



Amplificador de audio para sonómetro

ELECTRONICA ANALOGICA

Creado por:

Hugo Garcia Garcia

Angel Jorde Sosa

Laura Aroca Alarcon



**UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA**

INDICE

RESUMEN.....	2
MARCO TEÓRICO.....	2
1. Objetivo y especificaciones	3
2. Análisis de la señal.....	3
3. Calculos previos.....	3
4. Diagrama de bloques.....	4
5. Diseño y cálculos.....	5
5.1. Etapa de entrada.....	5
5.2. Filtro paso bajo.....	5
5.3. Filtro paso alto.....	6
5.4. Filtro pasa banda.....	7
5.5. Etapa final.....	9
6. Analisis teórico de los errores	9
7. Estimación del consumo de los AOs.....	11
8. Alternativas.....	12
9. Conclusiones.....	13

RESUMEN

El presente documento abarca diversas secciones donde se detalla minuciosamente cada fase del diseño del sistema de amplificación de audio que se va a desarrollar. A continuación, se describen los objetivos del sistema y una serie de especificaciones imprescindibles para asegurar la correcta recepción de la señal por parte del microcontrolador. A continuación, se realiza un análisis exhaustivo de la señal de entrada al sistema de procesamiento, lo cual permitirá modelar el sistema con el fin de someterlo a un posterior procesamiento. La estructura principal del sistema de procesamiento se representa mediante un diagrama de bloques que brinda una visión general de cada subsistema, aunque de manera superficial. Posteriormente, se procederá a realizar un análisis de errores, tanto teóricos (basados en cálculos matemáticos) como prácticos (mediante simulaciones). Dichos errores serán evaluados y, dependiendo de los resultados obtenidos, se verificará la eficacia del sistema diseñado.

MARCO TEÓRICO

La capacidad humana de percibir las vibraciones presentes en el entorno se basa en los sentidos de la vista y el oído. La disciplina de la acústica se dedica al estudio exhaustivo de todas las formas de vibraciones mecánicas, abarcando tanto el rango de audición humano como las frecuencias superiores (ultrasónicas) e inferiores (infrasónicas). Para detectar y medir estos fenómenos acústicos, se emplean instrumentos especializados como el sonómetro. En esta sección se profundiza en el principio de generación y percepción del sonido, así como en las magnitudes fundamentales que contribuyen a la comprensión de este fenómeno. Asimismo, se realiza un análisis del estado actual de los sonómetros, dispositivos diseñados para medir con precisión el sonido.

Profundizando un poco mas, sabemos que el sonido tiene su origen en las vibraciones mecánicas que se producen en un medio, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Se trata de una forma de onda que se propaga gradualmente mediante una perturbación. Esta perturbación causa la vibración de las moléculas del medio alrededor de sus posiciones de equilibrio. Cuando se produce la perturbación, las moléculas experimentan pequeñas variaciones en la presión y interactúan entre sí para transmitir la perturbación, generando desplazamientos. Una vez que la perturbación ha pasado, las moléculas regresan a su posición original. En resumen, el sonido se define como la propagación de energía a través de un medio material sin transporte de materia.

Por otro lado, la frecuencia de una onda sonora es el número de vibraciones por segundo en un punto específico. Se mide en Hercios (Hz), equivalentes a ciclos por segundo (cps). La amplitud, por otro lado, es la característica de las ondas sonoras que percibimos como volumen y representa la distancia entre el valor máximo de la onda y su punto de equilibrio. La unidad de medida de la amplitud varía según el fenómeno, como voltios (V) o amperios (A) en corriente alterna. Sin embargo, en las ondas sonoras, la amplitud se cuantifica como presión sonora y se expresa en decibelios (dB).

Además, la presión sonora es la variación instantánea de la presión en relación con la presión ambiente. Se mide en Pascals (Pa). El rango audible para los humanos es de 20 Hz a 20 kHz, con ultrasónicas (superiores) e infrasónicas (inferiores). El nivel de presión sonora va de 20 μ Pa a 200 Pa, siendo el umbral de dolor.

1. OBJETIVOS Y ESPECIFICACIONES

El propósito de un amplificador de audio es amplificar la señal proporcionada por un micrófono para que luego pueda ser digitalizada por un microcontrolador. El rango de esta señal debe ser de 100 Hz a 20 kHz. La ganancia del sistema que nos permite obtener una salida en el rango entre 0 y 10 V. Una vez procesada la señal, puede ser digitalizada por un microcontrolador a través de una entrada analógica con impedancia de 1MΩ

El micrófono cuenta con las siguientes características:

- Ganancia: -40dB.
- Impedancia de salida: 2.2kΩ.
- Ancho de banda: 20 Hz – 20kHz.

Hay que diseñar un amplificador para medir señales entre 500 Hz y 6kHz. La señal de salida deberá estar entre 0 y 10V, correspondiente con un nivel de presión sonora entre 30dB y 130dB. La señal esta digitalizada en un microcontrolador a través de una entrada analógica cuya impedancia es $\geq 5 \text{ M}\Omega$.

Los componentes que necesitaremos para realizarlo son:

1. Condensadores de valores normalizados.
2. Resistencias y potenciómetros de valores normalizados (E48).
3. AOs modelo TL081ACD alimentados a $\pm 10\text{V}$.
4. Solo se dispone de alimentación simétrica de $\pm 10\text{V}$.

2. ANALISIS DE LA SEÑAL

Debemos diseñar un circuito para recibir cantidades físicas con cualquier tipo y marca de micrófono que proporcione un voltaje variable de $\pm 100 \text{ mV}$ sobre un ancho de banda de 20Hz - 20Khz (dicho anteriormente). Se especifica un ancho de banda de 100Hz a 20kHz, por lo que necesitamos usar algunos amplificadores operacionales TLO81ADC para limitar el ancho de banda. Esa información se puede encontrar en la hoja de datos. Estos serán utilizados como filtros de paso de banda.

