



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

*Comparación de coste y consumo entre
varios sistemas de adquisición de datos
para una malla sensible a la presión*

Autor

César Tregón Esteban

Director

Carlos Medrano Sánchez

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel

2022

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se basa en el análisis de dos sistemas de adquisición de datos destinados a ser usados con sensores resistivos en una disposición matricial. Se va a comparar su coste y consumo mediante la selección de diferentes componentes, estimaciones y simulaciones.

Enfocándose en el caso de una malla sensible a la presión con sensores piezoresistivos, realizada por el grupo EduQTech, se pretende ayudar en la medida que sea posible al completo desarrollo del estudio, ayudar en la mejora de futuras versiones y anticipar problemas que puedan aparecer en alguno de estos sistemas de adquisición de datos.

SUMMARY

This final degree work is based on the analysis of two data acquisition systems intended to be used with resistive sensors in a matrix arrangement. Their cost and consumption will be compared through the selection of different components, estimations and simulations.

Focusing on the case of a pressure sensitive mat with piezoresistive sensors, carried out by the EduQTech group, the aim is to help as much as possible to the complete development of the study, to help in the improvement of future versions and to anticipate problems that may appear in any of these data acquisition systems.

ÍNDICE

1 Objetivos del proyecto	1
2 Sistemas de adquisición de datos	2
2.1 MUXs	2
2.2 ZPM.....	4
3 BluePill.....	5
3.1 Especificaciones y características de la BluePill	6
4 Opciones del estudio.....	8
4.1 Opción de la BluePill.....	8
4.1.1 Introducción opción de la BluePill en MUXs	8
4.1.2 Introducción opción de la BluePill en ZPM.....	9
4.2 Opción de componente a componente	9
4.2.1 Introducción opción componente a componente en BluePill.....	9
4.2.2 Introducción opción componente a componente en ZPM	9
5 Opción BluePill, MUXs.....	12
5.1 Componentes	12
5.2 Dimensiones componentes	14
5.3 Coste opción BluePill, MUXs	17
6 Opción componente a componente, MUXs.....	18
6.1 Dimensiones componentes	23
6.2 Coste opción componente a componente, MUXs	24
7 Comparación costes opciones MUXs	25
8 Opción componente a componente ZPM	26
8.1 Dimensiones componentes	29
8.2 Coste opción componente a componente, ZPM.....	30
9 Comparación costes MUXs-ZPM	31
10 Consumo	32
10.1 Consumo MUXs	32
10.2 Consumo ZPM	36
11 Comparación consumos MUXs-ZPM.....	38
12 Conclusión sistemas MUXs-ZPM	39
13 Simulación LTspice	40
13.1 Selección y consumo del amplificador operacional	43
14 Conclusión final	44
15 Referencias.....	45

FIGURAS

Figura 1: Bottom view	5
Figura 2: Perspective view.....	5
Figura 3: Top view	5
Figura 4: Componentes Blue Pill	7
Figura 5: STM32F103C8T6 Blue Pill Pinout	10
Figura 6: STM32F103XX LQFP64 Pinout.....	11
Figura 8: Esquema circuito sistema MUX con resistencia, Ron	14
Figura 7: Esquema ton, toff MUX.....	14
Figura 11: Simulación LTspice circuito ZPM	40
Figura 12 :Voltaje de salida del amplificador operacional, Vo.....	41
Figura 13: Voltaje V- del AO	41
Figura 14: Intensidad fuente V2 Figura 15: Intensidad fuente V3	42
Figura 16: Gráfica corriente de suministro por amplificador VS voltaje de suministro.....	42

TABLAS

Tabla 1: Microcontrolador Blue Pill.....	12
Tabla 2: Tipos de multiplexores	13
Tabla 3: Tipos de multiplexores	13
Tabla 4: Características sobre la resistencia Ro	14
Tabla 5: Dimensiones componentes opción BluePill MUXs	15
Tabla 6: Costes opción BluePill, MUXs	17
Tabla 7: Características sobre el microcontrolador	18
Tabla 8: Tipos y características oscilador 32.768 kHz	19
Tabla 9: Tipos y características oscilador 8MHz.....	19
Tabla 10: Tipos y características micro USB conector	20
Tabla 11: Botón reset	21
Tabla 12: BOOTO/BOOT1 Jumpers.....	21
Tabla 13: Multiplexor	22
Tabla 14: Resistencia Ro.....	22
Tabla 15: Tipos y características de regulador de voltaje lineal	22
Tabla 16: Dimensiones opción componente a componente, MUXS.....	23
Tabla 17: Coste opción componente a componente, MUXs	24
Tabla 18: Multiplexores	27
Tabla 19: Amplificador operacional	28
Tabla 20: Regulador conmutado de tensión	28
Tabla 21: Dimensiones opción componente a componente ZPM.....	29
Tabla 22: Coste opción componente a componente, ZPM.....	30
Tabla 23: Consumo total BluePill, MUXs	35
Tabla 24: Consumo total componente a componente MUXs.....	35
Tabla 25: Consumo total opción ZPM	37

1. Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto se basa en analizar y estudiar los dos sistemas de adquisición de datos que se van a utilizar, que se van a denominar la opción de MUXs (basado en multiplexores) y la opción ZPM (Zero Potential Model), para posteriormente hacer un estudio y selección de los diferentes componentes de los que están compuestos y, finalmente, una comparación entre el coste y consumo de ellos. Estas diferentes configuraciones de sistemas de adquisición sirven para acceder a sensores resistivos configurados en una matriz. Un ejemplo es una malla sensible a la presión con sensores piezoresistivos, que está compuesta por celdas sensibles a la presión en una matriz sobre una superficie flexible que se usa en ergonomía, robótica o salud entre otros. Estas mallas están siendo investigadas por el grupo EduQTech, por lo que la motivación del proyecto es un estudio comparativo de los dos sistemas de adquisición de datos.

Se analizará y comparará cada componente de los que están compuestos para encontrar el más adecuado, tanto económicamente como funcionalmente hablando.

También se van a llevar a cabo varias alternativas de estudio en las que se diferenciarán la opción de “componente a componente” y la opción de la utilización de la BluePill (placa de desarrollo de microcontrolador donde vienen ya dados unos componentes determinados). De todas formas, dichas opciones serán explicados posteriormente.

Como bien se ha mencionado, es un estudio donde hay estimaciones cuyo objetivo es obtener un resultado aproximado del coste y consumo de cada sistema de adquisición y cada opción, por lo que no hay que tomar por ciencia cierta todo que se va leer, ya que podría haber mejores opciones que no se han barajado y el consumo sería necesario medirlo experimentalmente también

2. Sistemas de adquisición de datos

Como ya se ha mencionado se van a analizar dos modelos de sistemas de adquisición, el modelo MUXs (basado en multiplexores) y el modelo Zero Potential Method (ZPM), ambos diferentes entre sí. Pero los dos permiten acceder a una matriz de sensores resistivos. Se tomará como ejemplo un sistema de 16x16 sensores, que se corresponde a un prototipo desarrollado en EduQTech.

Se realizará una breve explicación y análisis del sistema y su funcionamiento y, posteriormente, se pasará al estudio de las opciones en cada sistema de adquisición.

2.1. MUXs

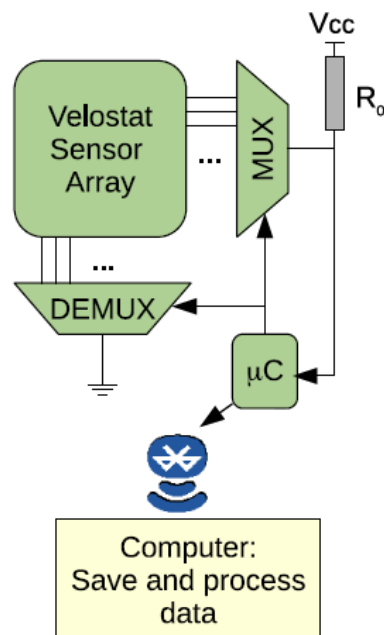


Figura 1: Diagrama de bloques sistema de adquisición MUXs [1]

Este primer diagrama de bloques del sistema de adquisición se compone de una malla sensible a la presión compuesta por tres capas, dos de ellas flexibles y ortogonales entre sí y con líneas conductoras y la capa intermedia hecha de Velostat (material conductivo sensible a la presión, apretándolo su resistencia disminuye), dos multiplexores, una resistencia (R_0), un microcontrolador y una fuente de alimentación, V_{cc} , de 5 voltios.

El funcionamiento se basa en el escaneo por parte del microcontrolador tanto de filas como de columnas de la malla sensible a la presión por medio de los multiplexores analógicos. Las filas están conectadas a la fuente de alimentación, V_{cc} , por medio de una resistencia de valor $2200\ \Omega$, R_o , y al microcontrolador ADC. Mientras que las columnas están conectadas a tierra.

Otro dato a destacar sería que, en este caso, se utilizará la conexión por vía USB en vez de por bluetooth para mejorar la velocidad a la que se transmiten los datos. El USB proporciona la alimentación de +5 V.

