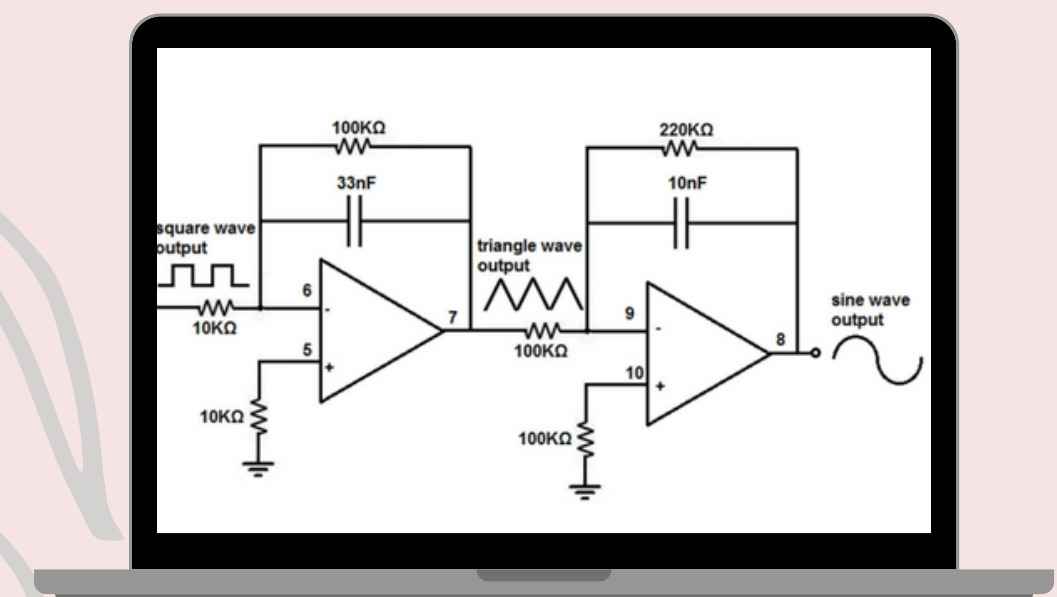
# Circuito integrador

## ANÁLISIS MATEMÁTICO:

1. Inicialmente se realiza el análisis en el dominio de la frecuencia de los elementos circuitales, usando el concepto de impedancia.
2. Posteriormente se procede a realizar un análisis de la configuración para llegar a la función de transferencia que modela su comportamiento.
3. Seguidamente se estudia en cada uno de los periodos de la señal y se aplica la transformada inversa de Laplace.
4. Por último, se realiza una aproximación matemática mediante series de Taylor con el fin de obtener el voltaje de salida.

ASÍ, EL VOLTAJE DE SALIDA OBTENIDO PARA LA PRIMERA ETAPA ES UNA FUNCIÓN A TRAMOS DESCRITA DE ESTA FORMA:

$$V_{07}(t) = -\frac{12}{Ri_2}t ; \text{ si } 0 \leq t < \frac{T}{2}:$$
$$V_{07}(t) = \frac{12}{Ri_2}t ; \text{ si } \frac{T}{2} \leq t < T:$$



En la segunda etapa, al tener la misma configuración se sigue la misma sucesión de pasos; sin embargo, al tener como entrada una señal triangular, al realizar la aproximación mediante series se obtiene la siguiente función a tramos:

$$V_{08}(t) = \frac{12 \cdot Rf_3}{Ri_2 \cdot Ri_3} * \frac{t^2}{2} ; \text{ si } 0 \leq t < \frac{T}{2}$$
$$V_{08}(t) = -\frac{12 \cdot Rf_3}{Ri_2 \cdot Ri_3} * \frac{t^2}{2} ; \text{ si } \frac{T}{2} \leq t < T$$

# Circuito integrador

## Resultados simulados

Valor de R	Vpp	Vrms	Vdc	Av
2.2kΩ	23.0778	6.937	0.8497	0.9994
5.1kΩ	23.0794	8.166	0.8486	1.0001
10kΩ	23.0794	8.253	0.8484	0.9995
100kΩ	23.0791	9.114	0.8481	0.9995
1MΩ	23.0792	9.047	0.8482	0.9995

Tabla 2: Valores referentes al voltaje en el nodo 7 del circuito de generación de funciones.

