




DOCUMENTO NÚMERO 2: MEMORIA DE CÁLCULO

 <p>ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR SEVILLA</p>	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 106 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 107 de 222
	DOCUMENTO Nº2: MEMORIA DE CÁLCULO	


ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 – ETAPA DEL MICRÓFONO.....	110
CAPÍTULO 2 – ETAPA PREAMPLIFICADORA.....	112
CAPÍTULO 3 – ETAPA DEL FILTRO DE PONDERACIÓN A.....	115
3.1 – Primer sub-filtro.....	116
3.2 – Segundo sub-filtro.....	117
3.3 – Tercer sub-filtro.....	118
CAPÍTULO 4 – ETAPA DE AUTORRANGO	119
4.1 – Tramos del autorrango.....	120
4.1.1 – Tramo 1	120
4.1.2 – Tramo 2.....	121
4.2 – Filtro paso-bajo	122
4.3 – Rectificador de onda completa	123
4.4 – Comparador con histéresis	124
CAPÍTULO 5 – ETAPA DEL CONVERTOR RMS-DC	128
CAPÍTULO 6 – ETAPA DEL CONVERTOR ANALÓGICO-DIGITAL	131
CAPÍTULO 7 – ETAPA DEL CONVERTIDOR BUCK.....	133
CAPÍTULO 8 – ETAPA DE LA BOMBA DE CARGA.....	136
CAPÍTULO 9 – ETAPA GENERADORA DE 2 V.....	137
CAPÍTULO 10 – DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTVOLTAICA.....	139
10.1 - Energía total de los equipos	139
10.2 – Horas de sol de pico	140
10.3 – Elección de la placa solar	141
10.4 – Elección de la batería	141

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 108 de 222
	DOCUMENTO Nº2: MEMORIA DE CÁLCULO	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 38. Etapa del micrófono	110
Figura 39. Rango dinámico del micrófono	111
Figura 40. Etapa inicial preamplificadora	112
Figura 41. Etapa final preamplificadora.....	114
Figura 42. Etapa del filtro de ponderación A	116
Figura 43. Etapa inicial de autorango.....	119
Figura 44. Tramos del rango dinámico.....	120
Figura 45. Circuito de ganancia del autorango.....	121
Figura 46. Filtro paso-bajo del autorango	122
Figura 47. Rectificador de onda completa del autorango	123
Figura 48. Comparador con histéresis del autorango	124
Figura 49. Respuesta del comparador con histéresis	127
Figura 50. Etapa final de autorango	127
Figura 51. Etapa inicial del conversor RMS-DC	129
Figura 52. Etapa final del convertidor RMS-DC.....	130
Figura 53. Etapa inicial del conversor analógico-digital.....	131
Figura 54. Etapa final del convertidor analógico-digital	132
Figura 55. Etapa inicial del convertidor buck.....	133
Figura 56. Etapa final del convertidor buck	135
Figura 57. Etapa inicial de la bomba de carga	136
Figura 58. Etapa final de la bomba de carga.....	136
Figura 59. Etapa inicial generadora de 2 V	137
Figura 60. Etapa final generadora de 2 V.....	138
Figura 61. Irradiancia por mes en Sevilla	140

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 109 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. Energía necesaria por día para alimentar a los equipos 139

CAPÍTULO 1 – ETAPA DEL MICRÓFONO

A continuación, se calcularán la máxima tensión generada por el micrófono en el ámbito de aplicación de este proyecto y el valor del condensador de filtro del mismo.

Se utilizará el montaje recomendado en el datasheet, el cual corresponde con el mostrado en la figura 38.

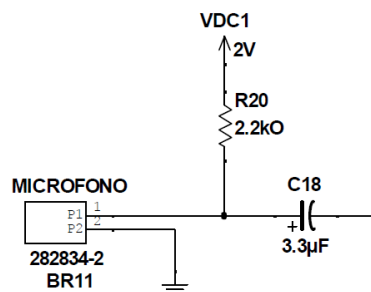


Figura 38. Etapa del micrófono

Conversión de la ganancia en decibelios a ganancia en mV/Pa, conociendo que la referencia es de 1 V/Pa:

$$\text{Sensibilidad (db)} = 20 \cdot \log\left(\frac{S}{S_{\text{ref}}}\right) \Rightarrow -38 = 20 \cdot \log\left(\frac{S}{1}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow S = 10^{\frac{-38}{20}} = 0,012589 \frac{\text{V}}{\text{Pa}}$$

Cálculo de la tensión de salida eficaz máxima del micrófono, conociendo que la presión máxima de uso será 120 db y que la presión de referencia es 20 μ Pa:

$$P_{\max} \text{ (db)} = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{\max}}{P_{\text{ref}}}\right) \Rightarrow 120 = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{\max}}{20 \cdot 10^{-6}}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{\max} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{120}{20}} = 20 \text{ Pa}$$

$$V_{\text{microfono}_{\max}} = P_{\max} \cdot S = 20 \cdot 0,012589 = 251,78 \text{ mV}$$

Cálculo del condensador de salida del micrófono para bloquear la componente de continua, conociendo que la resistencia de alimentación según datasheet es 2,2 K Ω y que la frecuencia de corte se fijará en 20 Hz:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2200 \cdot 20} = 3,617 \mu\text{F}$$

Se colocará un condensador normalizado de 3,3 μ F que corresponde a una frecuencia de corte de 22 Hz.

Teniendo en cuenta que la relación señal ruido del micrófono es de 58 db, el rango dinámico del mismo va desde 120 db hasta 36 db como muestra la figura 39 mostrada a continuación.

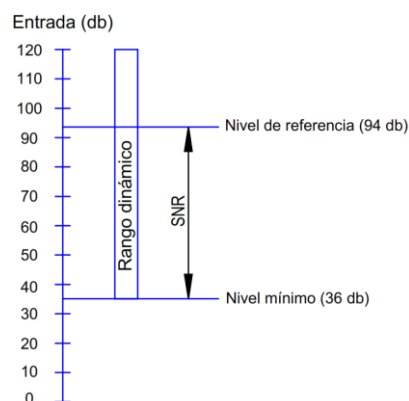


Figura 39. Rango dinámico del micrófono

CAPÍTULO 2 – ETAPA PREAMPLIFICADORA

Los cálculos de esta etapa han sido basados en la etapa preamplificadora realizada por Federico Miyara en su documento titulado “Sonómetro libre”, el cual está liberado al público y se puede observar en la referencia [22].

A continuación, se calculará la ganancia de la etapa preamplificadora para que, a la salida del filtro de ponderación A, la tensión máxima sea de 1 V rms. Se eligió esta tensión porque el fondo de escala del convertidor analógico-digital es de 2 V y, de esta manera, se tiene 1 V de margen de seguridad.

La implementación de esta etapa será mediante un amplificador no inversor, tal y como se puede observar en la figura 40.