Un detalle a destacar de este sistema de adquisición es la existencia de la limitación de la corriente producida por la resistencia R_o . Esto se debe a que dicha resistencia va a tener un valor fijo, $2200\ \Omega$, por lo que suponiendo que los demás componentes tienen el valor de una resistencia global cuyo mínimo valor puede ser 0 (resistencia de la malla), la corriente como máximo tendría un valor de $I = V_{cc}/R_o$, donde V_{cc} sería de 3.3V (que sería el voltaje que proporcionará el convertidor de la placa BluePill), así pues, $I_{\max} = 3.3V/2200\ \Omega = 1.5\text{mA}$.

Un inconveniente de esta configuración es que la medida de una celda se ve afectada por el resto, ya que no se evita que pase corriente a través de varias celdas a la vez.

2.2. ZPM

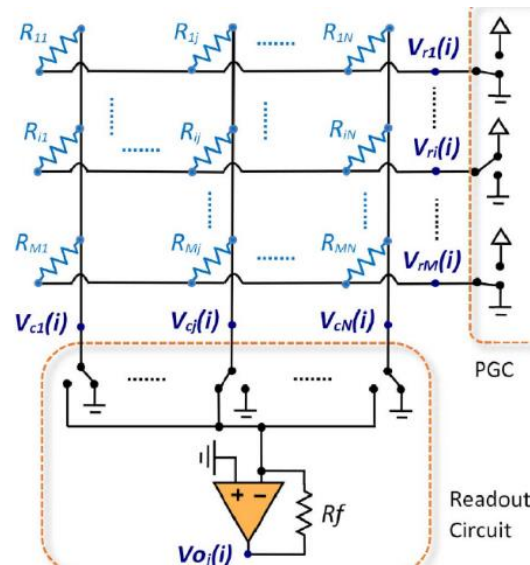


Figura 2: Versión simple de circuito ZPM [ii]

Aquí se muestra la versión más simple de un circuito ZPM.

Básicamente, este circuito está constituido por M filas y N columnas, donde cada una de ellas está conectada a un multiplexor analógico 2:1 (un tipo de interruptor básicamente), cada uno de ellos independientes entre sí. Así pues, dichos multiplexores conectan un voltaje de entrada, VSS, a la fila seleccionada, quedando los demás conectados a tierra. Del mismo modo, la columna seleccionada del circuito de lectura se conecta a la entrada de un amplificador operacional inversor, quedando las demás conectadas a tierra y obteniendo un voltaje de salida.

En este circuito, a diferencia del MUXs, no hay ninguna limitación de corriente, ya que en cada fila se tiene un voltaje independiente y no hay ninguna resistencia con un valor fijo que produzca dicha limitación. Por ello, el consumo de esta parte puede ser bastante mayor. Por el contrario, si los interruptores y el amplificador son ideales, la salida sólo depende de la celda seleccionada.

3. *BluePill*

Una Tarjeta de Desarrollo es, bajo la perspectiva ingenieril, una herramienta para diseño y prototipado rápido de sistemas digitales o analógicos, que se presenta como un elemento muy útil para el mejoramiento de los procesos de diseño debido a disminución del tiempo de validación de los diseños, así como la posibilidad que ofrece de ser una solución y un producto final.

En el caso puntual de esta tarjeta se realizó la implementación en un sistema de adquisición de datos para una malla sensible a la presión. Se consideró dicha BluePill con el microcontrolador STM32F103C8T6, al igual que en el prototipo desarrollado en EduQTech.

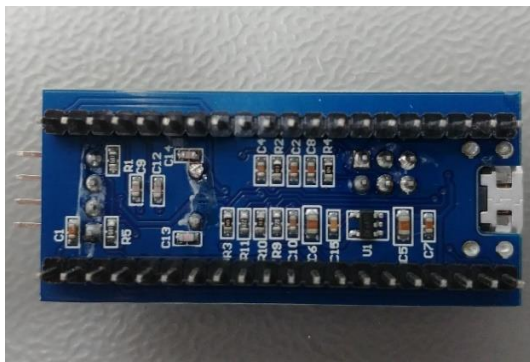


Figura 2: Bottom view

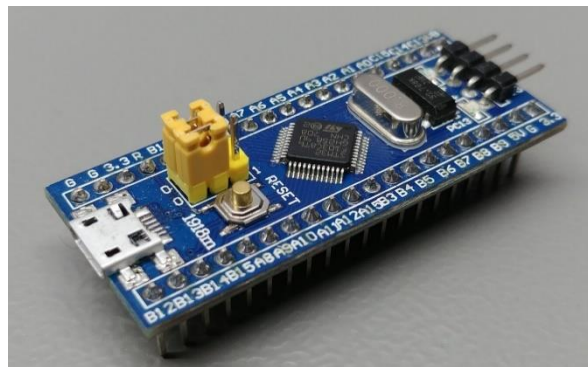


Figura 3: Perspective view



Figura 1: Top view

3.1. Especificaciones y características de la BluePill

- Tipo: Tarjeta STM32F103C Blue Pill
- Modelo: STM32F103C
- Dimensiones: 23mm x 53mm
- Alimentación de voltaje:
 - Cualquier pin + 3.3V: (+ 3.3V)
 - Cualquier pin + 5V: (+ 5V)
 - Conector MicroUSB: (+ 5V)
- Voltaje Lógico IO: 3.3 V
- Procesador de núcleo ARM® Cortex®-M3
- Tamaño de núcleo 32-bits
- Entradas/salidas Digitales: 37
- Número de pines: 48.
- Entradas ADC: 10 canales A/D de 12Bits
- Conectividad CAN, I²C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART, USB*
- Frecuencia de trabajo de 72MHz (en nuestro caso será de 48MHz).
- Memoria:
 - Flash: 64 KB
 - SRAM: 20KB

En cuanto a componentes:

- Contiene el MCU principal: el STM32F103C8T6 en un encapsulado Quad Flat (Low-Profile Quad Flat Package).
- Un interruptor de reinicio: para reiniciar el microcontrolador (Reset Button).
- Puerto microUSB: para comunicación en serie y alimentación.
- Puentes selectores de arranque: puentes BOOT0 y BOOT1 para seleccionar la memoria de arranque.
- Dos LED: LED de usuario y LED de alimentación.
- Cristal de 8 MHz: reloj principal para MCU.
- Oscilador 32.768kHz - Reloj RTC.
- Interfaz SWD: para programación y depuración mediante ST-Link.
- Regulador de 3,3 V (en la parte inferior): convierte 5 V a 3,3 V para alimentar la MCU.

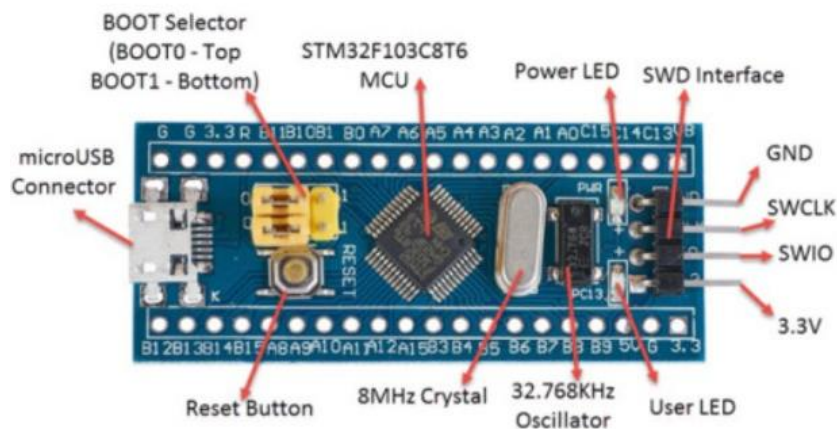


Figura 4: Componentes Blue Pill

4. Opciones del estudio

Como ya se ha dicho anteriormente se van a realizar dos opciones de estudio de los circuitos que van a ser la opción de la BluePill y la opción componente a componente.

4.1. Opción de la BluePill

En esta opción se van a usar los componentes que vienen ya integrados en la BluePill seleccionada (mostrados en la imagen anterior) y añadiendo aquellos que sean necesarios y no se encuentren en dicha BluePill.

En la BluePill seleccionada hay componentes que no son especificados por lo que se ha realizado un cribado de dichos componentes y seleccionado el más óptimo en cuanto al precio y características. Por otro lado, los componentes que estaban especificados se han seleccionado directamente.

4.1.1. Introducción opción de la BluePill en MUXs

En el caso del MUXs, y como se puede observar en la *figura 1*, el sistema está formado por dos multiplexores de 16 líneas de datos cada uno, por lo que se necesitarán 4 líneas de control digital por multiplexor ($2^4 = 16$) en cada uno, es decir, un total de 8 líneas digitales.

El microcontrolador que se ha escogido para la BluePill tiene un encapsulado de 48 pines digitales, pero algunos de ellos no están libres, es decir, tienen ya una función fija.