Valor de R	Vpp	Vrms	Vdc	Av
2.2kΩ	5.8570	2.1501	0.8132	0.2538
5.1kΩ	17.3474	5.039	2.2926	0.7516
10kΩ	23.0774	7.118	0.8492	0.9999
100kΩ	23.0778	9.1	0.8493	1.0000
1MΩ	23.0781	9.165	0.8495	1.0000

Tabla 3: Valores referentes al voltaje en el nodo 8 del circuito de generación de funciones.

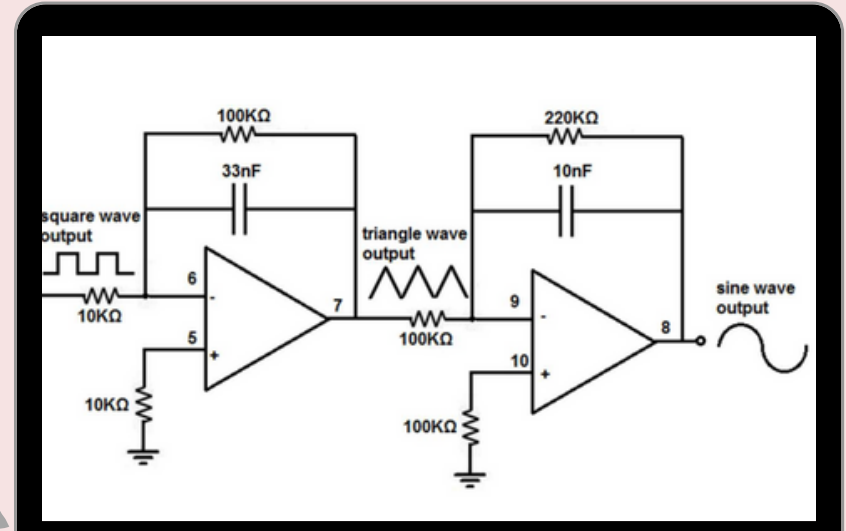
## Resultados experimentales

Valor de R	Vpp	Vrms	Vdc	Av
2.2kΩ	25.237	7.9622	0.6129	1.1298
5.1kΩ	25.241	9.9062	0.1567	1.1158
10kΩ	25.245	10.489	0.5917	1.1105
100kΩ	25.219	10.986	0.8494	1.1138
1MΩ	23.038	11.046	0.8243	1.0323

Tabla 6: Valores experimentales en el nodo 7 del circuito de generación de funciones.

Valor de R	Vpp	Vrms	Vdc	Av
2.2kΩ	4.2379	1.5088	0.011	0.1679
5.1kΩ	13.310	4.2821	1.0229	0.5273
10kΩ	22.888	7.9638	0.288	0.9066
100kΩ	23.323	10.806	0.029	0.9248
1MΩ	22.288	11.058	0.098	0.9674

Tabla 7: Valores experimentales en el nodo 8 del circuito de generación de funciones.



## Observaciones:

### EXPERIMENTAL:

- EN LA ETAPA 2 (NODO 7) DEL MONTAJE TOTAL, VPP TIENE UN VOLTAJE MAYOR AL VPP DE LA ONDA CUADRADA Y AL VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN, ELLO A CAUSA DE LA SATURACIÓN EN LA SALIDA Y EL RUIDO QUE INGRESA AL CIRCUITO.
- EN LA ETAPA 3 (NODO 8), TIENDE A ATENUAR MÁS RÁPIDO LA SEÑAL EN LA ETAPA 2; O SEA, TIENE UNA FRECUENCIA DE CORTE MÁS BAJA.