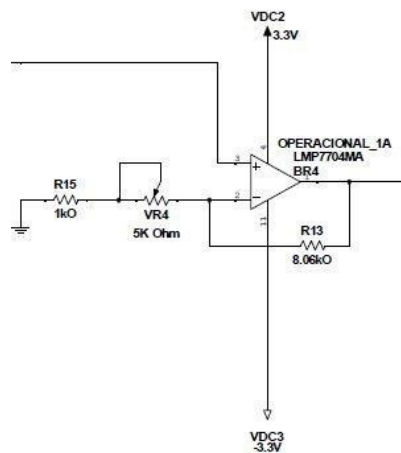



Figura 40. Etapa inicial preamplificadora

La máxima ganancia que proporciona el filtro de ponderación A es de 1,3 db a los 2,5 KHz, o lo que es lo mismo:

$$1,3 = 20 \cdot \log(G_{\text{filtro } A_{\text{max}}}) \Rightarrow G_{\text{filtro } A_{\text{max}}} = 10^{\frac{1,3}{20}} = 1,161$$

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 113 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	

Conociendo esto, la ganancia de la etapa preamplificador tiene que ser:

$$G_{\text{filtro A}_{\text{max}}} = \frac{V_{\text{out A}}}{V_{\text{in A}}} \Rightarrow V_{\text{in A}} = \frac{V_{\text{out A}}}{G_{\text{filtro A}_{\text{max}}}} = \frac{1}{1,161} = 861,33 \text{ mV}$$

$$G_{\text{Preamp}} = \frac{V_{\text{out Preamp}}}{V_{\text{in Preamp}}} = \frac{V_{\text{in A}}}{V_{\text{microfono}_{\text{max}}}} = \frac{861,33}{251,78} = 3,42$$

A continuación se calculará el valor resistivo que tendrá que tener el potenciómetro para que la etapa preamplificadora tenga una ganancia de 3,42, fijando R13 a 8,06 KΩ:

$$G_{\text{Preamp}} = 1 + \frac{R_{13}}{VR4 + R_{15}} \Rightarrow VR4 = \frac{R_{13}}{(G_{\text{Preamp}} - 1)} - R_{15} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow VR4 = \frac{8060}{(3,42 - 1)} - 1000 = 2330,58 \Omega$$

Estos cálculos estaban basados en que, posteriormente, se utilizaría una etapa de autorango. Debido a que al final se utilizó un convertidor rms-dc con un rango dinámico muy grande, la etapa de autorango quedó obsoleta, por lo que se ajustó la ganancia de la etapa preamplificadora para ajustar el nuevo rango dinámico. Se desea ajustar el rango dinámico entre 40 y 120 decibelios por lo que, tras hacer pruebas en el laboratorio, la ganancia de la etapa preamplificadora pasa a ser 100.

A continuación, se calculará el valor resistivo que tendrá que tener el potenciómetro para que la etapa preamplificadora tenga una ganancia de 100, fijando R13 a 100 KΩ:

$$G_{\text{Preamp}} = 1 + \frac{R_{13}}{VR4 + R_{15}} \Rightarrow VR4 = \frac{R_{13}}{(G_{\text{Preamp}} - 1)} - R_{15} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow VR4 = \frac{100.000}{(100 - 1)} - 1000 = 10,10 \Omega$$

Tras realizar el montaje y analizar el circuito, se descubre que hay bastante ruido en la alimentación de los componentes, por lo que se procede a añadir un condensador de 100 nF en las alimentaciones del operacional para filtrarlas, y que es necesaria una resistencia de 100 KΩ en la entrada positiva del operacional para permitir el paso de la corriente de polarización.

El circuito resultante es el que puede verse en la figura 41.

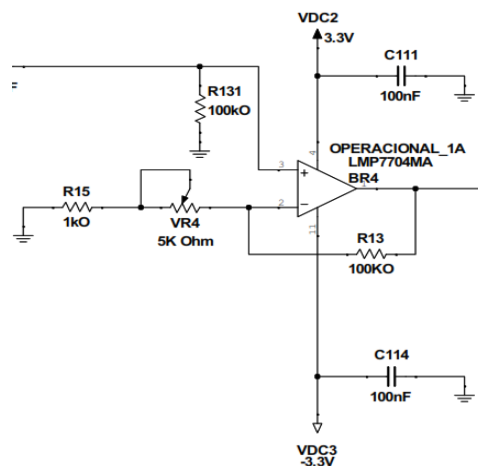



Figura 41. Etapa final preamplificadora

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 115 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	

CAPÍTULO 3 – ETAPA DEL FILTRO DE PONDERACIÓN A

El diseño y los cálculos de esta etapa se han tomado del filtro de ponderación A realizado por Federico Miyara en su documento titulado “Sonómetro libre”, el cual está liberado al público y se puede observar en la referencia [22]. Tras comprobar mediante simulación que la respuesta en frecuencia de esta etapa correspondía a la del filtro de ponderación A, se incorporó al proyecto.

En esta etapa se incluirán los diferentes filtros necesarios para hacer que el sonómetro responda como el oído humano, atenuando las altas y bajas frecuencias y respondiendo mejor a las frecuencias intermedias.

El filtro de ponderación A es un filtro de orden 6 cuya respuesta en frecuencia es la siguiente:

$$A(f) = 20 \cdot \log \left(\frac{1,2588 \cdot 12200^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20,6^2) \cdot \sqrt{f^2 + 107,7^2} \cdot \sqrt{f^2 + 737,9^2} \cdot (f^2 + 12200^2)} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A(f) = 20 \cdot \log \left(\frac{12200^2}{f^2 + 12200^2} \cdot \frac{f^2}{f^2 + 20,6^2} \cdot \frac{1,2588 \cdot f^2}{\sqrt{f^2 + 107,7^2} \cdot \sqrt{f^2 + 737,9^2}} \right)$$

Como se puede observar, se trata de un filtro paso-bajo con dos polos coincidentes en 12200 Hz, un filtro paso-alto con dos polos coincidentes en 20,6 Hz y un filtro paso-alto con polos en 107,7 Hz y en 737,9 Hz. La implementación de estos filtros será la representada en la figura 42.

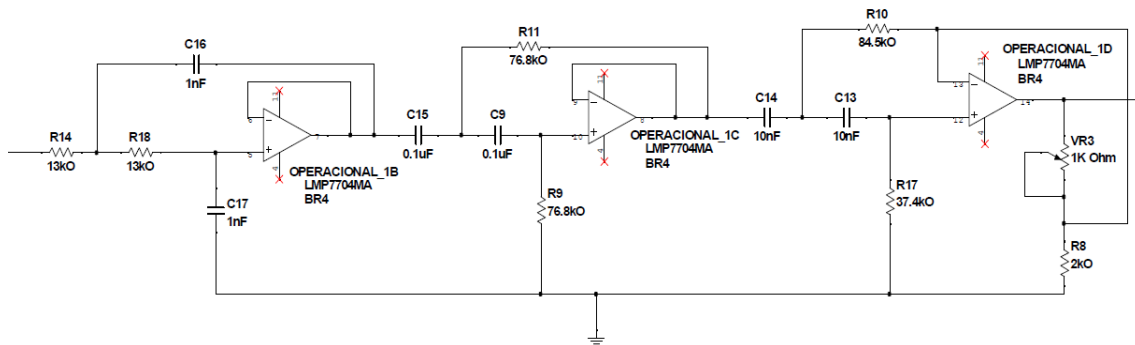


Figura 42. Etapa del filtro de ponderación A

3.1 – Primer sub-filtro

A continuación, se calcularán los componentes del filtro paso-bajo, el cual se implementará mediante un filtro paso-bajo de segundo orden Sallen-Key.

La función de transferencia del filtro es la siguiente:

$$\frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{1}{1 + 2 \cdot R \cdot C_2 \cdot s + R^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot s^2}$$


La frecuencia natural y el factor de calidad son:

$$\omega_0 = \frac{1}{R \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}} \quad Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$

Como el filtro tiene los dos polos coincidentes, tiene $Q = \frac{1}{2}$, lo que resulta en $C_1 = C_2 = C$. Entonces:

$$R_{14} = R_{18} = R \quad C_{16} = C_{17} = C$$

$$R \cdot C = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0} = 1,30455 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 117 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	

Fijando el valor del condensador y despejando el de la resistencia se obtiene:

$$C = 1 \text{ nF} \qquad R = 13046 \, \Omega \xrightarrow{\text{normalizando}} R = 13 \text{ K}\Omega$$

3.2 – Segundo sub-filtro

A continuación, se calcularán los componentes del primer filtro paso-alto, el cual se implementará mediante un filtro paso-alto de segundo orden Sallen-Key.