Por lo que quitando dichos pines: VBAT, PC14, PC15, OSCIN, OSCOUT, RESET, GND (4 pines), VCC3V3 (4 pines), BOOT0, BOOT1, SWIO, SWCLK, PA11 Y PA12. Hacen un total de 20.

Los pines que quedarían disponibles serían $48 - 20 = 18$ pines disponibles y, frente a los que se necesitan, serían suficientes.

Por otro lado, en esta opción hay componentes “extra” que no se encuentran en la placa BluePill y que, posteriormente, habrá que añadir junto con dicha placa BluePill a la placa PCB para formar un único circuito final. Dichos componentes “extra” serían los dos multiplexores y la resistencia Ro. Una vez se tengan los componentes extra y la BluePill, habría que montar todo en una placa PCB para formar un único circuito.

4.1.2. Introducción opción de la BluePill en ZPM

En el caso del modelo ZPM, como se va a explicar posteriormente, se necesitan más pines de los disponibles en la BluePill seleccionada, por lo que resulta imposible poder utilizarla. De esta forma, las posibles alternativas serían escoger otra BluePill con más pines disponibles o un diferente encapsulado del microcontrolador, ya que el que se ha utilizado en el MUXS era de 48 pines y habría que comprobar si el encapsulado de 64 sería suficiente o se necesitaría el de 100.

Así pues, si se cambia de encapsulado a uno mayor, la placa BluePill que se utiliza no tiene suficientes pines, por lo que se pasaría directamente a la opción componente a componente.

4.2. Opción de componente a componente

Esta opción, a diferencia del anterior se caracteriza por no necesitar una placa BluePill, ya que se comprarían todos componentes uno a uno y, finalmente, se montarían todos en la placa PCB.

Por lo que al igual que en el anterior, se realiza un cribado de todos los componentes seleccionando varios que puedan cumplir con los requisitos y, más tarde, se escoge el más óptimo.

4.2.1. Introducción opción componente a componente en MUXs

En esta opción se eliminará la placa BluePill y se seleccionarán los componentes que la componían por separado y, junto con los componentes extra necesarios, se colocarán todos juntos en la placa final PCB.

4.2.2. Introducción opción componente a componente en ZPM

En el caso del ZPM, dado que la estructura del sensor sería de 16x16, necesitaríamos un total de 32 líneas digitales para controlar los interruptores, así pues, se necesitaría 16 chips con interruptores analógicos (2:1 mux, SPDT single pole double throw) ya que en cada chip suele haber dos líneas disponibles.

El microcontrolador de la placa BluePill que se ha utilizado para el sistema “MUXs” tendría un total de 48 pines digitales, pero algunos de ellos no están libres, es decir, tienen ya una función fija.

Por lo que quitando dichos pines: VBAT, PC14, PC15, OSCIN, OSCOUT, RESET, GND (4 pines), VCC3V3 (4 pines), BOOT0, BOOT1, SWIO, SWCLK, PA11 Y PA12. Hacen un total de 20. Los pines que quedarían disponibles serían $48 - 20 = 18$, insuficientes.

STM32F103C8T6 Blue Pill Pinout

Following diagram shows the pinout of the STM32F103C8T6 Blue Pill Development Board:

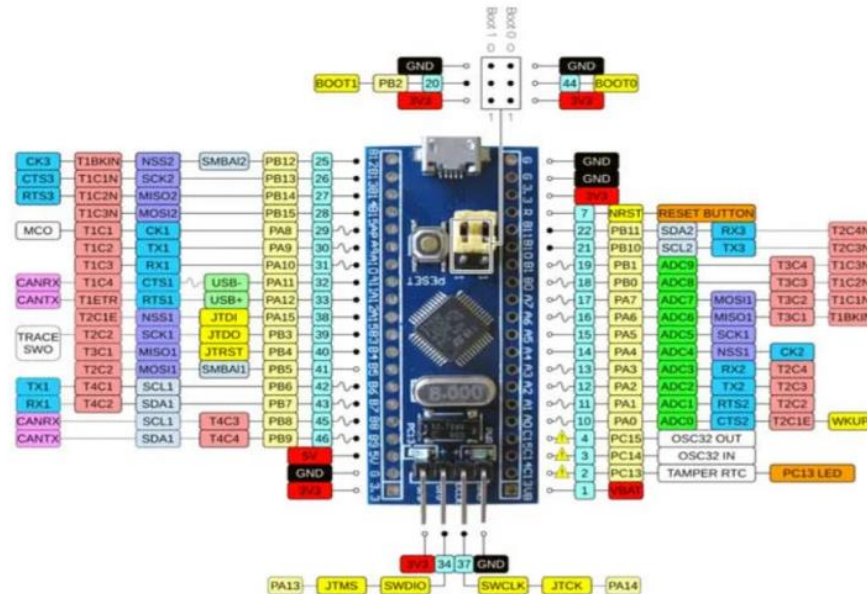


Figura 5: STM32F103C8T6 Blue Pill Pinout

Entonces habría que buscar otras soluciones, como por ejemplo buscar otra placa de desarrollo con un micro con más pines, por ejemplo, el encapsulado LQFP de 64 pines o de 100 y ver si hay suficientes pines.

5. Opción BluePill, MUXx

En esta opción se obtiene la placa BluePill con los componentes ya soldados, por lo que se necesita hacer una selección de los componentes extra que se necesitan (en este caso serían los dos multiplexores y la resistencia, R_o) para encontrar los más óptimos.

Por otro lado, también habría que calcular el área que se necesita, es decir, el área que ocupan todos esos componentes para obtener la placa PCB donde se va a montar el circuito final.

5.1. Componentes

Microcontrolador

En referencia al microcontrolador, se ha escogido el mismo que viene dado por la BluePill, ya que, de esta forma, nos aseguramos de que va a funcionar con total certeza.

De todas formas, se hizo una comparación con otros microcontroladores de la misma familia, donde las principales características (que hacían que fueran útiles para nuestro caso) no variaban significativamente, así pues, se decantó por dejar el microcontrolador *STM32F103C8T6TR*.

Tipo	Uds	Coste/ud (€)	Coste total (€)	Área (mm ²)	Nº timers/temp
STM32F103C8T6TR	1	6.13	6.13	9.8	4

Tabla 1: Microcontrolador Blue Pill

Multiplexores

En el caso de los multiplexores, se optó por el multiplexor *74HC4067BQ,118* ya que, basándose principalmente en parámetros “externos” como: el coste por unidad, área, peso; e “internos” como: resistencia de encendido (R_{on}), tiempo de encendido (t_{on}) y tiempo de apagado (t_{off}), este componente ha sido el más óptimo en cuanto al cómputo general (contando con los datos “estándares o básicos” que tiene esa familia de multiplexores).

Tipo	Unidades	Coste/unidad(€)	Coste total	Área (mm2)
74HC4067D,653	2	0.98	1.96	118.56
74HC4067BQ,118	2	1.12	2.24	20.16
74HC4067PW,118	2	1.15	2.3	35.55
74HC4067D-Q100J	2	1.13	2.26	118.56
74HC4067PW-Q100J	2	1.32	2.64	117
CD74HC4067M96	2	0.805	1.61	115.808

Tabla 2: Tipos de multiplexores

Tipo	Ron(ohmios)	toff(max)	ton(max)
74HC4067D,653	130	42 ns	38 ns
74HC4067BQ,118	130	42 ns	38 ns
74HC4067PW,118	180	300 ns	290 ns
74HC4067D-Q100J	130	42 ns	38 ns
74HC4067PW-Q100J	130	42 ns	38 ns
CD74HC4067M96	160	300 ns	290 ns

Tabla 3: Tipos de multiplexores

Como se puede observar en las tablas anteriores, estos son unos ejemplos de los diferentes tipos de multiplexores que fueron seleccionados como posibles aptos. Indirectamente, lo primero que haría uno sería analizar los extremos, por ejemplo: el más barato, el de menor área, menor peso... pero hay que tener en cuenta los parámetros “internos” también.

Así pues, a simple vista podríamos descartar los ejemplos cuyos “ton” y “toff” son mayores ya que es una diferencia bastante significativa con respecto a los demás.

De los restantes, descartamos el más caro y el más pesado (mismo razonamiento de que la diferencia es notable pudiendo ser válidos los restantes y teniendo en cuenta que el valor de Ro en el restante es apta). Por lo que el seleccionado es el mencionado ya anteriormente (destacado en color verde en la tabla), por sus mejores parámetros globales que los demás.

ton y toff

Son una medida de retardo desde la entrada de control hasta la operación del interruptor analógico. Ton, se correspondería con el retraso de tiempo desde que se manda la función desde la entrada hasta que el interruptor actúa (interruptor se cierra); mientras que toff se correspondería con la acción inversa, es decir, el retraso temporal desde que la entrada deja de actuar y el interruptor tiene que “desactivarse” (interruptor se abre).