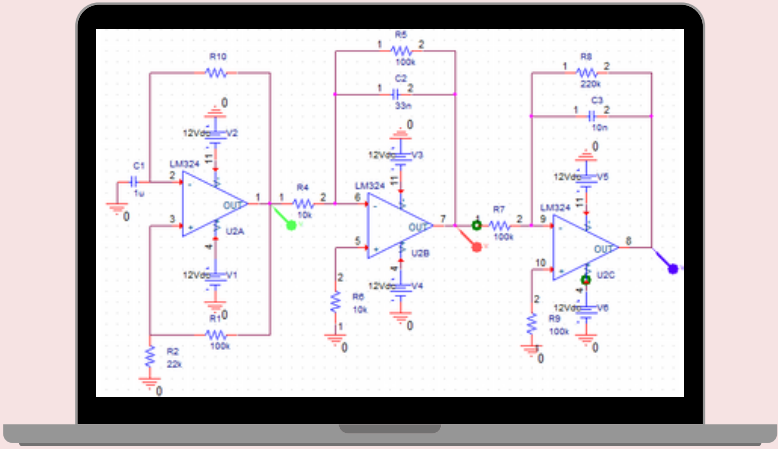
### SIMULADO:

- LAS GANANCIAS DE LAS ETAPAS NO VARIAN TANTO ENTRE ELLAS, YA QUE EL SIMULADOR TRABAJA BAJO OPERACIONES MATEMÁTICAS SIN INTERFERENCIAS EXTERNAS COMO RUIDO.

HAY UNA ALTA RELACIÓN ENTRE LA SIMULACIÓN Y LA REALIDAD, CON BAJOS PORCENTAJES DE ERROR.