La función de transferencia del filtro es la siguiente:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot C^2 \cdot s^2}{1 + 2 \cdot C \cdot R_1 \cdot s + C^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot s^2}$$

La frecuencia natural y el factor de calidad son:

$$\omega_0 = \frac{1}{C \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}} \qquad Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$


Como el filtro tiene los dos polos coincidentes, tiene $Q = \frac{1}{2}$, lo que resulta en $R_1 = R_2 = R$. Entonces:

$$R_9 = R_{11} = R \qquad C_9 = C_{15} = C$$

$$R \cdot C = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0} = 7,72597 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Fijando el valor del condensador y despejando el de la resistencia se obtiene:

$$C = 1 \, \mu\text{F} \qquad R = 77260 \, \Omega \xrightarrow{\text{normalizando}} R = 76,8 \text{ K}\Omega$$

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 118 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	

3.3 – Tercer sub-filtro

A continuación, se calcularán los componentes del segundo filtro paso-alto, el cual se implementará mediante un filtro paso-alto de segundo orden Sallen-Key con una ligera modificación al final para ajustar la ganancia a 1 en 1 KHz.

Las ecuaciones de la función de transferencia, de la frecuencia natural y del factor de calidad son las indicadas en el filtro anterior, ya que ambos se implementarán mediante el mismo tipo de filtro.

En este caso, el filtro tiene polos reales diferentes, lo que resulta en:

$$Q = \frac{\sqrt{f_1 \cdot f_2}}{f_1 + f_2} = \frac{\sqrt{107,7 \cdot 737,9}}{107,7 + 737,9} = 0,33338$$

$$R_{17} = 0,44457 \cdot R_{10}$$

Conociendo esta igualdad y fijando el valor del condensador, se obtiene lo siguiente:

$$C_{13} = C_{14} = C = 10 \text{ nF}$$

$$R_{10} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C \cdot \sqrt{0,44457}} = \frac{1}{1771,28 \cdot 10^{-9} \cdot 0,66676} = 84673 \Omega$$

$$R_{17} = 37643 \Omega$$

Tras normalizar los valores de las resistencias se obtiene:

$$R_{10} = 84,5 \text{ K}\Omega$$

$$R_{17} = 37,4 \text{ K}\Omega$$

$$C = 10 \text{ nF}$$

CAPÍTULO 4 – ETAPA DE AUTORRANGO

El diseño y los cálculos de esta etapa han sido basados en la etapa de autorranco realizada por Federico Miyara en su documento titulado “Sonómetro libre”, el cual está liberado al público y se puede observar en la referencia [22].

En esta etapa se adaptará la señal del micrófono para que siempre llegue al convertidor rms-dc en un margen aceptable de tensiones.

El circuito que se utilizará es el que se puede observar en la figura 43:

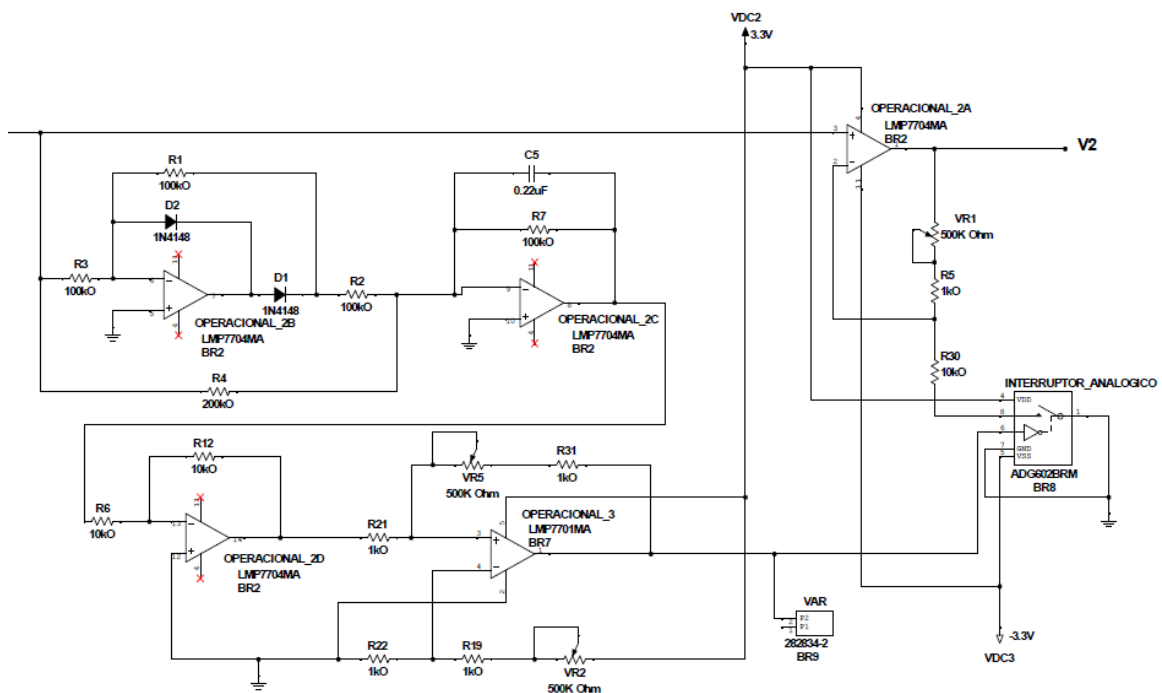


Figura 43. Etapa inicial de autorranco

4.1 – Tramos del autorrango

Se crearán dos tramos, yendo el primero desde 120 db hasta 70 db y el segundo desde 90 db hasta 36 db, como se puede ver en la figura 44:

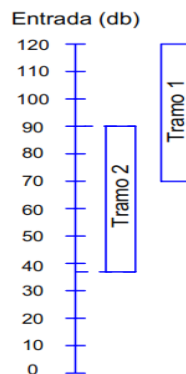


Figura 44. Tramos del rango dinámico

4.1.1 – Tramo 1

La máxima tensión de este rango será la correspondiente a 120 db, cuando el filtro de ponderación A proporciona su máxima ganancia, y es la siguiente:

$$P_{120} \text{ (db)} = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{120}}{P_{\text{ref}}}\right) \Rightarrow 120 = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{120}}{20 \cdot 10^{-6}}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{120} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{120}{20}} = 20 \text{ Pa}$$

$$V_{\text{microfono}_{120}} = P_{120} \cdot \text{Sensibilidad} = 20 \cdot 0,012589 = 251,78 \text{ mV}$$

$$V_{\text{inmax}} = V_{\text{microfono}_{120}} \cdot G_{\text{filtro A}} \cdot G_{\text{preamp}} = 251,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1,161 \cdot 3,42 = 1 \text{ V}$$

En este rango no se necesita ninguna ganancia adicional, ya que la máxima señal de entrada es grande, por lo que la ganancia de la etapa de autorrango será 1.