La topología de la señal será single-ended (el terminal positivo corresponde a la fuente de voltaje variable, el micrófono y los terminales negativos están conectados a la referencia) y de masas conectadas. Hemos elegido esta topología porque solo hay una fuente de voltaje variable disponible en la entrada, por lo que solo se necesita conectar un terminal. Por otro lado, esta topología favorece la simplicidad del sistema, ya que coloca todas las masas en un mismo punto y no requiere múltiples referencias. En este caso se utiliza una señal de voltaje porque la impedancia de salida del micrófono es baja. Esto se debe a que está cerca del modelo de voltaje ideal, tiene menos error debido al desajuste de impedancia y es el modelo equivalente de Thevenin.

3. CÁLCULOS PREVIOS

A partir de las características del micrófono, podemos definir la señal que se obtiene del mismo. Podemos averiguar la sensibilidad del micrófono en V/Pa a partir de la sensibilidad en dB que se nos aporta.

$$\begin{aligned}
 \text{Sensitivity}_{dBV} &= 20 \cdot \log_{10} \frac{\text{Sensitivity}_{mV/Pa}}{\text{Output}_{AREF}} \rightarrow \text{Output}_{AREF} = \frac{1V}{Pa} \\
 -40dB &= 20 \cdot \log_{10} \frac{\text{Sensitivity}_{mV/Pa}}{\frac{1000mV}{Pa}} \\
 \text{Sensitivity} \left(\frac{V}{Pa} \right) &= 10^{-2} \cdot \frac{1000mV}{Pa} \\
 \text{Sensitivity} &= \frac{10mV}{Pa}
 \end{aligned}$$

Nuestra señal debe tener un margen de presión sonora entre 30 y 130 dB. Con la siguiente formula calculo la P en μPa para cada P en dB.

$$dB_{SPL} = 20 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{P}{20\mu Pa}$$

$$30 = 20 \cdot \log_{10} \frac{P}{20\mu Pa} \rightarrow \frac{P}{20\mu Pa} = 10^{\frac{30}{20}} \rightarrow P = 632 \mu Pa$$

$$130 = 20 \cdot \log_{10} \frac{P}{20\mu Pa} \rightarrow \frac{P}{20\mu Pa} = 10^{\frac{130}{20}} \rightarrow P = 63,24 Pa$$

Con estos dos valores ya podemos hallar el valor mínimo y máximo de la señal de salida de nuestro micrófono:

$$30dB \rightarrow 632 \mu Pa \cdot \frac{10mV}{Pa} = 6,32\mu V$$

$$130dB \rightarrow 63,24 Pa \cdot \frac{10mV}{Pa} = 0,6324V$$

Los 6,32 μV los podemos considerar como 0, ya que el valor es muy reducido. Aunque en los cálculos teóricos se pueda trabajar con este valor, en la práctica no se puede considerar.

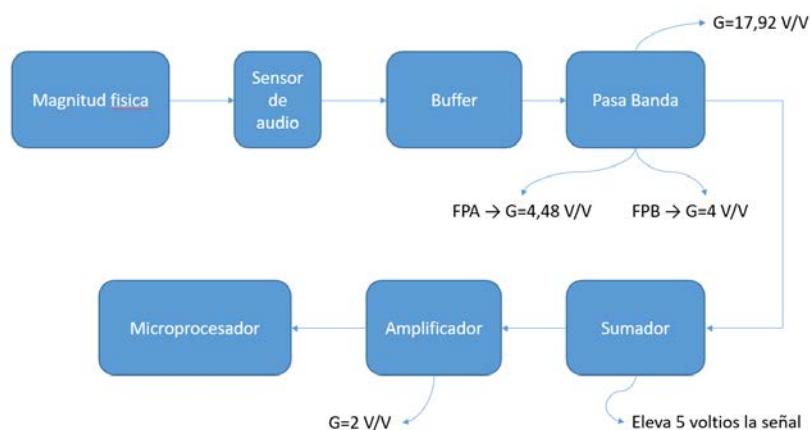
4. DIAGRAMA DE BLOQUES

Una vez captamos la señal por el micrófono, comienza un tratamiento para obtener la señal deseada.

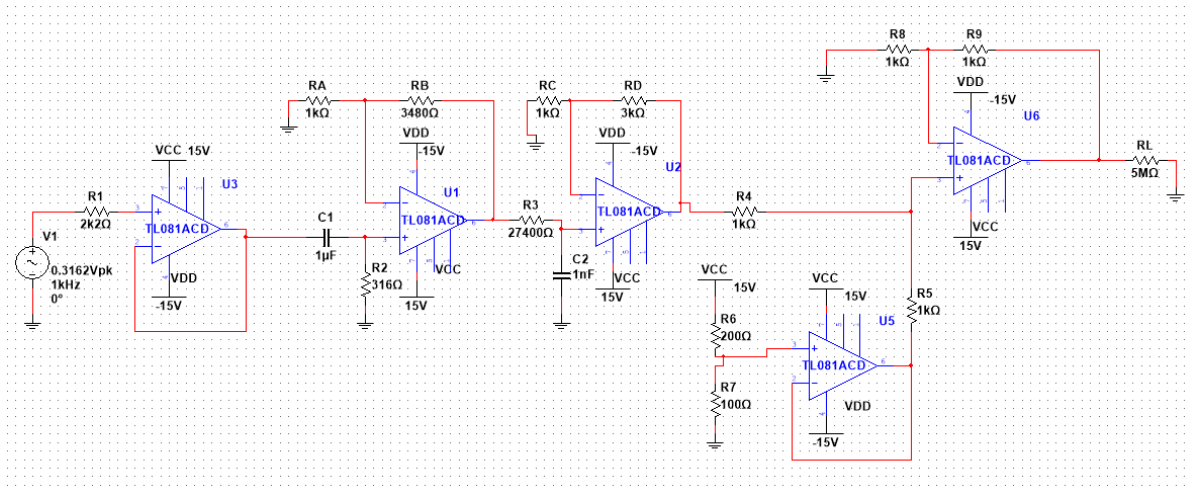
En primer lugar colocamos un Buffer, este se encargara de que no tengamos error por efecto de carga en la entrada, así conseguimos que a la etapa de amplificación nos llegue la misma señal que hay en la entrada. En esta etapa de amplificación contamos con un pasabanda, donde hay un filtro paso bajo, y otro paso alto con lo que conseguimos al final contar con una ganancia de 17.92 V/V.