Básicamente son los tiempos de conmutación de los interruptores, tanto para su apertura como para su cierre.

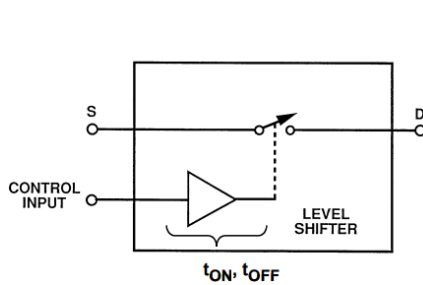


Figura 8: Esquema ton, toff MUX

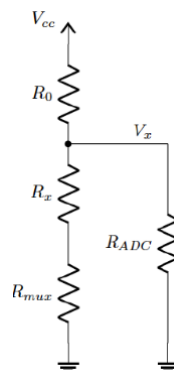


Figura 7: Esquema circuito sistema MUX con resistencia, R_{on}

R_{on}

Se trata de una resistencia en serie con las resistencias de los sensores descononida, R_x , que añade un pequeño error a la hora de calcular la resistencia R_x a través del voltaje medido V_x , ya que se forma un circuito divisor de tensión y dicha resistencia interfiere (en pequeña parte) al cálculo. En la figura, el papel de R_{on} sería representado por R_{mux} (estrictamente contendría el efecto de los dos multiplexores). Ver figura 8

Resistencia, R_o

En el caso de las resistencias (se necesitaba resistencia de 2200Ω), es un componente que no se vende por unidades sueltas, sino en packs de distintas unidades. Se optó por hacer uso de la página *Aliexpress* ya que se encuentran los precios más asequibles.

ALIEXPRESS	Unidades	Coste resistencias	Coste unidad	Coste envío	Coste Total
RESISTENCIA:2K2 Ω	220	0.25	0.001136364	0.79	1.04

Tabla 4: Características sobre la resistencia R_o

El coste del pack de 220 uds sería de 0.25€ pero, teniendo en cuenta los gastos de envío de *Aliexpress*, el precio final es de 1.04€.

5.2. Dimensiones componentes

A continuación, se procederá a mostrar las dimensiones de los diferentes componentes para estimar el área individual y total que ocuparían. Para ellos se utilizarán los ejes paralelos al suelo, es decir, vistos desde arriba.

El objetivo de esto sería estimar el área total de la placa BluePill y de los componentes extra para luego estimar el de la placa PCB donde se llevará a cabo el montaje del circuito final.

<i>Componente</i>	<i>MUXs(x2)</i>	<i>Ro</i>	<i>BluePill</i>
<i>Altura(mm)</i>	5.6	6.3	23
<i>Longitud(mm)</i>	3.6	3.5	53
<i>Área (mm²)</i>	20.2(x2)=40.4	22.0	1219
<i>Área total BluePill + componentes extra (mm²) = 1281</i>			

Tabla 5: Dimensiones componentes opción BluePill MUXs

Área Total componentes en la BluePill

Se va hacer una estimación del área que ocupan los componentes de la BluePill en dicha placa para, posteriormente, extrapolar ese factor para calcular el área “extra” de la placa PCB.

Como no se especifican los componentes de la placa BluePill, en la opción que se verá más adelante, “componente a componente”, se han seleccionado los componentes que conforman dicha placa BluePill que se han considerado más óptimos para nuestro caso. Por lo que se ha calculado ya el área que ocuparían dichos componentes (más adelante se verá cómo se ha calculado más detalladamente) y se va a utilizar ahora para obtener el factor del área de los componentes respecto al de la BluePill.

Dicha área de los componentes de la BluePill tiene un valor estimado de 226.4 mm², pero se va a aproximar a un valor de 226 mm².

De ese modo, teniendo ya ambas áreas, tanto la de los componentes (226mm²) como la de la BluePill (1219mm²), y mediante una regla de tres, se podría decir que los componentes corresponden el 18.54% del área total de dicha BluePill.

Esta estimación sería sin contar los multiplexores ni la resistencia Ro que también habría que añadir en la placa PCB.

Por lo tanto, el factor buscado para más tarde utilizarlo en los cálculos de la placa PCB será de 100/18 (se ha aproximado a 18%).

Área total componente extra- MUXs + Ro-

El área total de los componentes extra estaría compuesta por la de los multiplexores, 20.2 mm² cada uno y haciendo un total de 40.4 mm², y la de la resistencia (Ro), 22 mm². Sumando dichas cantidades, se obtendría un valor total de 62.4 mm².

Área total BluePiill + MUXs + Ro

Si se necesita montar todo en una misma PCB, el área que ocuparían los componentes sería de 1281mm².

Placa PCB

Una vez que ya tenemos la BluePill, los diferentes componentes seleccionados y los componentes extra a añadir (multiplexores y resistencia, Ro), necesitaríamos estimar el área necesaria de la PCB. Así pues, habría que sumar el área de la BluePill y los componentes extra.

Área total PCB = Área BluePill (placa) + Área componentes extra = 1219 + 62.4 = 1281.4, se aproximará a 1281 mm².

El precio de una PCB (en china) sería de 0.00018 euros/mm², por lo que el precio de esta placa sería de 0.00018€/mm² x 1281 mm² = 0.23€

Para que no estén todos los componentes completamente juntos y haya un área “sobrante” que dé espacio al circuito, se aplicará el factor ‘BluePill-componentes’ (100/18).

De esta manera, el resultado sería $1219 + 62.4 \times \frac{100}{18} = 1566 \text{ mm}^2$.

Dicho factor no se aplica al área total ya que la propia placa BluePill ya lo contendría, por lo que resultaría redundante volver a aplicárselo.

El precio final con el área sobrante sería de 0.00018€/mm² x 1566 mm² = 0.28€

Por otra parte, se está aplicando el mismo factor (originalmente obtenido de la BluePill y sus componentes) para la placa PCB también, donde se podría escoger un factor menor si el diseño de la PCB se optimiza en espacio. De esta forma el precio también cambiaría (no notoriamente).

5.3. Coste opción BluePill, MUXs

Se encontró la placa Blue Pill en *Aliexpress* donde su precio sería de 4.59€ + 1.42€ de envío, el producto completo costaría un total de 6.01€ con los componentes y la placa en sí.

Por lo tanto, una vez calculado el área y coste de la placa final PCB ya se tendría todo lo necesario para calcular el coste total de la opción BluePill en el sistema de adquisición de MUXS.

Una vez seleccionados los componentes de la BluePill (y la misma placa), los componentes extra y la placa PCB, se va a proceder a calcular el coste total de esta opción

MUXs (x2)	Ro (pack)	PCB	BluePill	Coste total (€)
2.24	1.04	0.28	6.01	9.57

Tabla 6: Costes opción BluePill, MUXs

Así pues, podríamos llegar a la conclusión de que mediante la opción de comprar la placa Blue Pill ya con los componentes, añadiendo los multiplexores y resistencia por separado y juntándolo todo en la PCB, el precio final sería de 9.57€

6. Opción componente a componente, MUXs

Lo que se pretende con esta opción de adquirir componente a componente sería encontrar los componentes más asequibles posibles que cumplan con los requisitos necesarios.

Para la selección óptima de los diferentes componentes la opción que se puso en práctica se basó en escoger diferentes tipos de cada uno (entre 2-5 diferentes tipos por componente) y, posteriormente, dependiendo de los parámetros que para nuestro caso eran considerados prioritarios, tomar la decisión. Toda esta búsqueda se ha realizado en la página “mouser.com”.

La principal diferencia de esta opción con respecto al anterior radica en que en este no se necesita la placa en sí de la BluePill, es decir, solo se necesitarían los componentes que compondrían la BluePill pero soldados directamente a la placa final PCB.

Se van a usar los mismos componentes escogidos en la opción anterior de la BluePill, por lo que, en esta opción, dichos componentes se mostrarán directamente.

Microcontrolador

Tipo	Uds	Coste/ud(€)	Coste total (€)	Área (mm2)	Nº timers/temp
STM32F103C8T6T R	1	6.13	6.13	9.8	4

Tabla 7: Características sobre el microcontrolador

Osciladores

Para el caso concreto de los dos osciladores, en la BluePill no se especifica un modelo concreto de dichos componentes, por lo que se hizo de nuevo una distinción de ellos que cumplieran con los requisitos indispensables y, posteriormente, una selección para escoger los más óptimos y asequibles.

Oscilador -32.768 kHz-

Tipo	Uds	Coste unidad(€)	Área (mm ²)	Valor corriente	Capacidad carga	VOS (V)	Rise/Fall Time (Tr/Tf) max
ASAK-32.768KHZ-LRS-T	1	1.51	3.2	120 uA	15 pF	3.3V	60 ns
ASAK1-32.768KH Z-LRS-T	1	1.65	3.2	240 uA	15 pF	2.5V	60 ns
ASFLK-32.768KH Z-LJT	1	1.23	6.5	0.5mATyp,1mA MAX	16 pF	3.3 V	250 ns

Tabla 8: Tipos y características oscilador 32.768 kHz

Para la selección del oscilador, se sigue la misma dinámica que para el multiplexor, donde las diferencias “internas” más significativas se pueden ver en los tiempos de rise and fall, se descarta el último tipo.