4.1.2 – Tramo 2

La máxima tensión de este rango será la correspondiente a 90 db, cuando el filtro de ponderación A proporciona su máxima ganancia, y es la siguiente:

$$P_{90} \text{ (db)} = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{90}}{P_{\text{ref}}}\right) \Rightarrow 90 = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{90}}{20 \cdot 10^{-6}}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{90} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{90}{20}} = 0,6324 \text{ Pa}$$

$$V_{\text{microfono}_{90}} = P_{90} \cdot \text{Sensibilidad} = 0,6324 \cdot 0,012589 = 7,962 \text{ mV}$$

$$V_{\text{in}_{\text{max}}} = V_{\text{microfono}_{90}} \cdot G_{\text{filtro A}} \cdot G_{\text{preamp}} = 7,962 \cdot 10^{-3} \cdot 1,161 \cdot 3,42 = 31,614 \text{ mV}$$

En este rango se necesita una ganancia adicional, ya que la máxima señal de entrada es pequeña.

El circuito de ganancia, tras aislarlo del circuito de autorango, es el mostrado en la figura 45:

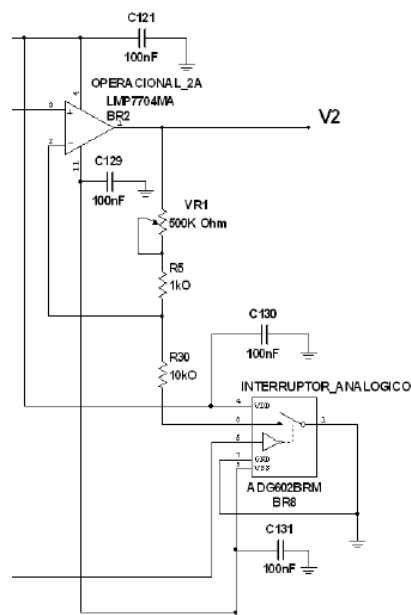


Figura 45. Circuito de ganancia del autorango

La ganancia de la etapa de autorranego necesaria para este tramo será de:

$$\text{Ganancia autorranego} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{31,614 \cdot 10^{-3}} = 31,63$$

Cálculo de los valores de las resistencias necesarias para obtener dicha ganancia mediante un amplificador no inversor:

$$\text{Ganancia} = 1 + \frac{(VR1 + R_5)}{R_{30}} \Rightarrow 31,63 = 1 + \frac{(VR1 + 1000)}{R_{30}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 30,63 \cdot R_{30} = VR1$$

Fijando R_{30} a $10 \text{ K}\Omega$, se obtienen lo siguiente:

$$\begin{cases} R_{30} = 10 \text{ K}\Omega \\ VR1 = 306,3 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

4.2 – Filtro paso-bajo

El filtro paso-bajo, tras aislarlo del circuito de autorranego, es el mostrado en la figura 46:

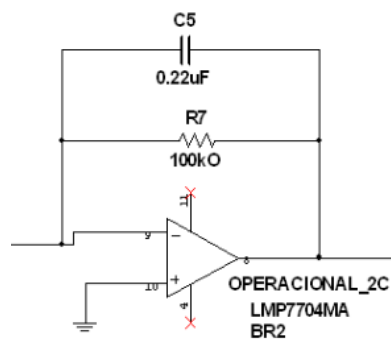


Figura 46. Filtro paso-bajo del autorranego

La frecuencia de corte de este filtro tiene que ser bastante inferior a la mínima frecuencia de la onda rectificada, la cual es el doble de la frecuencia mínima de audio, que es 20 Hz.

Escogiendo una frecuencia de 7 Hz y una resistencia de 100 KΩ se obtiene lo siguiente:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \Rightarrow C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100000 \cdot 7} = 0,227 \mu\text{F} \xrightarrow{\text{Normalizando}}$$

$$\Rightarrow f_c = 0,22 \mu\text{F}$$

$$\tau = R \cdot C = 100000 \cdot 0,22 \cdot 10^{-6} = 0,022 \text{ s}$$

4.3 – Rectificador de onda completa

El rectificador de onda completa, tras aislarlo del circuito de autorrango, es el mostrado en la figura 47:

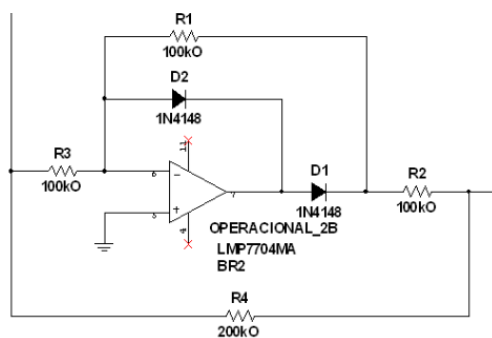


Figura 47. Rectificador de onda completa del autorrango

Para los valores de las resistencias de este montaje se partirá del valor de la resistencia colocada en el filtro paso-bajo (100 KΩ), con lo que queda en lo siguiente:

$$R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ K}\Omega$$

$$R_4 = 2 \cdot 100 \text{ K}\Omega = 200 \text{ K}\Omega$$

4.4 – Comparador con histéresis

El comparador con histéresis, tras aislarlo del circuito de autorrango, es el mostrado en la figura 48:

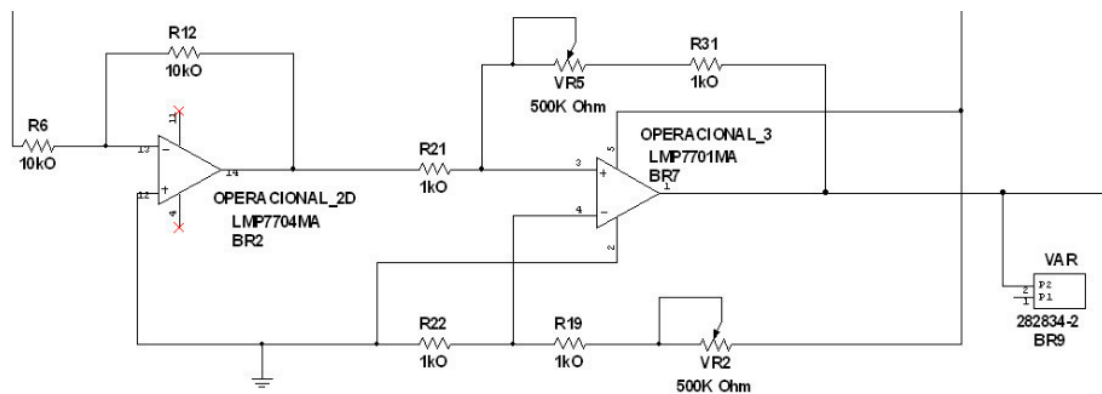



Figura 48. Comparador con histéresis del autorrango

Antes del comparador se encuentra un operacional inversor de ganancia 1 para volver positiva la tensión entrante.