Después del proceso de amplificación, nos queda una señal de [-5 ; 5]V, y como nos interesa tener una señal de [0 ; 10]V, obtenemos por colocar un sumador de 5V a la salida del pasabanda, de esta manera conseguimos una señal de [0 ; 5]V.

Por último, para obtener la señal requerida, obtenemos por poner un amplificador de G=2 V/V, y así de esta manera nos queda una señal de [0 ; 10]V, la cual nos proporciona el rango de señal deseado.



5. DISEÑO Y CÁLCULOS

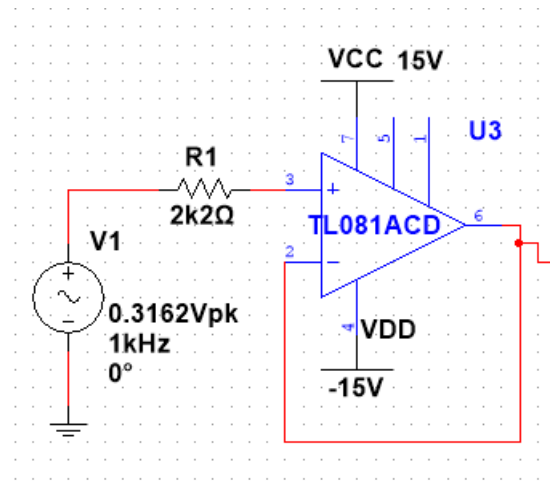


5.1. ETAPA DE ENTRADA

La etapa de entrada va a consistir en el esquema de la derecha.

Como vemos ponemos una fuente de tensión alterna con $0,3162V_{pk}$ que es la tensión que nos da el microfono (en los calculos teóricos la tensión del micrófono va de 0 a $0,6324V$ pero como no podemos poner un offset en la fuente porque el filtro paso alto elimina la continua ponemos esos $0,6324V_{pp}$).

R_1 es la impedancia de salida del micrófono que es de $2k\Omega$, como indica el enunciado. Despues de R_1 ponemos un Buffer con el objetivo de eliminar la impedancia de entrada al sistema y reducir los errores de Offset.



5.2. FILTRO PASO BAJO

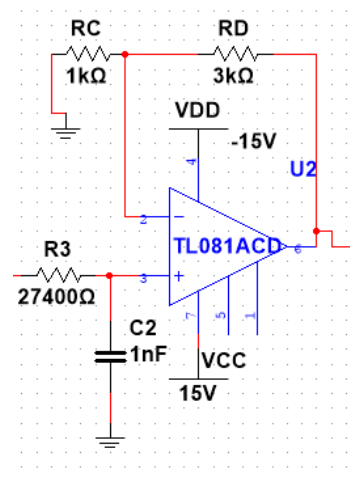
Este filtro lo que nos va a permitir es filtrar las señales que estén por encima de los 6kHz, como indica el enunciado.

Llamaremos V_{o2} a la tensión que sale del operacional y V_{o1} a la que entra por R_4 ya que cuando juntemos los dos bloques la salida del filtro anterior se conectará con la entrada de este filtro.

La ganancia y frecuencia de corte de este filtro será:

$$G_2 = \frac{V_{o2}}{V_{o1}} = \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) \cdot \frac{1}{1 + j\omega C_2 R_3}$$

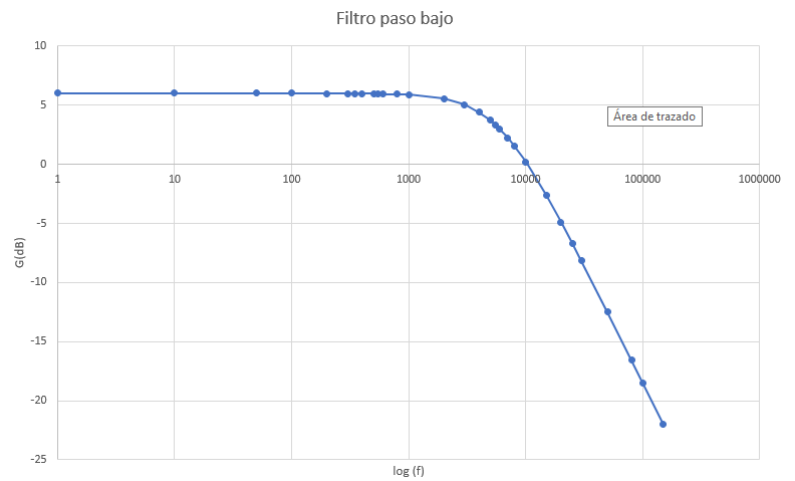
$$f_1 = \frac{1}{2\pi C_2 R_3} = 6kHz \rightarrow C_2 = 1nF; R_3 = 26k5\Omega$$



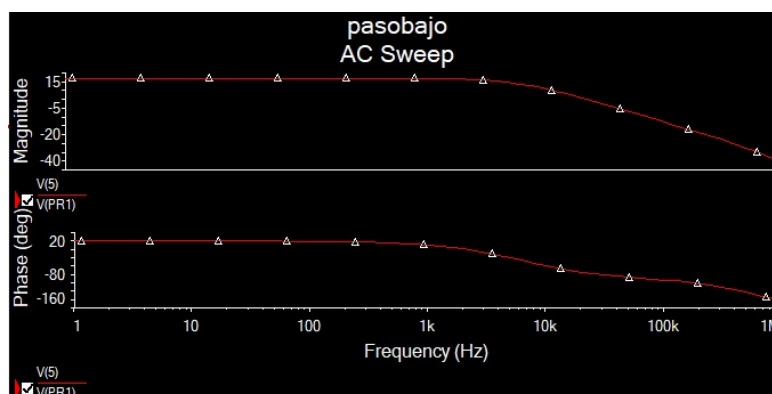
Cogemos una R_3 de 27400Ω que es la que está estandarizada y nos saldrá una frecuencia de corte de $5808,57\Omega$. Para poder visualizar el Diagrama de Bode de manera correcta hemos tomado la tensión de pico que hay a la salida del operacional con

30 valores diferentes de frecuencia. Usando Excel hemos graficado estos datos obteniendo un Diagrama de Bode más preciso.