Respecto a los restantes, un voltaje que alcance los 3.3 V (voltaje al que se va a trabajar) y con una menor corriente para su funcionamiento sería el idóneo.

Oscilador -8 MHz-

Tipo	Uds	Coste /ud (€)	Área (mm ²)	Valor corriente	Capacidad carga	VOS (V)	Startup time(max)	Disable time (max)
ASFLMB-8.000MHZ-LC-T	1	1.3	4.25	5,6,7 mA	15 pF	1.8,2.5, 3.3	3 ms	100 ns
ECS-2520MV+Q20+D20 :O20+D20:Q20	1	1.09	2	8mA	15 pF	1.7 to 3.6	5 ms	1 ps
ECS-2520MVQ-080-CN-TR	1	1.22	2	8mA	16 pF	1.6 to 3.6	10 ms	1 ps

Tabla 9: Tipos y características oscilador 8MHz

Para este caso, comparando los dos últimos, se escogería el segundo puesto es más barato y tiene un Startup time menor, ya que las demás características coinciden.

En referencia a los dos primeros, partiendo del precio, área y disable time (son menores en el escogido), las diferencias de los demás parámetros no son notablemente significativas como para cambiar la decisión.

Finalmente, se escogió el modelo *ASAK-32.768KHZ-LRS-T* para el oscilador de 32.768kHz y el modelo *ECS-2520MV+Q20+D20:O20+D20:Q20* para el oscilador de 8MHz.

Micro USB conector

Tipo	Uds	Coste ud (€)	Corriente nominal	Resis.aisl am	Vm áx	Ángulo montaje	Nº contactos	Nº puer tos
USB3076-30-A	1	0.613	1-1.8 A	1000 MOhms	30V	Right Angle	5	1
UJ2-MIBH-G-SMT-TR	1	0.394	0.5-1.8 A	1000 MOhms	5V	Right Angle	5	1

Tabla 10: Tipos y características micro USB conector

Respecto a la selección del conector de micro USB, comparando los precios con las necesidades, el más rentable sería el sombreado en la gráfica-UJ2-MIBH-G-SMT-TR- ya que los demás tienen un coste mayor y características similares.

En nuestro caso, al no necesitar más de 5V de voltaje no sería necesario recurrir a uno de mayor voltaje máximo, puesto que el precio aumentaría.

Leds

Se ha hecho uso de la página Aliexpress para buscar estos componentes ya que al no precisar un complejo montaje y venderse por unidades (no unidades sueltas), dicha página ofrece los mejores precios.

Coste 10 leds verdes/rojos/azul/amarillo = 0.37€ solo de un color

Coste 10 leds blancos = 0.41€

Coste 100 leds 20leds x color = 1.21€

Coste envío = 0.60€

Suponiendo que se escogen LEDS del mismo color, aunque sean para funciones diferentes cada uno, y con el precio más económico.

$$\text{Coste total} = 0.37 + 0.60 = 0.97\text{€}$$

Botón reset

Tipo	Uds	Precio/ud (€)	Longitud (mm)
TL6190BUTTON	1	0.18	11.4

Tabla 11: Botón reset

Respecto a este componente, se buscó la opción más barata posible (de venta por unidades) ya que su funcionalidad no requiere de un trabajo complejo o de más características como pueden tener otros componentes.

BOOT0/BOOT1 Jumpers

Estas piezas han sido buscadas en la página aliexpress ya que tienen un precio menor a la de las demás, además no se venden por unidades sueltas, sino en packs (este sería de 100 uds aunque nosotros solo necesitaríamos 2uds).

Por lo que el precio final, independientemente de que solo vayamos a usar 2uds sería de 0.45€.

Tipo	Uds	Precio/ud (€)	Coste envío (€)	Derivación (mm)	Coste total (€)
Boot Jumper Selector	100	0.45	0.71	2.54	1.16

Tabla 12: BOOT0/BOOT1 Jumpers

Por otro lado, habría que añadir los componentes necesarios que no vendrían en la placa como pueden ser los dos multiplexores, la resistencia, R_o ($2K2 \Omega$) y el regulador de voltaje lineal para este sistema de adquisición, así como la placa PCB donde se llevará a cabo el montaje

Multiplexores

Tipo	Uds	Coste/ud (€)	Coste total (€)	Área (mm ²)	Ron (ohmios)	toff (max)	ton (max)
74HC4067B Q,118	2	1.12	2.24	20.16	130	42 ns	38 ns

Tabla 13: Multiplexor

Resistencia, Ro

ALIEXPRES	Unidad	Coste resistencias	Coste ud (€)	Coste envío	Coste
S	es	(€)		(€)	Total (€)
RESISTENCIA: 2K2 Ω	220	0.25	0.001136364	0.79	1.04

Tabla 14: Resistencia Ro

Regulador de voltaje lineal

A diferencia de la opción de BluePill, donde se tiene ya un conversor incluido en dicha placa que proporciona los 3.3 V a los que se va a trabajar, en esta opción, al no haber BluePill, se necesita obtener dicho voltaje a través de un regulador de voltaje lineal que se tiene que añadir como otro componente.

Tipo	Unidades	Coste/unidad(€)	Área (mm ²)	Vin	Vout
ADP150AUJZ- 3.3-R7	1	1.29	2.9x1.6	2.2-5.5V	3.3V
ADP160AUJZ- 3.3-R7	1	1.33	2.9x1.6	2.2-5.5V	3.3V
ADP122AUJZ- 3.3-R7	1	1.40	2.9x1.6	2.2-5.5V	3.3V

Tabla 15: Tipos y características de regulador de voltaje lineal

Para la selección de este componente, se ha optado por escoger la opción más barata, ya que las demás características que resultan imprescindibles en este caso, coinciden. Así pues, se ha escogido el regulador de voltaje lineal ADP150AUJZ-3.3-R7.

6.1. Dimensiones componentes

A continuación, se procederá a mostrar las dimensiones de los diferentes componentes para estimar el área individual y total que ocuparían. Para ellos se utilizarán los ejes paralelos al suelo, es decir, vistos desde arriba.

El objetivo de esto sería estimar el área total de todos componentes, para luego estimar el de la placa PCB donde se llevará a cabo el montaje del circuito final.

Componente	Micro	Oscilador 32.768kHz	Oscilador 8MHz	Micro USB	Botón Reset	BOOT0/1 jumpers (x2)	MUXs(x2)	Ro	Regulador
Altura(mm)	5.6	2	2.5	6.9	11.5	5	5.6	6.3	0.9
Longitud (mm)	3.6	1.6	2	5	12.0	2.5	3.6	3.5	2.9
Área (mm ²)	20.2	3.2	5	34.5	138. 5	12.5(x2) = 25	20.2(x2)= 40.4	22. 0	2.61
Área total componentes BluePill (mm²) = 226.4									
Área total componentes BluePill + componentes extra (mm²) = 291.4									

Tabla 16: Dimensiones opción componente a componente, MUXS

Placa PCB

En esta opción de “componente a componente” no se necesitaría una placa BluePill, por lo que se montarían todos componentes directamente en la placa PCB, donde el área total de todos componentes (con los extra añadidos) sería 291.4mm² y el precio de la placa PCB, como en el apartado anterior, sería de 0.00018€/mm².

Para que no estén todos los componentes completamente juntos y haya un área “sobrante” que dé espacio al circuito, se aplicará el factor ‘BluePill-componentes’ (100/18).

De esta manera, el resultado sería $291.4 \times \frac{100}{18} = 1618.9 \text{ mm}^2$.

El precio total de esta placa PCB en el caso de “componente a componente” sería de $0.00018\text{€} \times 1618.9 \text{ mm}^2 = 0.29\text{€}$.

6.2. Coste opción componente a componente, MUXs

Como objetivo final y estudio de este trabajo, se hace hincapié en el estudio del coste, por lo que una vez conseguidos todos los componentes se suma las respectivas cantidades totales de cada uno.

MUX (x2)	Resistencia (pack)	Oscilador (8MHz)	Oscilador (32.768kHz)	Micro	PCB	Micro USB	Reg	LEDS	Botón reset	Jumpers	Coste total (€)
2.24	1.04	1.09	1.51	6.13	0.29	0.394	1.29	0.97	0.18	1.16	16.29

Tabla 17: Coste opción componente a componente, MUXs

Como resultado, obtendríamos un coste total de los componentes + PCB sería de 16.29€, donde aproximaremos a 16€, mediante la opción de “comprar componente a componente”.

7. Comparación costes opciones MUXs

Una vez realizado el estudio, análisis y selección de los componentes de ambas alternativas respecto al sistema de adquisición de MUXs, con las opciones “Blue Pill” y “componente a componente”, se va a proceder a su comparación.