Los valores de tensión de la histéresis del comparador, correspondientes a 90 db y 70 db, son:

$$V_{h2} = G_{\max} \cdot V_{\text{microfono}_{90 \text{ db}}} = G_{\max} \cdot S \cdot P_{90} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{h2} = (3,42 \cdot 1,161) \cdot 0,012589 \cdot \left(20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{90}{20}}\right) = 31,61 \text{ mV}$$

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 125 de 222
	DOCUMENTO Nº2: MEMORIA DE CÁLCULO	

$$V_{h1} = G_{\max} \cdot V_{\text{microfono}_{70 \text{ db}}} = G_{\max} \cdot S \cdot P_{70} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{h1} = (3,42 \cdot 1,161) \cdot 0,012589 \cdot \left(20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{70}{20}}\right) = 3,16 \text{ mV}$$

Las tensiones límite de la ventana de histéresis son:

$$V_{h1} = V_{\text{ref}} \cdot \frac{R_{21} + R_A}{R_A} - V_{\text{sat}+} \cdot \frac{R_{21}}{R_A}$$

$$V_{h2} = V_{\text{ref}} \cdot \frac{R_{21} + R_A}{R_A} + V_{\text{sat}-} \cdot \frac{R_{21}}{R_A}$$

$$V_{\text{ref}} = V_{\text{cc}+} \cdot \frac{R_{22}}{R_{22} + R_B}$$

$$R_A = (VR5 + R_{31})$$

$$R_B = (VR2 + R_{19})$$

Teniendo en cuenta que, según datasheet, las tensiones de saturación son $V_{\text{sat}+} = 3,27 \text{ V}$ y $V_{\text{sat}-} = 0,02 \text{ V}$, se calcula que el ancho de la ventana de histéresis es el siguiente:


$$H = V_{h2} - V_{h1} = V_{\text{sat}-} \cdot \frac{R_{21}}{R_A} + V_{\text{sat}+} \cdot \frac{R_{21}}{R_A} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 31,61 \cdot 10^{-3} - 3,16 \cdot 10^{-3} = 0,02 \cdot \frac{R_{21}}{R_A} + 3,27 \cdot \frac{R_{21}}{R_A} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 28,45 \cdot 10^{-3} = 3,29 \cdot \frac{R_{21}}{R_A} \Rightarrow (8,65 \cdot 10^{-3}) \cdot R_A = R_{21}$$

Fijando R_{21} y R_{31} a $1 \text{ K}\Omega$ se obtiene lo siguiente:

$$\begin{cases} R_{21} = 1 \text{ K}\Omega \\ R_A = (VR5 + R_{31}) = 115,61 \text{ K}\Omega \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_{21} = 1 \text{ K}\Omega \\ VR5 = 114,61 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 126 de 222
	DOCUMENTO Nº2: MEMORIA DE CÁLCULO	

El centro de la ventana de histéresis es el siguiente:

$$C = V_{h2} + V_{h1} = \left(V_{ref} \cdot \frac{R_{21} + R_A}{R_A} + V_{sat-} \cdot \frac{R_{21}}{R_A} \right) + \left(V_{ref} \cdot \frac{R_{21} + R_A}{R_A} - V_{sat+} \cdot \frac{R_{21}}{R_A} \right) =$$

$$= \left(V_{ref} \cdot \frac{1 + 115,61}{115,61} + 0,02 \cdot \frac{1}{115,61} \right) + \left(V_{ref} \cdot \frac{1 + 115,61}{115,61} - 3,27 \cdot \frac{1}{115,61} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 31,61 \cdot 10^{-3} + 3,16 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot V_{ref} - 28,11 \cdot 10^{-3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{ref} = 31,44 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{ref} = V_{cc+} \cdot \frac{R_{22}}{R_{22} + R_B} = 3,3 \cdot \frac{R_{22}}{R_{22} + R_B} = 31,44 \cdot 10^{-3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 103,96 \cdot R_{22} = R_B$$

Fijando R_{22} y R_{19} a $1 \text{ K}\Omega$ se obtiene lo siguiente:

$$\begin{cases} R_{22} = 1 \text{ K}\Omega \\ R_B = (R_{22} + R_{19}) = 103,96 \text{ K}\Omega \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_{22} = 1 \text{ K}\Omega \\ R_{19} = 102,96 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

Conociendo ya los valores de las resistencias, se procede a realizar el cálculo de los nuevos valores de las tensiones límite de la ventana de histéresis:

$$V_{h1} = V_{ref} \cdot \frac{R_{21} + R_A}{R_A} - V_{sat+} \cdot \frac{R_{21}}{R_A} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{h1} = 31,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1008,65 \cdot 10^{-3} - 3,27 \cdot 8,65 \cdot 10^{-3} = 3,42 \text{ mV}$$

$$V_{h2} = V_{ref} \cdot \frac{R_{21} + R_A}{R_A} + V_{sat-} \cdot \frac{R_{21}}{R_A} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{h2} = 31,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1008,65 \cdot 10^{-3} + 0,02 \cdot 8,65 \cdot 10^{-3} = 31,88 \text{ mV}$$

De esta manera, la respuesta del comparador con histéresis es la que se puede observar en la figura 49 mostrada a continuación.

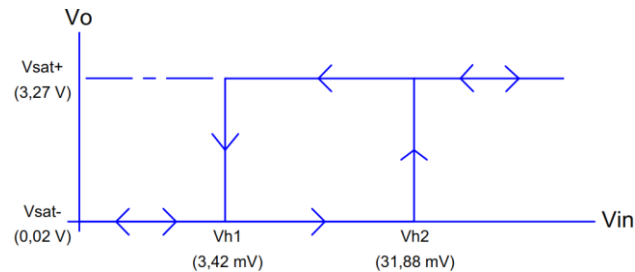


Figura 49. Respuesta del comparador con histéresis

Tras realizar el montaje y analizar el circuito, se descubre que hay bastante ruido en la alimentación de los componentes, por lo que se procede a añadir un condensador de 100 nF en las alimentaciones de dichos componentes para filtrarlas. El circuito resultante es el que se puede observar en la figura 50.

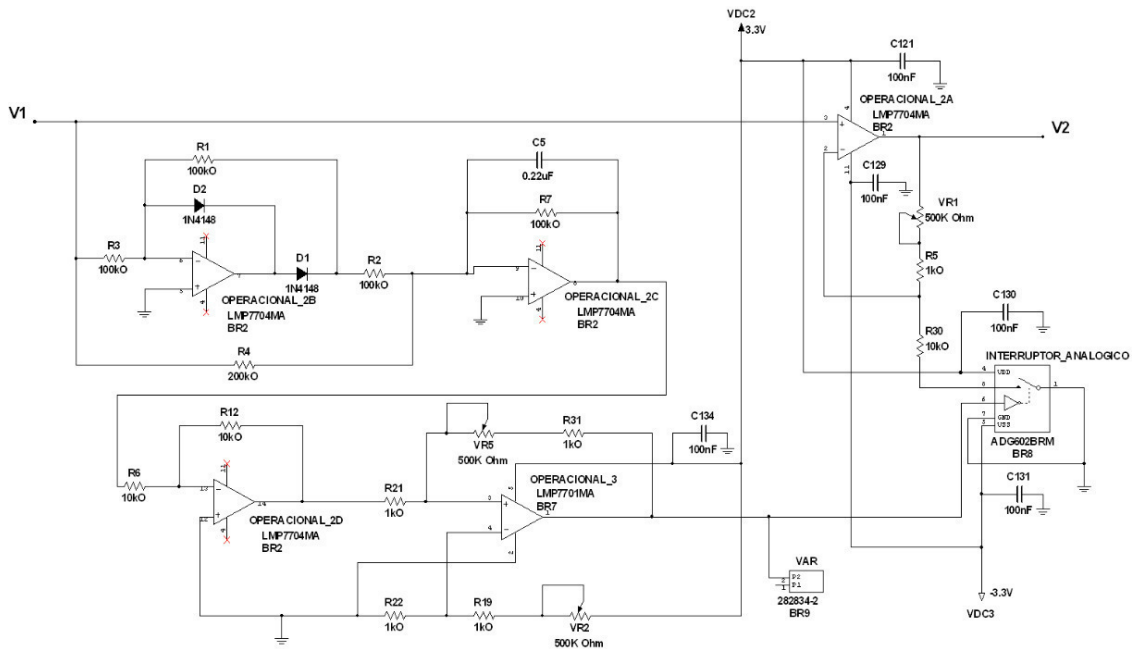



Figura 50. Etapa final de autorrango

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 128 de 222
	DOCUMENTO Nº2: MEMORIA DE CÁLCULO	

CAPÍTULO 5 – ETAPA DEL CONVERTSOR RMS-DC

En esta etapa se obtendrá el valor rms de la señal del micrófono. Se utilizará la configuración básica del datasheet añadiéndole un condensador de 0,1 μF para permitir factores de cresta elevados.