Valor	Frecuencia (Hz)	Amplitud entrada	Amplitud Salida	G(dB)
1	1	1	2	6,02059991
2	10	1	2	6,02059991
3	50	1	2	6,02059991
4	100	1	2	6,02059991
5	200	1	1,995	5,998858
6	300	1	1,995	5,998858
7	350	1	1,995	5,998858
8	400	1	1,99	5,97706153
9	500	1	1,99	5,97706153
10	550	1	1,99	5,97706153
11	600	1	1,985	5,95521022
12	800	1	1,98	5,9330381
13	1000	1	1,97	5,88932452
14	2000	1	1,895	5,55218429
15	3000	1	1,785	5,05276441
16	4000	1	1,66	4,40216176
17	5000	1	1,535	3,7221676
18	5500	1	1,47	3,34634669
19	6000	1	1,405	2,95352648
20	7000	1	1,295	2,24539537
21	8000	1	1,195	1,54735811
22	10000	1	1,025	0,21447731
23	15000	1	0,74	-2,61536561
24	20000	1	0,57	-4,88250289
25	25000	1	0,464	-6,66964039
26	30000	1	0,3905	-8,16757924
27	50000	1	0,237	-12,5050331
28	80000	1	0,1485	-16,5654709
29	100000	1	0,119	-18,4890608
30	150000	1	0,0795	-21,9926574



Una vez simulado en Multisim nos queda de la siguiente manera:



5.3. FILTRO PASO ALTO

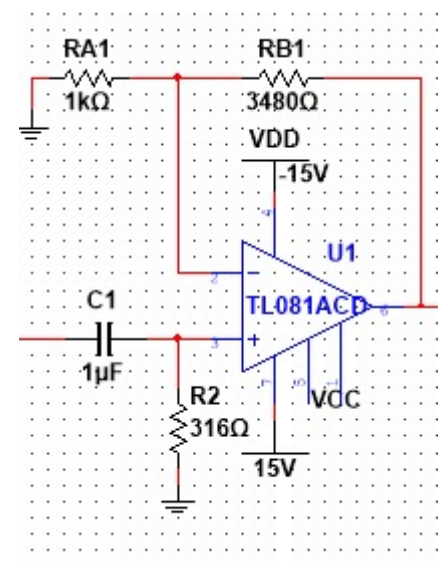
Este filtro nos permitirá filtrar las señales que estén por encima de los 500Hz que se especifican en el enunciado.

Llamaremos V_{o1} a la tensión que hay a la salida del operacional y V_e a la tensión que entra por R_2 .

La ganancia y frecuencia de corte de este filtro será:

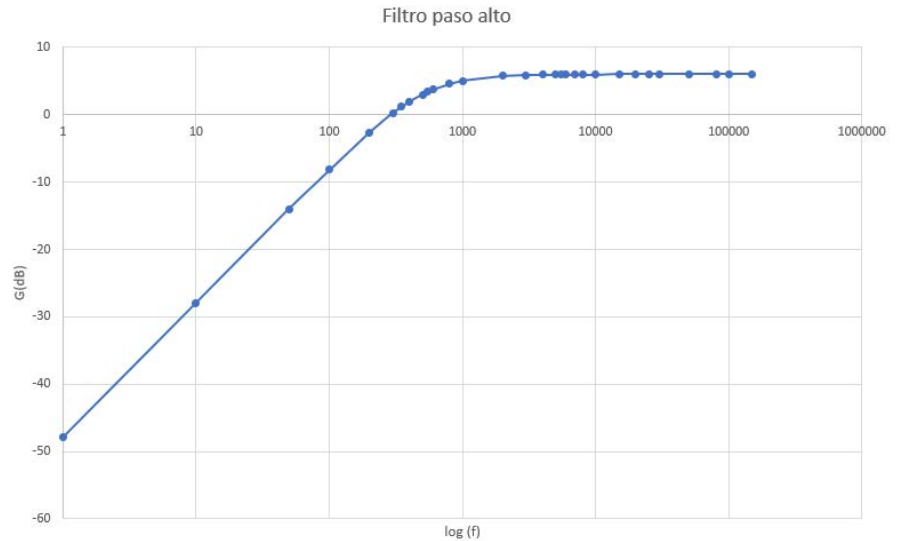
$$G_1 = \frac{V_{o1}}{V_e} = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \cdot \frac{j\omega C_1 R_2}{1 + j\omega C_1 R_2}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C_1 R_2} = 500\text{Hz} \rightarrow C_1 = 1\mu\text{F}; R_2 = 318,3\Omega$$

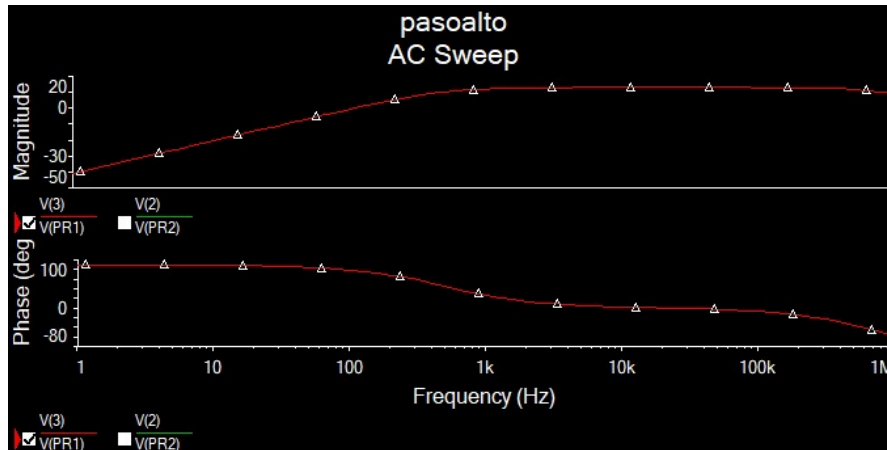


Escogemos una R2 de 316Ω que es la resistencia estandarizada. La frecuencia de corte cambiará a 503,65Hz. Para poder visualizar el Diagrama de Bode hemos realizado el mismo procedimiento que con el filtro paso bajo.