Mediante la opción de comprar la BluePill ya con los componentes y añadiendo los “extra” a la placa PCB, el coste total sería de 9.57€, siendo lo más caro la propia BluePill (6.01€), lo que parece lógico ya que en ella contendría la mayoría de los componentes a utilizar.

Mientras que, mediante la opción de comprar componente a componente, y sin la necesidad de una placa BluePill, el coste total sería de 16€, siendo el componente más caro el microcontrolador (6.13€).

A partir de aquí se puede observar que hay una diferencia de 6.43€ entre ambas opciones donde en la opción de componente a componente, el coste del microcontrolador por separado es superior al de la BluePill con los 11 componentes que tendría en la otra opción.

Además, respecto al área de la placa PCB y coste de la misma en ambas alternativas tendría que tener los mismos valores, ya que se utiliza el mismo factor (100/18), por lo que esta diferencia de área y precio (36mm² y 0.01€) sería un error debido al redondeo de decimales!

En resumen, ambas alternativas tendrán el mismo área, es decir, ocuparán el mismo espacio, por lo que, para buscar la opción más rentable, en un principio habría que fijarse en el precio, y esta sería la opción de la BluePill. El problema que puede surgir con la placa BluePill es que, dicha placa está adaptada al tamaño y dimensiones de dichos componentes, así pues, si se necesitara de algún cambio de componente con otras dimensiones podrían surgir dificultades a la hora de acoplarlo a dicha placa BluePill.

La ventaja de la opción de componente a componente es que te permite un mayor rango de variaciones, es decir, puedes elegir e incorporar componentes según tus preferencias o hilando más fino en sus características. También es probable que integrar todos los componentes directamente en una PCB tenga menos problemas de ruido que integrar la BluePill en otra PCB, donde se añaden contactos y longitud de pistas.

8. Opción componente a componente ZPM

El método a seguir para esta opción componente a componente sería el mismo que el empleado en el MUXS, básicamente consistiría en hacer un cribado de los diferentes componentes necesarios para escoger los más óptimos

En este caso de ZPM, se van a utilizar los mismos componentes que en el caso del MUXS, excepto algunos cambios como puede ser los multiplexores, el amplificador operacional y microcontrolador (encapsulado).

Por lo que los componentes repetidos quedarían de tal manera:

OSCILADOR (32.768kHz): ASAK-32.768KHZ-LRS-T = 1.51€

OSCILADOR (8MHz): ECS-2520MV+Q20+D20:O20+D20:Q20 = 1.09€

MICRO USB CONECTOR: UJ2-MIBH-G-SMT-TR = 0.394€

LEDS: 0.97€

BOTÓN RESET: TL6190BUTTON = 0.18€

BOOT0/BOOT1 JUMPERS: Boot Jumper Selector = 1.16€

REGULADOR DE VOLTAJE LINEAL: ADP150AUJZ-3.3-R7 = 1.29€

Multiplexores

Dado que la estructura del sensor sería de 16x16, necesitaríamos un total de 32 líneas digitales, así pues, se necesitarían 32 interruptores analógicos (2:1 mux, SPDT single pole double throw), es decir 16 chips ya que en cada uno habría dos líneas disponibles.

La tarjeta BluePill que se ha utilizado para el sistema “MUXs” tendría un total de 24 pines digitales, por lo que aquí no sería apto.

Tipo	U ds	Coste/u d(€)	Coste total (€)	Área (mm ²)	Corriente.. SumMax	Ron(Ω)	ton (max)	toff (max)
TS5A23159 RSER	16	0.998	15.968	3	0.5uA	1.1ohmio s	13ns	8ns
TS5A23159D GSR	16	0.805	12.88	9	0.5 uA	1.1ohmio s	13ns	8ns
TS5A23159D GST	16	1.44	23.04	9	0.5 uA	1.1ohmio s	13ns	8ns

Tabla 18: Multiplexores

Respecto a los diferentes multiplexores, vemos que hay una diferencia de precio respecto al área y peso de ellos, pero ésta no resulta significativa, puesto que se escogerá el componente más barato que sería el modelo TS5A23159DGSR.

Respecto a las características de ton, toff y Ron, sería lo mismo que en modelo anterior del MUXS.

Microcontrolador

Con referencia al microcontrolador, como ya se ha dicho antes, se necesitarían 32 pines digitales (aparte uno para el ADC), haciendo un total de 33, así pues, el microcontrolador que viene integrado en la BluePill no tiene los suficientes. Por lo que, cambiando el encapsulado LQFP de 64 pines tendríamos un total de 37 pines libres que, serían suficientes ya que se necesitarían 33.

Amplificador operacional inversor

Tipo	Unidades	Coste/unidad (€)	Área (mm ²)	Cte.Sum. Operativa	Corriente salida por canal	Vmax-min
MAX4305ESA +	1	5.26	5x4	20mA	70mA	±5.5V,±3.5V
MAX4304ESA +T	1	7.23	5x4	20mA	70mA	±5.5V,±3.5V
NJM3414AV-TE2	1	0.51	3.5x4.4	5mA	70mA	±7.5V,±1.5V
MAX44243 (Ltpice)	1	8.62	5x4	420 uA	40mA	±18V,±1.35V

Tabla 19: Amplificador operacional

A la hora de escoger el amplificador operacional, se puede ver que todos coinciden en las características que se consideran más importantes, donde solo resulta la variación de precio. Es por eso, que se seleccionará el más barato, es decir el amplificador operacional NJM3414AV-TE2.

Regulador de tensión conmutado (inversor)

Otro factor a tener en cuenta en el ZPM es que las filas están conectadas a un voltaje de +3.3V, pero tenemos un amplificador operacional inversor que provoca la aparición de voltajes negativos. Así pues, se pondrá un valor máximo negativo de -5V, teniendo en cuenta los +5V del USB. Una vez sabido lo que se busca se pasa a seleccionar dicho componente.

Tipo	Unidades	Coste ud (€)	Voltaje salida (V)	Vmin entrada (V)	Corriente. Sum	Corriente Salida
LT1054CDWR	1	2.06	-5	3.5	2.5mA	100mA
LT1054CDWRG4	1	1.02	-5	3.5	2.5mA	100mA
MAX735CSA +	1	5.09	-5	4	2.5mA	275mA

Tabla 20: Regulador conmutado de tensión

A la hora de seleccionar este componente se puede observar que las principales diferencias radican en el precio, corriente de salida, V_{min} de entrada y frecuencia de conmutación. El V_{min} de entrada quiere decir que hasta que no se alcanza dicho voltaje no se obtienen los -5V a la salida, realmente cuanto menor sea mejor pero no tiene gran importancia entre esos dos valores.

Respecto a la corriente de salida y frecuencia de conmutación cuanto mayor sea mejor puesto que se obtiene más corriente y se obtiene más rápido el voltaje deseado. Pero la diferencia de precio respecto del más barato al más caro tiene una mayor importancia que las pequeñas diferencias entre las características, por lo que se escogerá el componente de menor precio.

8.1. Dimensiones componentes

Al igual que en el sistema anterior, a continuación, se procederá a mostrar las dimensiones de los diferentes componentes para estimar el área individual y total que ocuparían. Para ellos se utilizarán los ejes paralelos al suelo, es decir, vistos desde arriba.

Componente	Micr o	Oscilad or 32.768k Hz	Oscilado r 8MHz	Micro USB	Botón Reset	BOOT0/I jumpers (x2)	AO	Reg.lin	MUXs (x16)	Reg. Inv
Altura (mm)	10	2	2.5	6.9	11.5	5	3.5	0.9	3.0	10.28
Longitud (mm)	10	1.6	2	5	12.0	2.5	4.4	2.9	3.0	7.52
Área (mm ²)	100	3.2	5	34.5	138. 5	12.5(x2) = 25	15.4	2.61	20.2(x16) =144	77.3
Área total componentes (mm ²) = 545.5										

Tabla 21: Dimensiones opción componente a componente ZPM

El objetivo de esto sería estimar el área total de todos componentes, para luego estimar el de la placa PCB donde se llevará a cabo el montaje del circuito final.

Placa PCB

En esta opción de “componente a componente” no se necesitaría una placa BluePill, por lo que se montarían todos componentes directamente en la placa PCB, donde el área total de todos componentes sería 545.5 mm^2 y el precio de la placa PCB, como en el apartado anterior, sería de 0.00018 €/mm^2 .

En este caso también se va a incluir un área sobrante, para que no estén todos componentes completamente juntos por medio del factor ya utilizado (100/18).

Tras esto, el área resultante tendría un valor de: $\text{Área placa PCB} = 545.5 \text{ mm}^2 \times \frac{100}{18} = 3030 \text{ mm}^2$.

Así pues, el precio total de esta placa PCB en el caso de “componente a componente” sería de $0.00018 \text{ €} \times 3030 \text{ mm}^2 = 0.54 \text{ €}$.

8.2. Coste opción componente a componente, ZPM

Como objetivo final y estudio de este trabajo, se hace hincapié en el estudio del coste, por lo que una vez conseguidos todos los componentes se suma las respectivas cantidades totales de cada uno.