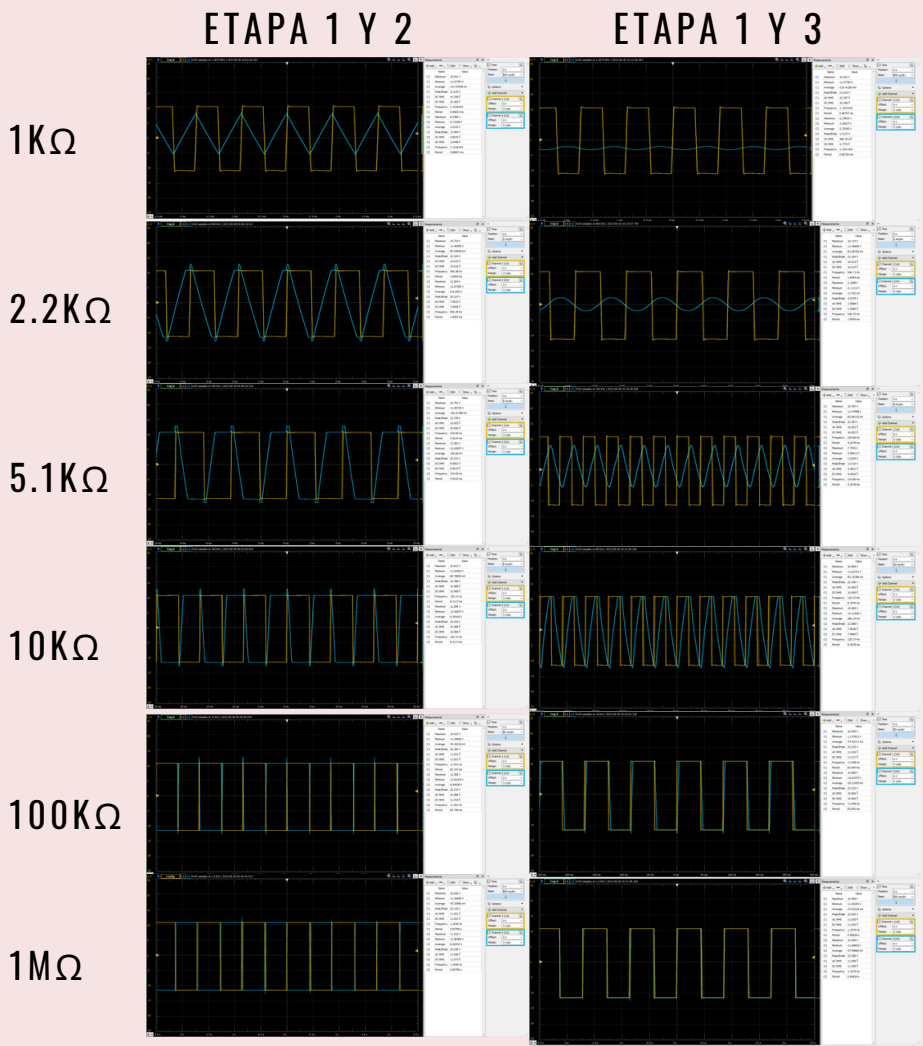


# Generador de funciones



Medidas físicas

Simulación en Pspice



1KΩ

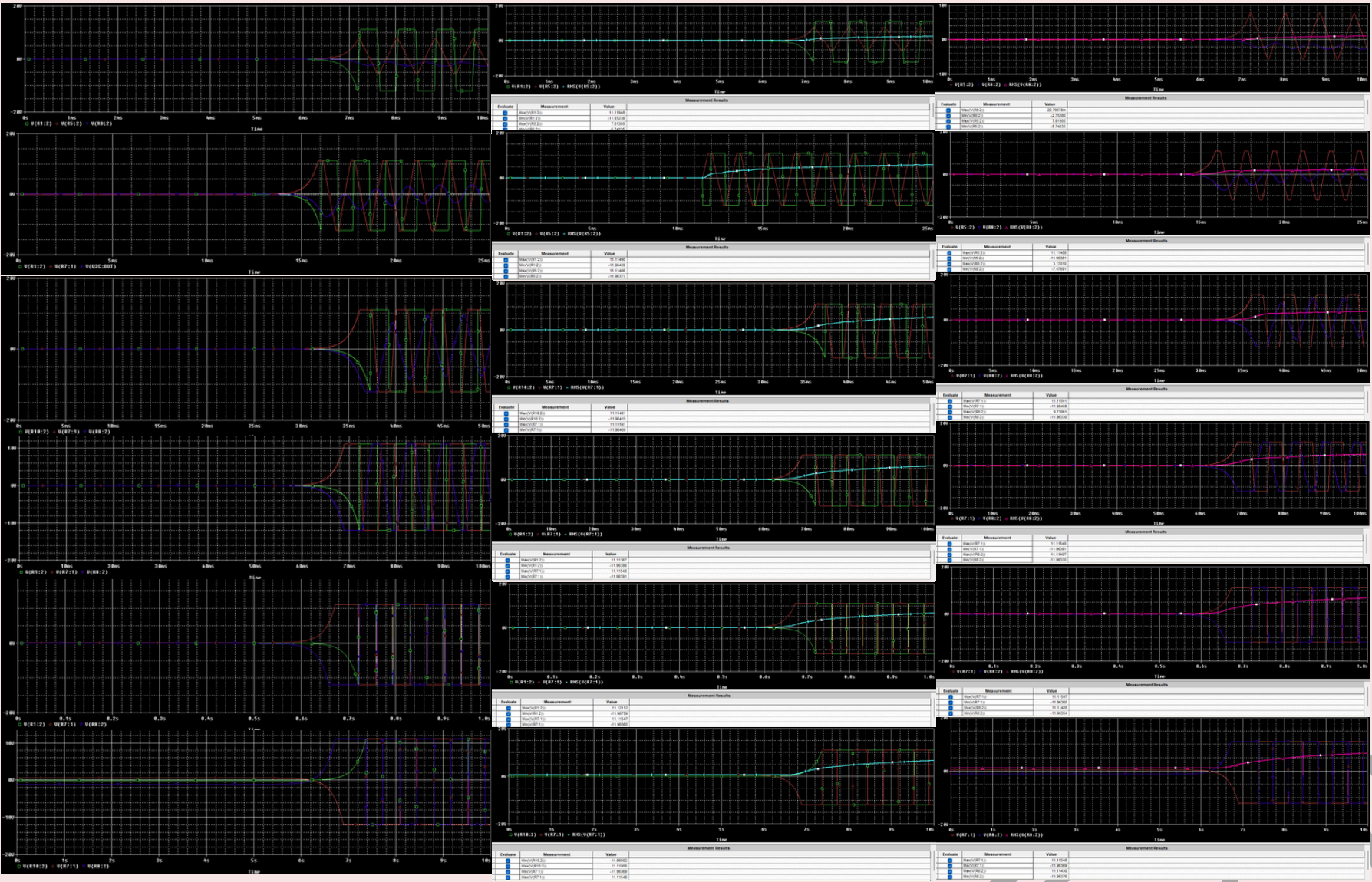
2.2KΩ

5.1KΩ

10KΩ

100KΩ

1MΩ



Observaciones:

A MEDIDA QUE SE PRESENTA UN AUMENTO EN EL VALOR DE LA RESISTENCIA SE TIENDA A SATURAR LA SEÑAL.

"filtro pasa-bajas": a más bajas frecuencias, la impedancia del capacitor incrementa y menos señal es retroalimentada a la terminal inversora del amplificador operacional, amplificando la señal de salida.