Valor	Frecuencia (Hz)	Amplitud entrada	Amplitud Salida	G(dB)
1	1	1	0,00401	-47,9371125
2	10	1	0,04	-27,9588002
3	50	1	0,199	-14,0229385
4	100	1	0,393	-8,11214899
5	200	1	0,74	-2,61536561
6	300	1	1,03	0,25674449
7	350	1	1,145	1,17610973
8	400	1	1,25	1,93820026
9	500	1	1,41	2,98438225
10	550	1	1,475	3,37584041
11	600	1	1,54	3,75041442
12	800	1	1,7	4,60897843
13	1000	1	1,785	5,03276441
14	2000	1	1,94	5,7560346
15	3000	1	1,965	5,86725109
16	4000	1	1,98	5,93303381
17	5000	1	1,99	5,97706153
18	5500	1	1,99	5,97706153
19	6000	1	1,995	5,998858
20	7000	1	1,995	5,998858
21	8000	1	1,995	5,998858
22	10000	1	1,995	5,998858
23	15000	1	2	6,02059991
24	20000	1	2	6,02059991
25	25000	1	2	6,02059991
26	30000	1	2	6,02059991
27	50000	1	2	6,02059991
28	80000	1	2	6,02059991
29	100000	1	2	6,02059991
30	150000	1	2	6,02059991



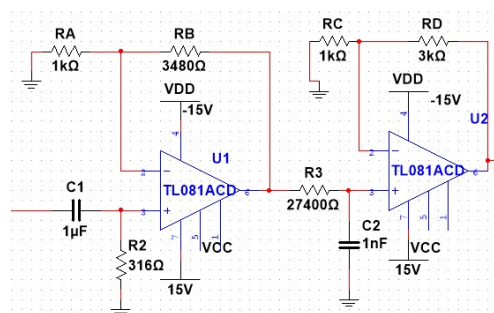
Una vez simulado en Multisim nos queda de la siguiente manera:



5.4. FILTRO PASA BANDA

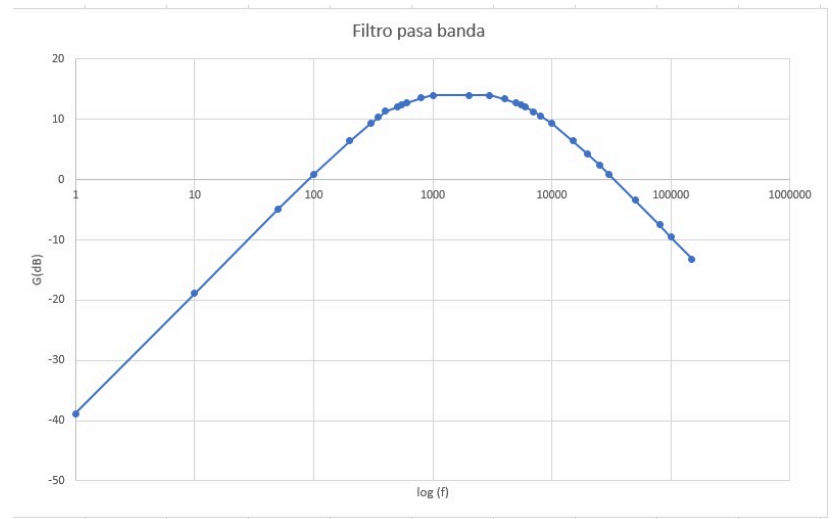
Un filtro pasa banda consiste en un filtro paso bajo y un filtro paso alto unidos. La ganancia del filtro completo será:

$$G_T = G_1 \cdot G_2 = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) \cdot \frac{j\omega C_1 R_2}{1 + j\omega C_1 R_2} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C_2 R_3}$$

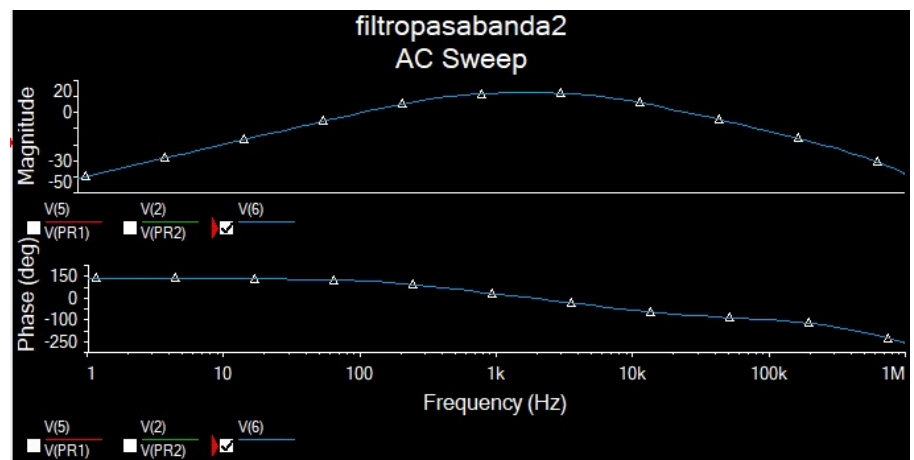


Para poder visualizar el diagrama de bloques recurrimos al Software Multisim y tomando valores en Excel como hemos hecho anteriormente.