MUX (x16)	AO	Osc (8MHz)	Osc (32.768kHz)	Micro	Micro USB	PCB	LEDS	Botón reset	Jumpers	Reg. Line	Reg. Inv	Coste total (€)
12.88	0.51	1.09	1.51	6.13	0.394	0.54	0.97	0.18	1.16	1.29	1.02	27.7

Tabla 22: Coste opción componente a componente, ZPM

Como resultado, obtendríamos un coste total de los componentes sería de 27.7 € mediante la opción de “comprar componente a componente”.

Por lo que podríamos redondearlo y decir que el coste total de los componentes necesarios costaría un total de 28 € .

9. Comparación costes MUXs-ZPM

La diferencia más notoria que se observa al analizar ambos sistemas de adquisición sería el coste total, siendo el del ZPM casi el doble que la alternativa más cara de la opción MUXs (esta sería la de “componente a componente” y su coste sería de 16€ mientras que el coste total de ZPM sería de 28€).

En este caso, el componente con un mayor coste lo tendrían los multiplexores (habría un total de 16 unidades) con un valor de casi la mitad del coste total (12.88€).

Respecto al área que ocupan y, a su vez, el coste de la placa PCB, el ZPM tiene un área de casi el doble que MUXs, (3030 mm²) y esto se ve reflejado en el precio, 0.54€. No obstante, el precio de fabricación de la PCB no es proporcionalmente muy alto con relación al coste total.

Ambas opciones de “componente a componente” de los dos sistemas de adquisición comparten la mayoría de los componentes exceptuando la resistencia Ro, los multiplexores y componentes extra que tiene el ZPM como el amplificador operacional, el regulador conmutado de tensión y la diferente versión del microcontrolador. Como se ha dicho antes, de estas diferencias de componentes, lo que afecta de manera notoria al precio serían los multiplexores.

En conclusión, el sistema de adquisición ZPM tendría un coste y área mayor que el sistema de adquisición MUXs (en ambas alternativas).

10. Consumo

10.1. Consumo MUXx

Para los cálculos del consumo de los diferentes componentes, se tendrá en cuenta el voltaje al cual va a trabajar la placa (voltaje de alimentación), el cual es 3.3V, así pues, independientemente de que dichos componentes puedan soportar o trabajar a mayores voltajes (y calcular de ahí el consumo máximo teórico) se hará uso de dicho voltaje de alimentación. Por otra parte, la propia placa BluePill contiene un convertidor de 5V-3.3V, es por eso que la placa trabajará a dicho voltaje. En cambio, para la opción de “componente a componente” se ha tenido que añadir un regulador de voltaje lineal para poder transformar los 5V del USB a 3.3V.

MICROCONTROLADOR STM32F103C8T6

A la hora de calcular el consumo del microcontrolador, hay que tener en cuenta varios aspectos ya que dependiendo de los valores que se escojan variarán los respectivos valores de consumo, así pues, los que se han escogido para este caso serían:

- Temperatura del componente durante su funcionamiento, T_f : 25°C.
- Temperatura máxima en el caso de un calentamiento, T_c : 40°C.
- Frecuencia de trabajo: 48MHz.
- Voltaje operativo de suministro máximo: 3.6V (usaremos 3.3V como voltaje de funcionamiento).
- Periféricos operativos (según la tabla 2 de la datasheet, *figura 9*):
 - Flash
 - RAM
 - 1 timer
 - USB
 - 1ADC
 - 8 líneas digitales del GPIO
- Modo de funcionamiento: RUN mode.

Peripheral		STM32F103Tx		STM32F103Cx		STM32F103Rx		STM32F103Vx	
Flash - Kbytes		64	128	64	128	64	128	64	128
SRAM - Kbytes		20		20		20		20	
Timers	General-purpose	3		3		3		3	
	Advanced-control	1		1		1		1	
Communication	SPI	1		2		2		2	
	I ² C	1		2		2		2	
	USART	2		3		3		3	
	USB	1		1		1		1	
	CAN	1		1		1		1	
GPIOs		26		37		51		80	
12-bit synchronized ADC		2		2		2		2	
Number of channels		10 channels		10 channels		16 channels ⁽¹⁾		16 channels	
CPU frequency		72 MHz							
Operating voltage		2.0 to 3.6 V							
Operating temperatures		Ambient temperatures: -40 to +85 °C / -40 to +105 °C (see Table 9) Junction temperature: -40 to +125 °C (see Table 9)							
Packages		VFQFPN36		LQFP48, UQFPN48		LQFP64, TFBGA64		LQFP100, LFBGA100, UFBGA100	

Figura 9: Periféricos microcontrolador

Symbol	Parameter	Conditions	f _{HCLK}	Max ⁽¹⁾		Unit
				T _A = 85 °C	T _A = 105 °C	
I _{DD}	Supply current in Run mode	External clock ⁽²⁾ , all peripherals enabled	72 MHz	50	50.3	mA
			48 MHz	36.1	36.2	
			36 MHz	28.6	28.7	
			24 MHz	19.9	20.1	
			16 MHz	14.7	14.9	
			8 MHz	8.6	8.9	
		External clock ⁽²⁾ , all peripherals disabled	72 MHz	32.8	32.9	
			48 MHz	24.4	24.5	
			36 MHz	19.8	19.9	
			24 MHz	13.9	14.2	
			16 MHz	10.7	11	
			8 MHz	6.8	7.1	

Figura 10: Máxima corriente de consumo respecto a la temperatura y frecuencia

Realmente y siendo estrictamente precisos, el consumo a medir sería a una temperatura de 25°C y a una frecuencia de 48MHz. En las tablas de la datasheet no se encuentra ninguna que aporte justo dicha información, por lo que, teniendo en cuenta que el consumo no varía, significativamente, con la temperatura, se va a proceder a medir dicho consumo a la temperatura de 85 °C.

Por lo que se haría una interpolación, donde con todos periféricos, el consumo a una frecuencia de 48MHz y la temperatura de 85°C sería de 36.1mA; y sin ningún periférico (y las mismas condiciones de frecuencia y temperatura) sería de 24.4mA.

Tomando que en nuestro caso se hará uso de la mitad de periféricos, la corriente sería de un valor de 30.25mA.

El consumo sería pues, $P = V \cdot I = 3.3V \times 30.25 \text{ mA} = 99.8\text{mW}$

OSCILADOR-32.768kHz-

Con una tensión de suministro máxima de 3.63V y una corriente máxima de 240 μA, la potencia por lo tanto sería de: $P_{\text{ot máx}} = V \cdot I = 3.3V \cdot 240 \mu A = 792 \mu W = 0.792\text{mW}$.

OSCILADOR-8MHz-

Este oscilador tendría una de tensión de suministro máxima de 3.6V (aunque se escogerá 3.3V como voltaje de alimentación) y, donde a partir de la siguiente tabla se podría obtener una estimación del consumo de la corriente máxima con un voltaje de 3.3V y a la frecuencia de dicho oscilador, 8MHz, siendo ésta de 5 mA.

CURRENT CONSUMPTION mA Max

FREQ.	~ 19 MHz	~ 39.9 MHz	~ 50 MHz	~ 60 MHz
+1.8V	2.5	3.0	3.5	4.0
+2.5V	4.5	5.5	6.5	7.0
+3.0V	5.5	6.5	7.5	8.0
+3.3V	6.0	7.0	8.0	8.5

Figura 14: Corriente de consumo (ma) Máx.

Por lo tanto, la potencia tendría un valor de: $Pot = V * I = 3.3V * 5mA = 16.5 \text{ mW}$.

MUX

En este caso, habría que tener en cuenta que en el circuito MUXS tendríamos dos multiplexores, por lo que habría que tenerlo en cuenta a la hora de calcular la potencia total.

Estos componentes van a trabajar a un voltaje de 3.3V (aunque el máximo sería de 5V) y una corriente máxima de 0.016 mA, así pues, la potencia vendría dada por: $Pot = V * I = 3.3V * 0.016mA = 0.0528 \text{ mW}$.

Así que, la potencia de los dos multiplexores sería un total de $0.0528 * 2 = 0.1056 \text{ mW}$.

Power LED and User LED

Ambos componentes están alimentados por 3.3 V y donde la intensidad que circulará a través de ellos se ha estimado escogiendo un valor de 2mA.

Por lo que la potencia será de: $Pot = V * I = 3.3V * 2mA * 2 (\text{n}^\circ \text{ leds}) = 13.2 \text{ mW}$.

Regulador de voltaje lineal

Para el caso de la alternativa “componente a componente” de MUXs no se necesita la placa BluePill, la cual llevaba integrado un regulador de tensión, por lo tanto se utiliza este componente para realizar dicha conversión.

El regulador tendría una corriente de suministro máxima de 320 uA y el voltaje máximo que soportaría sería de 5V, para transformarlos posteriormente.