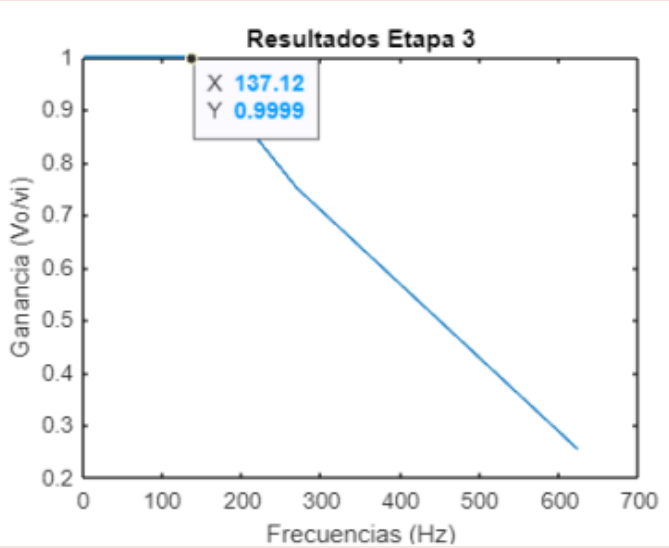
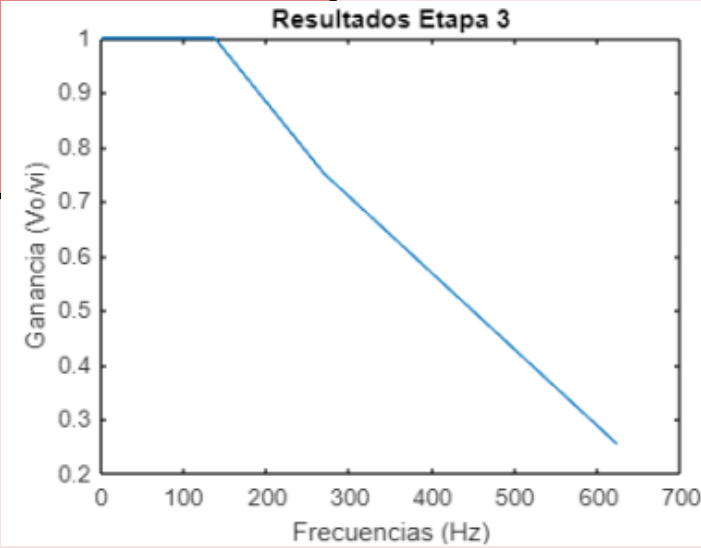
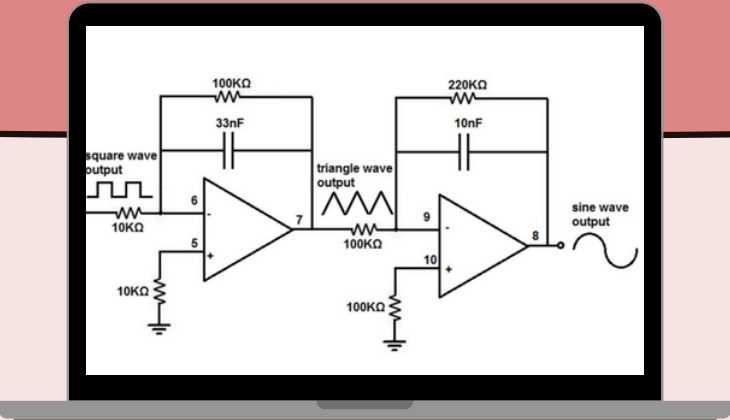
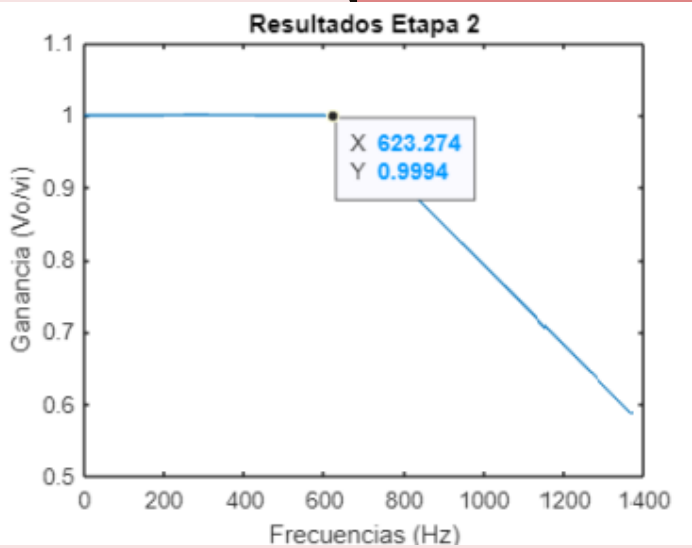
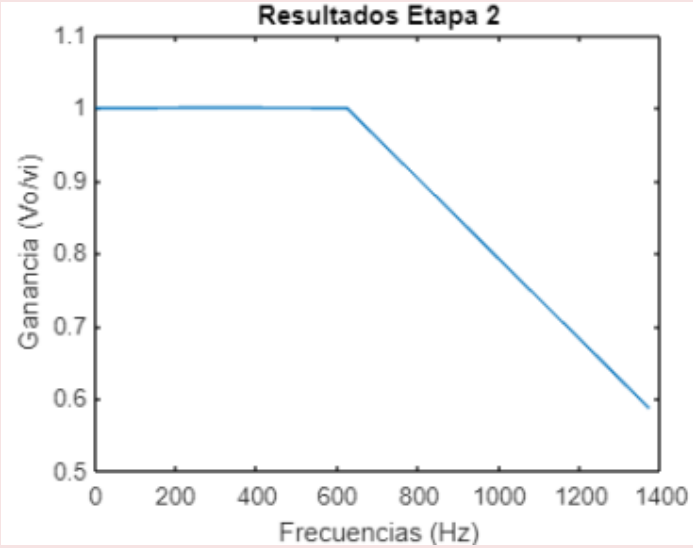
# Respuesta en frecuencia

Resultados simulados

Valor de R	$f$ [Hz]	Av (etapa 2)	Av (etapa 3)
1k $\Omega$	1371.2037	0.5867	0.0939
2.2k $\Omega$	623.2744	0.9994	0.2538
5.1k $\Omega$	268.8635	1.0001	0.7516
10k $\Omega$	137.1204	0.9995	0.9999
100k $\Omega$	13.7120	0.9995	1.0000
1M $\Omega$	1.3712	0.9995	1.0000

Tabla 4: Valores de resistencias de la etapa 2 y 3, junto a sus respectivas ganancias y frecuencia.