Valor	Frecuencia (Hz)	Amplitud entrada	Amplitud Salida	G(dB)
1	1	1	0,0114	-38,861903
2	10	1	0,114	-18,861903
3	50	1	0,565	-4,95903104
4	100	1	1,115	0,94549735
5	200	1	2,11	6,48564911
6	300	1	2,925	9,32251741
7	350	1	3,3	10,3702788
8	400	1	3,7	11,3640345
9	500	1	4	12,0411998
10	550	1	4,2	12,4649858
11	600	1	4,35	12,7697851
12	800	1	4,775	13,5794675
13	1000	1	5	13,9794001
14	2000	1	5	13,9794001
15	3000	1	5	13,9794001
16	4000	1	4,675	13,3956323
17	5000	1	4,34	12,7497946
18	5500	1	4,15	12,3609619
19	6000	1	4	12,0411998
20	7000	1	3,675	11,3051469
21	8000	1	3,385	10,5911735
22	10000	1	2,915	9,29277118
23	15000	1	2,1	6,44438589
24	20000	1	1,625	4,21706731
25	25000	1	1,32	2,41147862
26	30000	1	1,11	0,90645958
27	50000	1	0,675	-3,41392454
28	80000	1	0,4205	-7,52468
29	100000	1	0,335	-9,49910386
30	150000	1	0,219	-13,1911177



El diagrama de Bode hecho en Multisim será el que aparece en la imagen de la derecha.



Nuestro objetivo es una señal de 0-10V. Del filtro pasa banda deberá salir una que vaya de -5 a +5V. Con la simulación en Multisim hemos hallado que para $R_A=1k\Omega$, $R_B=3480\Omega$, $R_C=1k\Omega$ y $R_D=3k\Omega$ y una tensión de entrada de $0,3162V_p$ nos sale una tensión de salida de $5V_p$.

Teóricamente sale que:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{5}{0,31} = 16,12 V/V$$

Pero con las resistencias usadas:

$$G = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) = 17,92 V/V$$

Esta diferencia puede deberse a las tolerancias de las resistencias y a los diferentes errores que se pueden ir acumulando en el sistema.

5.5. ETAPA FINAL

Del filtro pasa banda sale una señal filtrada que va de -5V a +5V. Ahora queremos transformar esta señal a la tensión especificada en el enunciado que es de 0 a +10V. Para ello, dividiremos esta etapa en 2.

En primer lugar, pondremos un sumador, que tiene la forma de la imagen. Para poder explicar su funcionamiento llamaremos la tensión que entra por R4, V_i y la que sale V_o . V_+ sale de divisor de tensión con la expresión:

$$V_+ = V_{cc} \frac{R7}{R7 + R6}$$

Como queremos que salgan 5V del sumador R6 debe ser el doble de R7. Por tanto, si $R7=100\Omega$, $R6=200\Omega$. Con el Buffer conseguimos eliminar las impedancias, y a la salida del mismo tenemos los 5V. La tensión entre R4 y R5 será:

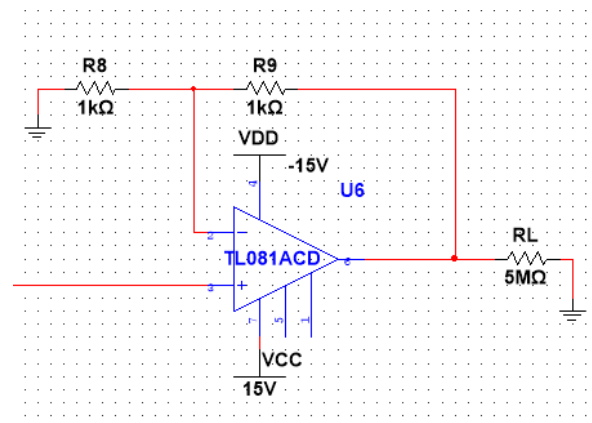
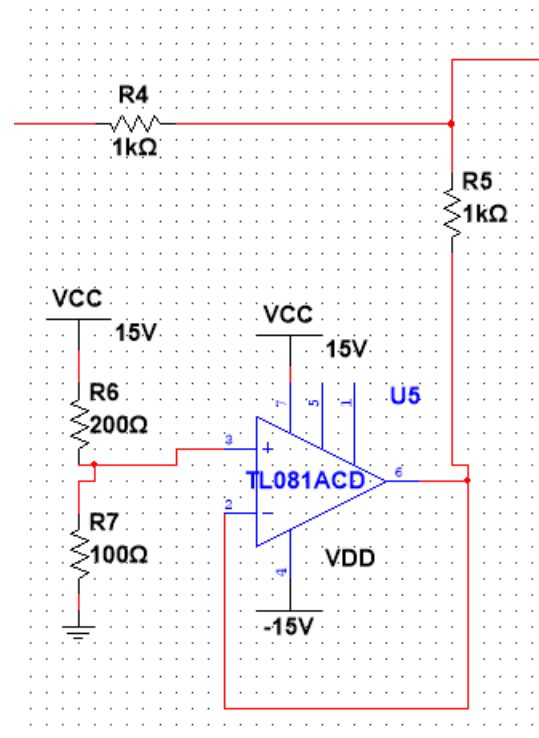
$$V_1 = \frac{V_i \cdot 1k + 5 \cdot 1k}{1k + 1k}$$

Como V_i es una senoidal que va de -5 a +5V estamos sumando 5 pero dividiendo la señal entre dos (por la suma de R4 a R5). Necesitaremos un amplificador para arreglar esto.

Este amplificador corresponde con la segunda parte de esta etapa, y tiene la forma que se ve en la imagen. Es un amplificador no inversor donde a la salida se le conecta la carga especificada en el enunciado. La ganancia de un amplificador no inversor es:

$$G = 1 + \frac{R9}{R8}$$

Como queremos que esta ganancia sea 2, $R9=R8=1k\Omega$.