Para el cálculo del condensador de valor medio, se ha tenido en cuenta que se desea que el sonómetro sea de respuesta lenta, o lo que es lo mismo, de 1 segundo, y que en el datasheet se observa que el valor de la resistencia es de 5 K Ω . Los cálculos son los siguientes:

$$\tau = R \cdot C_{AVG} \Rightarrow C_{AVG} = \frac{\tau}{R} = \frac{1}{5000} = 200 \mu\text{F}$$

Siguiendo la recomendación del datasheet, se ha colocado un condensador en la entrada del convertidor con un valor de $\frac{1}{2} \cdot C_{avg}$ para eliminar la componente de continua de la señal de entrada y un condensador de 3,3 μF en la salida del convertidor para eliminar el rizado de la señal de salida. Adicionalmente y también como recomendación del datasheet, los condensadores C1, C2 y C4 son de tántalo.

Se ha añadido un condensador de factor de cresta de 0,1 μF para reducir el error producido cuando la señal de entrada tiene factores de cresta elevados.

Con la combinación de condensadores de 200 μF y de 3,3 μF se consigue un error de conversión prácticamente nulo y un error de rizado inferior al 0,001 %.

El circuito resultante es el que se puede observar en la figura 51:

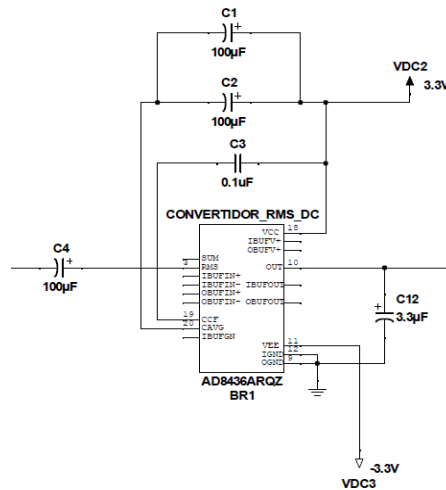


Figura 51. Etapa inicial del conversor RMS-DC

A continuación, se calculará el rango dinámico del conversor en decibelios, conociendo que, según el datasheet, dicho rango va desde los 100 µV hasta los 3 V:

$$\text{Rango dinámico} = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{3}{100 \cdot 10^{-6}}\right) = 89,54 \text{ db} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Rango dinámico} = 89 \text{ db}$$

Como el convertidor tiene un rango dinámico de 89 db y la máxima señal que vamos a manejar es de 120 db, la mínima señal será de 31 db. Como la mínima señal del micrófono es de 36 db, será este quien marque el límite inferior.

Tras realizar el montaje y analizar el circuito, se descubre que hay bastante ruido en la alimentación de los componentes, por lo que se procede a añadir un condensador de 100 nF en las alimentaciones del convertidor para filtrarlas.

El circuito resultante es el que se puede observar en la figura 52:

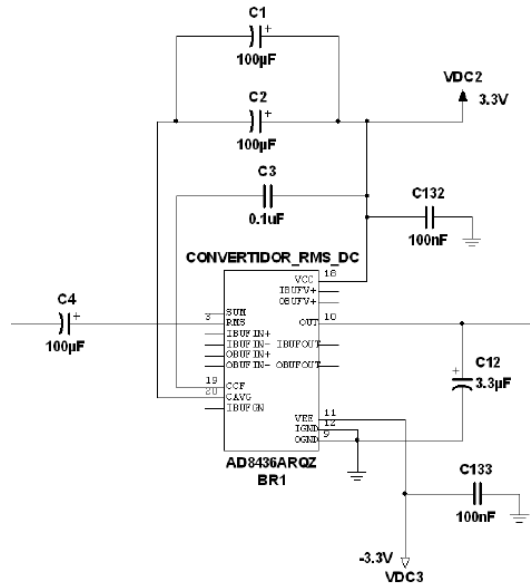


Figura 52. Etapa final del convertidor RMS-DC

CAPÍTULO 6 – ETAPA DEL CONVERTOR ANALÓGICO-DIGITAL

Debido a que el convertidor está alimentado a 3,3 V y, por lo tanto, ninguna entrada debería de superar este valor, se ha dividido a la mitad la tensión de la batería, que rondará los 3,7 V, mediante un divisor resistivo con un par de resistencias de 10 KΩ.

También se ha colocado una resistencia de 50 Ω en cada hilo de la comunicación SPI (MOSI, MISO, CLK) para proteger contra cortocircuitos. Debido a que la LoPy solo se comunicará con este dispositivo, se ha puesto a 0 la señal de selección de chip, activando de manera permanente este convertidor.

El circuito resultante es el que se puede observar en la figura 53.

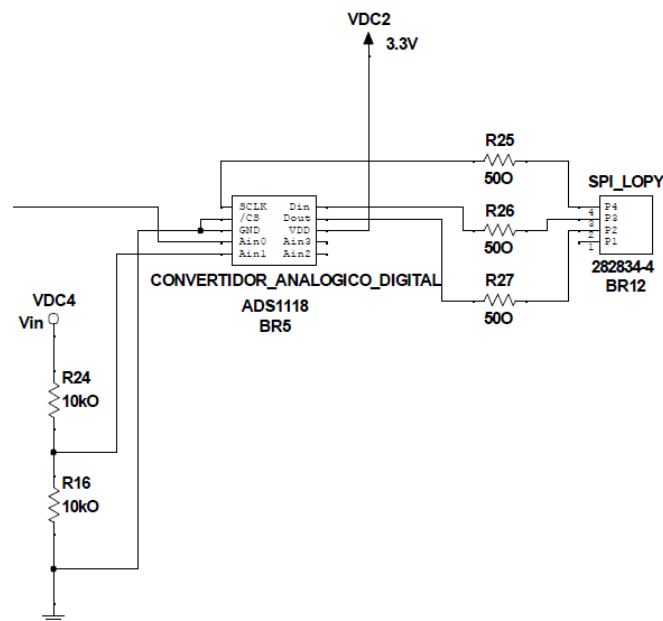


Figura 53. Etapa inicial del conversor analógico-digital

A continuación, se procederá al cálculo del rango dinámico del convertor, conociendo que el número de bits libres de ruido del convertor según datasheet, con la configuración utilizada (SPS=128, FSR=2,048 V), es de 16:

$$\text{Rango dinámico} = 20 \cdot \log\left(\frac{2^{N^{\circ} \text{ bits}}}{1}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{2^{16}}{1}\right) = 96,33 \text{ db} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Rango dinámico} = 96 \text{ db}$$

Como el convertidor tiene un rango dinámico de 96 db y la máxima señal que vamos a manejar es de 120 db, la mínima señal será de 24 db. Como la mínima señal del micrófono es de 36 db, será este quien marque el límite inferior.

Tras realizar el montaje y analizar el circuito, se descubre que hay bastante ruido en la alimentación de los componentes, por lo que se procede a añadir un condensador de 100 nF en la alimentación del convertidor para filtrarla. El circuito resultante es el que se puede observar en la figura 54.