**La frecuencia de corte:**  
Tener en cuenta la constante de tiempo que vincula los elementos de retroalimentación ( $t_F = R_F C_F$ ), y su relación con el periodo de la señal de entrada ( $T_S = 1/f_S$ ).  
Entonces, la frecuencia de corte se relaciona con  $f_S = \frac{1}{R_F C_F}$ , por lo cual la frecuencia de corte de la primera etapa es precisamente 303.03Hz (lo cual corresponde a la resistencia de 4524.972 $\Omega$ ) mientras que en la segunda es 454.54Hz (la resistencia de 3016.648 $\Omega$ ).



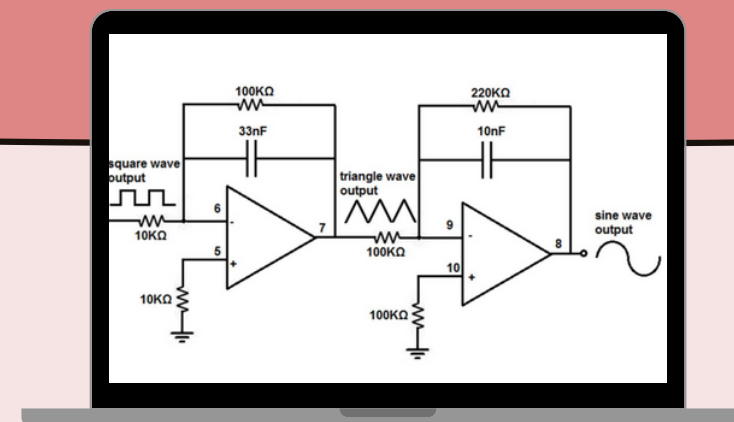
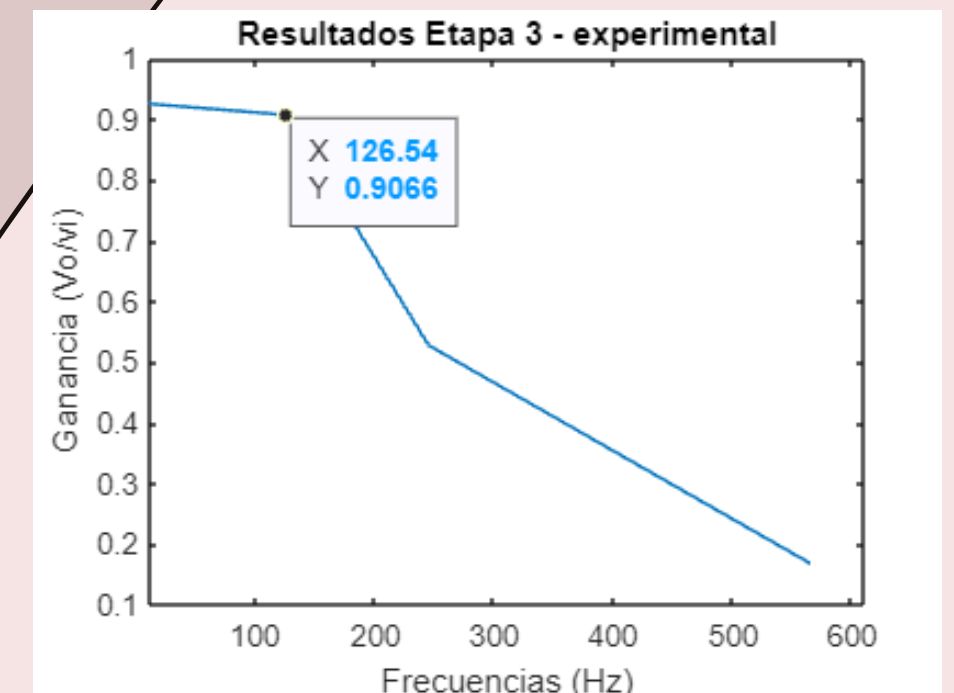
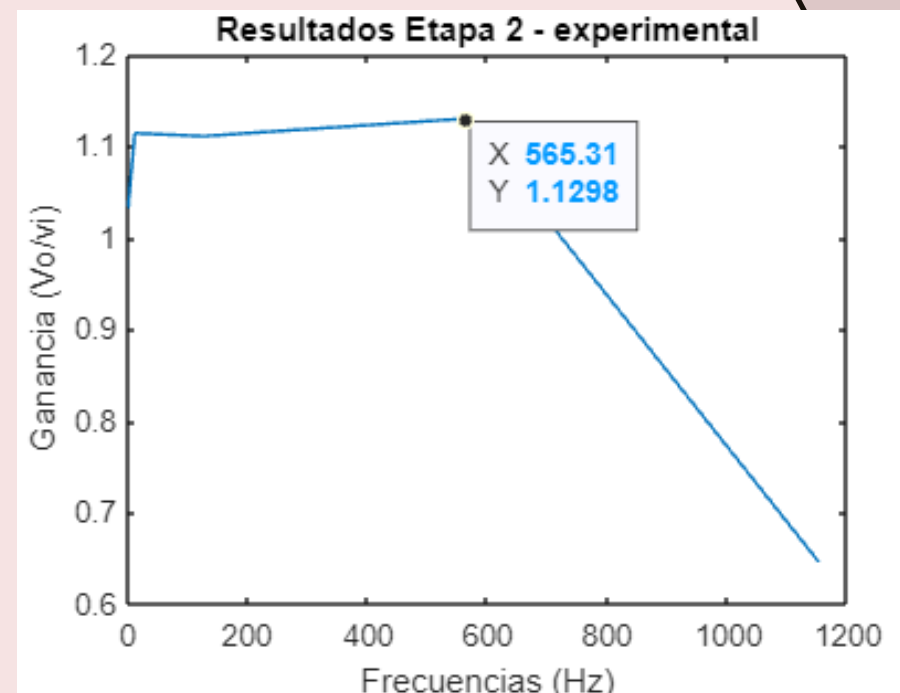