6. ANALISIS TEORICO DE LOS ERRORES

Se calculará el error de offset causado por la tensión de offset y las corrientes de polarización.

Para el cálculo de este error es necesario obtener de las hojas de características los datos de tensión de offset a la entrada del AO TL081ACD y las corrientes de polarización. En este caso, sus valores son: $V_{IO} = 3 \text{ mV}$; $I_{IO} = 5 \text{ pA}$; $I_{IB} = 20 \text{ pA}$.

Para calcular el error a la salida también hay que tener en cuenta las ganancias, pues se va propagando a las etapas siguientes.

Symbol	Parameter	TL081I,M,AC,AI,AM,BC,BI,BM			TL081C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V_{IO}	Input Offset Voltage ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ $T_{min.} \leq T_{amb} \leq T_{max.}$		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3 	10 13	mV
	TL081 TL081A TL081B TL081 TL081A TL081B							

I_{io}	Input Offset Current * $T_{amb} = 25^{\circ}C$ $T_{min.} \leq T_{amb} \leq T_{max.}$		5	100 4		5	100 4	pA nA
I_{ib}	Input Bias Current * $T_{amb} = 25^{\circ}C$ $T_{min.} \leq T_{amb} \leq T_{max.}$		20	200 20		20	400 20	pA nA

En primer lugar, se calcula el error a la salida debido a la tensión a la entrada de cada AOs:

Buffer: $V_{OB} = V_{IO} * G_B * G_{pasa\ banda} * G_F = 0\ mV$, ya que el condensador a la salida elimina las señales continua.

Paso alto: $V_{PA} = V_{IO} * G_{pasa\ banda} * G_F = 107.52\ mV$

Paso bajo: $V_{PB} = V_{IO} * G_{paso\ bajo} * G_F = 24\ mV$

Etapla final: $V_{OF} = V_{IO} * G_F = 6\ mV$

$$V_{OT} = V_{OB} + V_{PA} + V_{PB} + V_{OF} = 137.52\ mV$$

Lo siguiente es calcular el error debido a las corrientes de polarización, para lo que también es necesario calcular las resistencias equivalentes de Thévenin en cada terminal del AO. La tensión a la entrada del AO debido a las corrientes de polarización se calcula mediante la fórmula:

$$V_d = I_{IB} \cdot |R_{th-} - R_{th+}| + I_{IO} \cdot \frac{(R_{th-} + R_{th+})}{2}$$

Buffer: $R_{th+} = R1$; $R_{th-} = 0$

$$V_{db} = 20 * 10^{-12} * |2200| + 5 * 10^{-12} * \frac{2200}{2} = 0\ nV$$

$$V_{0b} = V_{db} * G_B * G_{pasa\ banda} * G_F = 0\ \mu V$$

Por el condensador a la salida que elimina las señales continuas

Paso alto: $R_{th+} = R2$; $R_{th-} = RA//RB$

$$V_{dPA} = 20 * 10^{-12} * |776.79 - 316| + 5 * 10^{-12} * \frac{460.79}{2} = 10.36\ nV$$

$$V_{0PA} = V_{db} * G_{pasa\ banda} * G_F = 0.371\ \mu V$$

Paso bajo: $R_{th+} = R3$; $R_{th-} = RC//RD$

$$V_{dPB} = 20 * 10^{-12} * |750 - 27400| + 5 * 10^{-12} * \frac{26650}{2} = 600\ nV$$

$$V_{0PB} = V_{db} * G_{paso\ bajo} * G_F = 4.797\ \mu V$$

Etapla final: $R_{th+} = R4//R5$; $R_{th-} = R8//R9$

$$V_{dF} = 20 * 10^{-12} * |500 - 500| + 5 * 10^{-12} * \frac{0}{2} = 0\ nV$$

$$V_{0F} = V_{db} * G_F = 0\ \mu V$$

El error de offset a la salida debido a las corrientes de polarización es la suma de estas calculadas.

$$V_{oc} = V_{db} + V_{dPA} + V_{dPB} + V_{dF} = 5.168\ \mu V$$

El error total de offset a la salida será, por tanto:

$$V_{osalida} = V_{OT} + V_{oc} = 137.52\ mV$$

7. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE LOS AO

La corriente (típica) de entrada al operacional que proporcionan las fuentes según el datasheet del operacional es:

$$I_{cc} = 1,4mA$$

Calculamos la potencia disipada por cada operacional:

El primer operacional es un Buffer, solo circula la corriente que sale del operacional y va hasta R2. Consideramos el condensador como cortocircuito.

$$\begin{aligned}
 P_{AO1} &= I_{cc} \cdot (V_{cc} - (-V_{cc})) + \frac{Vo1}{R2} \cdot (V_{cc} - Vo1) \\
 &= 1,4mA \cdot (15 - (-15)) + 0,981mA \cdot (15 - 0,31) \\
 &= 56,41mW
 \end{aligned}$$

El segundo es un filtro paso alto que la corriente que sale del operacional se divide en 2 ramas. La corriente total será la que pasa por R3 y la que pasa por RB:

$$\begin{aligned}
 I_{R3} &= \frac{Vo2}{R3} = \frac{1,265}{27400} = 0,04616mA; I_{RB} = \frac{Vo2}{RA + RB} = \frac{1,265}{4480} = 0,28mA \\
 P_{AO2} &= I_{cc} \cdot (V_{cc} - (-V_{cc})) + (I_{R3} + I_{RB}) \cdot (V_{cc} - Vo2) \\
 &= 1,4mA \cdot (15 - (-15)) + 0,32616mA \cdot (15 - 1,265) \\
 &= 46,47mW
 \end{aligned}$$

El tercero es un filtro paso bajo, que al igual que pasa en el anterior, la corriente que sale del operacional se divide en la corriente que pasa por RD y R4.