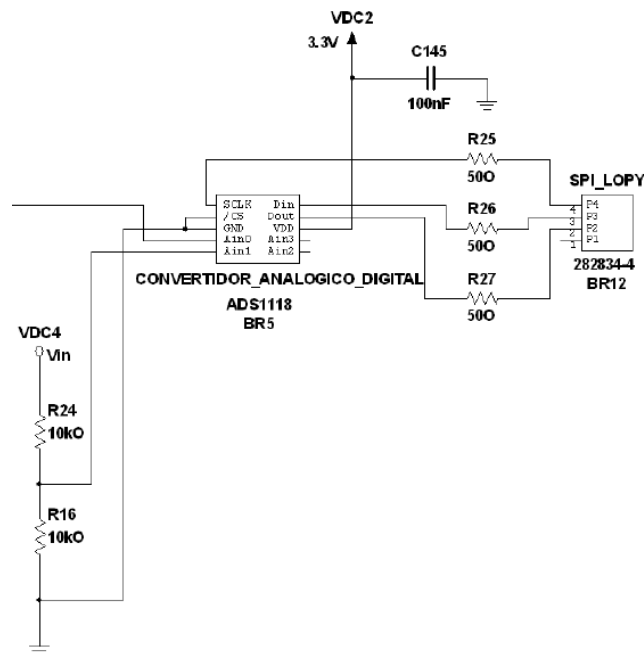


Figura 54. Etapa final del convertidor analógico-digital

CAPÍTULO 7 – ETAPA DEL CONVERTIDOR BUCK

Para esta etapa, se parte de la tensión de la batería que se estimará como 3,7 V de media y se convertirá en +3,3 V mediante un convertidor buck. Se utilizará el montaje recomendado en el datasheet, pero colocando un potenciómetro de 1 MΩ para poder ajustar la tensión de salida, acompañado de una resistencia de 1 KΩ en serie para evitar cortocircuitos, tal como se puede ver en la figura 55.

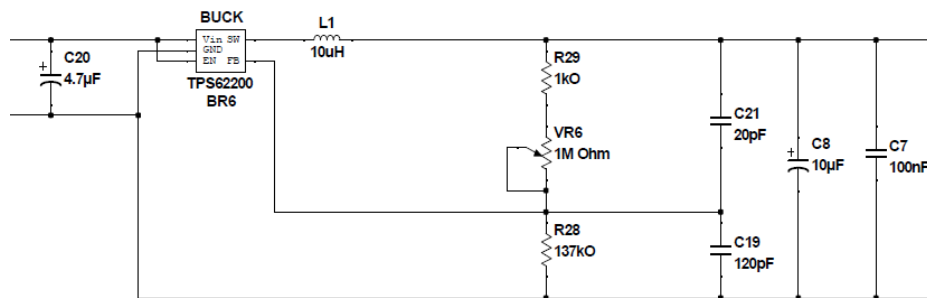


Figura 55. Etapa inicial del convertidor buck

El datasheet proporciona las siguientes relaciones:

$$V_{out} = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{(R_{29} + VR6)}{R_{28}} \right)$$


$$C_{21} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 10000) \cdot (R_{29} + VR6)}$$

$$(R_{29} + VR6) + R_{28} \leq 1 \text{ M}\Omega$$

$$C_{19} = \frac{(R_{29} + VR6)}{R_{28}} \cdot C_{21}$$

Partiendo de esto, se procederá al cálculo de los componentes para ajustar la tensión de salida a +3,3 V:

$$3,3 = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{(R_{29} + VR6)}{R_{28}} \right) \Rightarrow (R_{29} + VR6) = 5,6 \cdot R_{28}$$

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 134 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	

Fijando $(R_{29} + VR6)$ y calculando $R_{28} \Rightarrow \begin{cases} (R_{29} + VR6) = 768 \text{ K}\Omega \\ R_{28} = 137,14 \text{ K}\Omega \end{cases} \xrightarrow{\text{Normalizando}}$

$$\Rightarrow \begin{cases} (R_{29} + VR6) = 768 \text{ K}\Omega \\ R_{28} = 137 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

$$VR6 = 768 \text{ K}\Omega - R_{29} = 768 \text{ K}\Omega - 1 \text{ K}\Omega = 767 \text{ K}\Omega$$

$$\text{Comprobación} \Rightarrow (R_{29} + VR6) + R_{28} = 905 \text{ K}\Omega \leq 1 \text{ M}\Omega$$

$$C_{21} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 10000) \cdot (R_{29} + VR6)} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 10000) \cdot 768000} = 20,72 \text{ pF} \Rightarrow$$

$$\xrightarrow{\text{Normalizando}} C_{21} = 20 \text{ pF}$$

$$C_{19} = \frac{(R_{29} + VR6)}{R_{28}} \cdot C_{21} = \frac{768000}{137000} \cdot 20 \cdot 10^{-9} = 112,117 \text{ pF} \xrightarrow{\text{Normalizando}}$$

$$\Rightarrow C_{19} = 120 \text{ pF}$$

Adicionalmente a estos componentes, el circuito también incluye un condensador de $4,7 \mu\text{F}$ a la entrada del buck para filtrar ruido, una bobina a la salida del buck para evitar los picos de intensidad y un par de condensadores de $10 \mu\text{F}$ y 100 nF tras obtener $+3,3 \text{ V}$ para volver a filtrar el ruido.

Tras realizar el montaje y analizar el circuito, se descubre que hay bastante ruido en la alimentación de los componentes, por lo que se procede a añadir componentes a la etapa buck para filtrar la alimentación de $+3.3 \text{ V}$. Se añade un condensador de 100 nF a la entrada del buck para minimizar aún más el ruido en la entrada y un condensador de $10 \mu\text{F}$ y otro de 100 nF justo tras la bobina para filtrar más la señal generada.

El circuito resultante es el que puede verse en la figura 56.

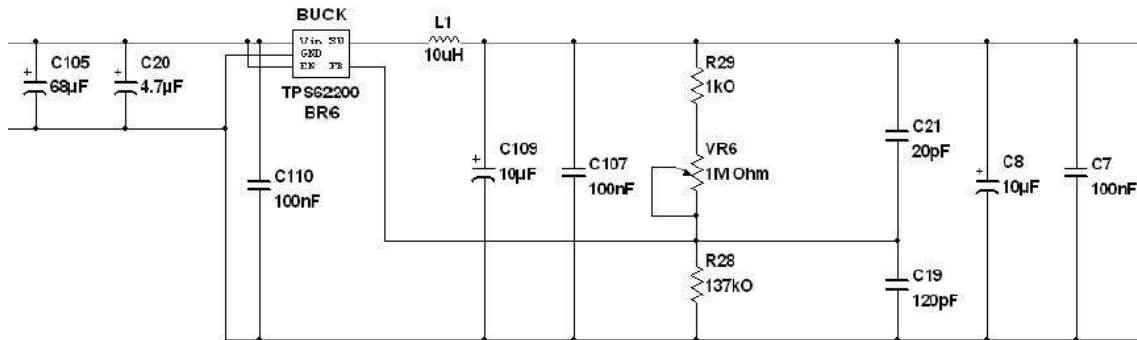


Figura 56. Etapa final del convertidor buck

CAPÍTULO 8 – ETAPA DE LA BOMBA DE CARGA

Para esta etapa, se parte de la tensión de +3,3 V proporcionada por el convertidor buck y se convertirá en -3,3 V mediante una bomba de carga. Se utilizará el montaje y los valores capacitivos recomendados en el datasheet, pero con un condensador adicional de 100 nF a la salida de la bomba de carga para un mejor filtrado, tal como se puede ver en la figura 57.