# Respuesta en frecuencia

*Resultados experimentales*

Valor de R	$f$ [Hz]	$A_v$ (etapa 2)	$A_v$ (etapa 3)
1k $\Omega$	1151.8	0.6461	0.0726
2.2k $\Omega$	565.31	1.1298	0.1679
5.1k $\Omega$	245.14	1.1158	0.5273
10k $\Omega$	126.54	1.1105	0.9066
100k $\Omega$	12.151	1.1138	0.9248
1M $\Omega$	1.1264	1.0323	0.9674

**Tabla 5:** Valores de resistencias de la etapa 2 y 3, junto a sus respectivas ganancias y frecuencia, en montaje experimental.



# Conclusiones

- La generación de funciones es posible mediante aproximaciones matemáticas y condiciones muy particulares que son establecidas por los elementos circuitales como el capacitor inicial, puesto que sus tiempos de carga y descarga determinan la conducta de las señales posteriores generadas.
- Se puede concluir la estrecha relación que posee la resistencia de retroalimentación del generador de onda cuadrada con la formación de la señal triangular y sinusoidal, debido a que el aumento de su valor es proporcional a la claridad o forma de la señal esperada.

## REFERENCIAS:

[1] M. H. Rashid. "Microelectronic Circuits: Analysis & Design Analysis and Design". 2011 (2nd. Ed.).