$$\begin{aligned}
 I_{R4} &= \frac{Vo3}{R4} = \frac{5}{1000} = 5mA; I_{RD} = \frac{Vo3}{RC + RD} = \frac{5}{4000} = 1,25mA \\
 P_{AO3} &= I_{cc} \cdot (V_{cc} - (-V_{cc})) + (I_{R4} + I_{RD}) \cdot (V_{cc} - Vo3) \\
 &= 1,4mA \cdot (15 - (-15)) + 6,25mA \cdot (15 - 5) \\
 &= 104,5mW
 \end{aligned}$$

El cuarto operacional corresponde al sumador y es otro Buffer.

$$\begin{aligned}
 P_{AO4} &= I_{cc} \cdot (V_{cc} - (-V_{cc})) + \frac{Vo4}{R5} \cdot (V_{cc} - Vo4) \\
 &= 1,4mA \cdot (15 - (-15)) + 5mA \cdot (15 - 0) \\
 &= 117mW
 \end{aligned}$$

El quinto operacional es un amplificador donde la corriente que sale del mismo va hacia la realimentación y la carga.

$$I_{RL} = \frac{Vo5}{RL} = \frac{10}{5M} = 2\mu A; I_{R9} = \frac{Vo5}{R9 + R8} = \frac{10}{2000} = 5mA$$

$$\begin{aligned} P_{AO5} &= I_{cc} \cdot (V_{cc} - (-V_{cc})) + (I_{R9} + I_{RL}) \cdot (V_{cc} - Vo5) \\ &= 1,4mA \cdot (15 - (-15)) + 5mA \cdot (15 - 0) \\ &= 117mW \end{aligned}$$

En conclusión:

$$P_{AO1} = 56,41mW$$

$$P_{AO3} = 104,5mW$$

$$P_{AO5} = 117mW$$

$$P_{AO2} = 46,47mW$$

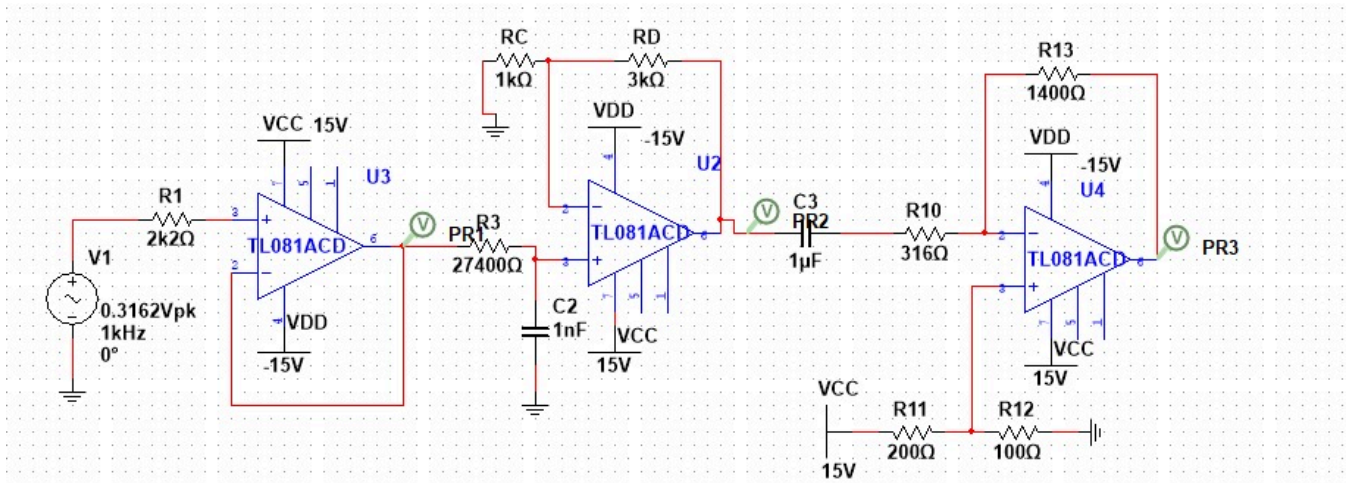
$$P_{AO4} = 117mW$$

P_{tot}	Power Dissipation	680	mW
-----------	-------------------	-----	----

Como vemos, ninguno de ellos llega a los 680mW de potencia máxima que puede disipar el operacional. No hay peligro para ninguno de ellos.

8. ALTERNATIVAS

Con tal de reducir el número de operacionales hemos desarrollado un circuito que pasará a tener 3 operacionales, dos menos de los que teníamos en nuestro circuito original. El circuito sería el siguiente:



La diferencia es que, en nuestro circuito original, sobre el que se ha basado el proyecto, teníamos un operacional que hacía de paso alto, otro de sumador y otro de amplificador. En este circuito, el último operacional tiene esas tres funciones. La tensión que entra por V_x es la que se suma, C_3 y R_{10} regulan la frecuencia de corte del filtro y R_{10} y R_{13} regulan la ganancia del amplificador. Es una ganancia muy elegante y que funciona, pero, sobre todo, más simple.

9. CONCLUSIONES

Con este proyecto hemos aprendido todas las etapas que se deben llevar a cabo al desarrollar un proyecto de esta magnitud. Es importante diseñar cada una de las partes y etapas por separado, en vez de diseñarlas todas a la vez, porque si algo va mal es más complicado de saber qué está fallando.

Primero realizamos los cálculos teóricos de la etapa de entrada para tener claro que fuente usar. Esto nos llevó un tiempo puesto que no conocíamos las fórmulas que relacionan las magnitudes del micrófono con las magnitudes que a nosotros nos interesaban para nuestro circuito.

El siguiente paso fue diseñar el filtro. Obtuvimos dificultades al no entender porque nuestro operacional no filtraba correctamente. Lo solucionamos cambiando el tipo de filtro. También nos extrañó la diferencia que se da entre los cálculos teóricos y la simulación respecto a la ganancia del filtro pasa banda, pero sin duda, al realizar un proyecto así hay que tenerlo en cuenta.

Por último, diseñamos la etapa de amplificación en la que la única dificultad que encontramos fue entender porque dividía nuestra señal por dos. Cuando comprendimos que era por las resistencias, añadimos el último de los amplificadores.