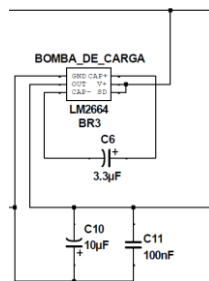


Figura 57. Etapa inicial de la bomba de carga

Tras realizar el montaje y analizar el circuito, se descubre que hay bastante ruido en la alimentación de los componentes, por lo que se procede a añadir un condensador de 100 nF en la entrada de la bomba de carga para filtrarla y, por lo tanto, filtrar la alimentación de -3.3 V. El circuito resultante es el que se puede observar en la figura 58.

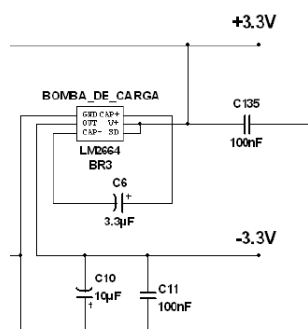



Figura 58. Etapa final de la bomba de carga

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 137 de 222
	DOCUMENTO Nº2: MEMORIA DE CÁLCULO	

CAPÍTULO 9 – ETAPA GENERADORA DE 2 V

Para esta etapa, se parte de la tensión de la batería que se estimará como 3,7 V de media y se convertirá en 2 V mediante un diodo zener.

El circuito de esta etapa es el que se puede ver en la figura 59.

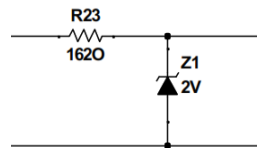


Figura 59. Etapa inicial generadora de 2 V

Fijando la corriente del zener al 10% de la corriente máxima del zener y escogiendo como corriente de carga la equivalente a la máxima corriente de consumo del micrófono, que son 400 μA , se obtiene el siguiente valor de la resistencia de protección del diodo:

$$I_{Z1_{\max}} = \frac{P_{Z1}}{V_{Z1}} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ A}$$

$$R_{23} = \frac{V_{\text{Batería}} - V_{Z1}}{I_{\text{carga}} + I_{Z1}} = \frac{V_{\text{Batería}} - V_{Z1}}{I_{\text{carga}} + (0,1 \cdot I_{Z1_{\max}})} = \frac{3,7 - 2}{400 \cdot 10^{-6} + 0,1 \cdot 0,1} = 163,46 \Omega$$

$$R_{23_{\text{normalizada}}} = 162 \Omega$$

Tras realizar el montaje y analizar el circuito, se descubre que el microcontrolador LoPy genera mucho ruido en la alimentación del micrófono. Para filtrar este ruido, se han colocado un condensador de 68 μF en la entrada de la alimentación del sonómetro y un par de condensadores de 10 μF y 100 nF justo después de la resistencia R23. Con esta medida, aunque el ruido no se ha eliminado del todo, si se ha minimizado en su mayor parte.

El circuito resultante es el que se puede observar en la figura 60.

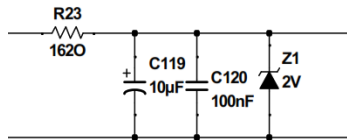


Figura 60. Etapa final generadora de 2 V

CAPÍTULO 10 – DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

El cálculo del dimensionado de la instalación solar fotovoltaica [6] [9] consta de las siguientes partes:

10.1 - Energía total de los equipos

Lo primero que se calculará será la energía diaria que necesitarán los equipos, lo cual se pueden observar en la tabla 2 mostrada a continuación:

Equipo	Tensión de alimentación (V)	Intensidad de alimentación (mA)	Potencia (W)	Horas de funcionamiento por día ($\frac{h}{día}$)	Energía ($\frac{W \cdot h}{día}$)
Sonómetro	3,7	14,27	0,053	24	1,27
LoPy	3.7	50	0,185	24	4,44

Tabla 2. Energía necesaria por día para alimentar a los equipos

La energía total diaria será el siguiente:

$$\text{Energía}_{\text{Total}} = \text{Energía}_{\text{Sonómetro}} + \text{Energía}_{\text{LoPy}} = 1,27 + 4,44 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Energía}_{\text{Total}} = 5,71 \frac{W \cdot h}{día}$$

10.2 – Horas de sol de pico

Ahora se averiguarán las horas de sol de pico (HSP) por día en Sevilla, donde es probable que se realice el montaje. Para esto, es necesario conocer las irradiancias por mes de Sevilla. Estas irradiancias se puede observar en el atlas de radiación proporcionado por AEMET [25], las cuales se pueden observar en la figura 61.

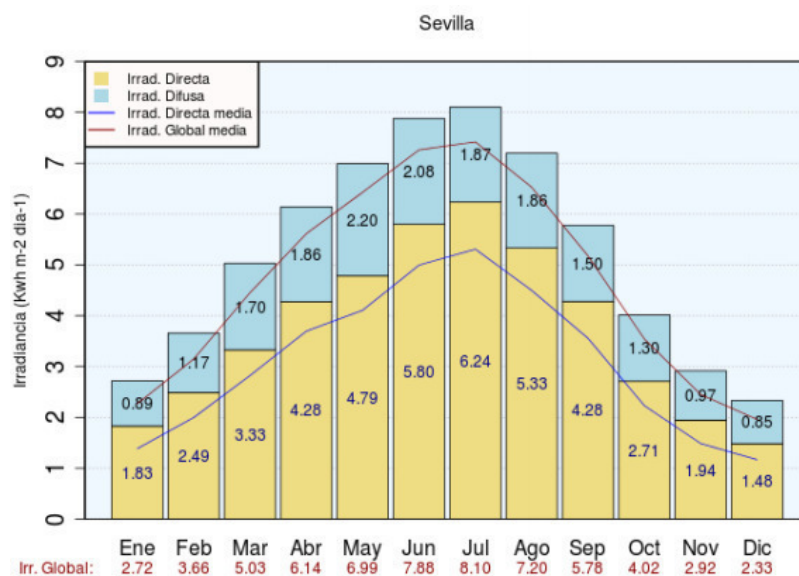



Figura 61. Irradiancia por mes en Sevilla

Se escogerá el valor de irradiancia global más restrictivo, que es el equivalente al mes de diciembre. Conociendo esto, el valor de HSP es el siguiente:

$$HSP = \frac{\text{Irradiancia global}}{\text{Factor de calibración}} = \frac{2,33 \frac{\text{KW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}}{1 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2}} = 2,33 \frac{\text{h}}{\text{día}}$$

	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 141 de 222
	DOCUMENTO Nº2: MEMORIA DE CÁLCULO	

10.3 – Elección de la placa solar


A continuación, se calculará la potencia que debe de tener la placa solar para abastecer la energía total calculada anteriormente:

$$P_{\text{Placa Solar}} = \frac{\text{Energía}_{\text{Total}}}{\text{Rendimiento} \cdot \text{HSP} \cdot \text{Número de placas}} = \frac{5,71}{0,85 \cdot 2,33 \cdot 1} = 2,88 \text{ W}$$

10.4 – Elección de la batería

Ahora se calculará la potencia necesaria que tendrá que tener la batería para proporcionar autonomía a los equipos cuando se sucedan malos días sin suficiente insolación como para que la placa solar abastezca a los equipos. Fijando dos días de autonomía y conociendo que la profundidad de descarga de las baterías de Ion-Litio es de 0,8, se obtiene la siguiente capacidad:

$$\text{Potencia}_{\text{Batería}} = \frac{\text{Energía}_{\text{Total}} \cdot \text{Días de autonomía}}{\text{Profundidad de descarga}} = \frac{5,71 \cdot 2}{0,8} = 14,27 \text{ W} \cdot \text{h}$$

 <p>ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR SEVILLA</p>	Red de equipos de medida de ruido con comunicación Lora	Página 142 de 222
	DOCUMENTO N°2: MEMORIA DE CÁLCULO	