Así pues, el consumo de dicho componente sería $P = V * I = 5 * 320uA = 1600uW = 1.6mW$.

Resistencia, Ro, MUXS

Para calcular el consumo de la resistencia, Ro, primero habría que conocer el valor de la corriente que pasa por dicha resistencia. Así que, haciendo uso de la ley de Ohm, la corriente sería $I=V/R$, donde sustituyendo datos, $I=3.3V/2200\Omega$; $I=0.0015A = 1.5mA$.

Realmente este cálculo sería el peor de los casos, ya que este sería con una resistencia de valor 0 de la matriz de sensores donde la corriente tendría valor máximo de 1.5mA.

Una vez conocida la corriente ya se podría calcular el consumo, donde $P=V*I=3.3V*1.5mA$; $P=4.95mW$

Consumo total alternativas MUXs

Microcontrolador	Oscilador (32.768kHz)	Oscilador (8MHz)	MUX(x2)	Power LED	User LED	Ro	Consumo Total
99.8mW	0.792 mW	16.5mW	0.1056mW	6.6mW	6.6mW	4.95mW	135.35mW

Tabla 23: Consumo total BluePill, MUXs

Micro	Osc. (32.768kHz)	Osc. (8MHz)	MUX (x2)	Power LED	User LED	RegLin	Ro	Consumo Total
99.8mW	0.792 mW	16.5mW	0.1056mW	6.6mW	6.6mW	1.6mW	4.95mW	136.95mW

Tabla 24: Consumo total componente a componente MUXs

Finalmente, dependiendo de si escojamos una alternativa u otra, la diferencia de consumo total proporcionada por el componente “regulador de voltaje lineal” va a resultar insignificante. De este modo, aproximando cada valor (135 y 137 mW, respectivamente), se dirá que el consumo total de la opción MUXs es de 136mW (media aritmética).

10.2. Consumo ZPM

En este caso se utilizará el mismo nivel de voltaje, 3.3V, y por otro lado, el consumo en los mismos componentes utilizados que en el caso del MUXS será el mismo, el cuál cambiará en los multiplexores, amplificador operacional y varios consumos adicionales.

MUXs

En este caso, habría que tener en cuenta que en el circuito ZPM tendríamos 16 multiplexores, por lo que habría que tenerlo en cuenta a la hora de calcular la potencia total.

Estos componentes van a trabajar a un voltaje de 3.3V (aunque el máximo sería de 5.5V) y una corriente máxima (de cada chip, es decir, de los dos interruptores) de 0.5 uA, así pues, la potencia vendría dada por: $Pot = V \cdot I = 3.3V \cdot 0.5 \mu A = 1.65 \mu W$.

Así que, la potencia de los dieciséis multiplexores sería un total de $1.65 \mu W \cdot 16 = 26.4 \mu W$.

Amplificador Operacional

El amplificador operacional inversor va a ser alimentado a $\pm 5V$, puesto que el USB proporciona los +5V en el circuito. Así pues, independientemente de que el voltaje de entrada sea al que trabaja la placa (3.3V), el voltaje de alimentación será de $\pm 5V$. Con una corriente máxima de 170 uA, la potencia se calcularía de tal forma que $Pot = V \cdot I = 5V \cdot 170 \mu A = 850 \mu W = 0.85 mW$.

Resistencia de la malla

Habría que tener en cuenta también el consumo asociado a la propia malla, por ejemplo, al subirse una persona sobre ella. En este caso y según las pruebas realizadas en el prototipo de EduQTech e indicadas por el director del TFG, la resistencia equivalente de la malla cuando hay una persona encima sería de unos 50 ohmios (realmente este sería un caso desfavorable puesto que, si no se ejerce presión, la resistencia sería muy alta y no habría consumo). Teniendo como voltaje de referencia 3.3V, la intensidad que se obtendría sería de: $3.3V / 50\Omega = 66mA$

Así pues, la potencia consumida sería de $P = V \cdot I = 3.3V \cdot 66mA = 217.8mW$.

Regulador de tensión conmutado (inversor)

El componente escogido tiene un voltaje de suministro de entrada mínimo de 3.5V y con una corriente de suministro de 2.5mA. A esto se añade que el micro USB se alimenta a +5V, de tal forma que, para calcular el consumo, independientemente de que el sistema trabaje a 3.3V, se utilizará los 5V del micro USB.

Por lo que el consumo del regulador de tensión de conmutación vendría dado por $P = V \cdot I = 5V \times 2.5mA = 12.5mW$.

Regulador de voltaje lineal

Como bien se ha dicho, se va a trabajar a un voltaje de 3.3V en la mayoría de los componentes, es por eso que se necesita regular el voltaje de alimentación del USB (+5V) a los 3.3V.

El regulador tendría una corriente de suministro máxima de 320 uA y el voltaje máximo que soportaría sería de 5V, para transformarlos posteriormente.

Así pues, el consumo de dicho componente sería $P = V \cdot I = 5 \cdot 320\mu A = 1600\mu W = 1.6mW$

Consumo total

Micro	Osc. (32.768kHz)	Osc. (8MHz)	MUX (x16)	Power LED	User LED	AO	Malla	Reg. Lin	Reg.Inv	Consumo Total
99.8 mW	0.792 mW	16.5 mW	26.4 uW	6.6 mW	6.6 mW	0.85 mW	217.8 mW	1.6 mW	12.5 mW	389.4 mW

Tabla 25: Consumo total opción ZPM

Por lo tanto, el consumo total en la opción ZPM tendrá un valor de 389.4mW.

11. Comparación consumos MUXs-ZPM

Una vez se ha hecho el análisis de los ambos sistemas y se han seleccionado todos los componentes que van a ser utilizados, se va a realizar una comparación final acerca del consumo total de ambos sistemas de adquisición, MUXx y ZPM.

Respecto al primero, MUXs, el consumo total tiene un valor de 136 mW mientras que el consumo del ZPM sería de 389.4 mW. Hay una diferencia de 253.4 mW entre ambos sistemas.

Esta diferencia de consumo entre ambos sistemas radica, principalmente, en el consumo de la malla (217.8 mW) que resulta el mayor de todos. Donde en el caso de MUXs, el consumo de la malla está limitado por la R_o .

El sistema ZPM, contiene los mismos componentes y, por lo tanto, los mismos consumos que el MUXs excepto la resistencia R_o y los dos multiplexores (en el caso del ZPM habría un total de 16 y serían de diferente tipo) por lo que el consumo del sistema MUXs se podría decir que no podría ser nunca mayor que el del ZPM teniendo en cuenta que a pesar de la excepción de la R_o y los dos multiplexores, el ZPM contiene más componentes y por tanto más consumos a considerar. Además, por la red de sensores resistivos pasa una corriente muy apreciable en el caso del ZPM.

Por otra parte, respecto al consumo de componentes, el micro es el más alto en ambos casos, con un valor de 99.8 mW lo cual resulta lógico entre otras cosas por la utilización de periféricos y sus respectivos consumos.

Por lo tanto, se podría decir que el sistema de adquisición ZPM tendría un consumo claramente mayor que el sistema MUXs.

12. Conclusión sistemas MUXs-ZPM

Si nos centramos solo en el precio, el sistema ZPM, claramente es el más caro, mientras que la opción “BluePill” de MUXs sería la más barata, donde la diferencia de precio entre ambas tendría un valor de 21.53€. Dicha diferencia de precio radica, principalmente, en la existencia de un mayor número de componentes en el sistema ZPM y, además, de un coste elevado de estos, si bien hay algunos componentes que aparecen en ambos diseños.

Por otro lado, poniendo nuestro foco en el consumo de ambos sistemas, como ya se ha dicho antes, el ZPM tendría un consumo mayor de casi el triple que el MUXs.

Esto parece lógico ya que, como se ha mencionado, el ZPM tendría un mayor número de componentes y, por tanto, un mayor consumo, lo que se une a la mayor corriente que pasa por los sensores en el circuito ZPM.

Respecto al espacio que ocuparían ambos sistemas, es decir, el área total, ambas opciones del MUXs compartirían, prácticamente, la misma área (la media de ambas daría un valor de 1584 mm²). Siguiendo con la misma lógica de antes, el ZPM al tener un mayor número de componentes, tendría un área mayor con un valor de 2983 mm². Por supuesto, hay que tener en cuenta que se trata de dos sistemas de adquisición de datos diferentes cada cual con sus propias limitaciones y peculiaridades a tener en cuenta, pero si se trata de comparar su coste y consumo, el sistema de adquisición ZPM será más caro, tendrá un mayor consumo y ocupará un mayor área que el sistema de adquisición de datos MUXs.

13. Simulación LTspice

Una vez se tengan los datos teóricos, se va a pasar a la simulación de un circuito para comprobar y comparar los resultados obtenidos.

Para ello se va a utilizar “LTspice”, un software para la simulación de circuitos electrónicos, donde el circuito que se va a estudiar se trataría del sistema de adquisición ZPM, en este caso con un tamaño más pequeño (4x4).

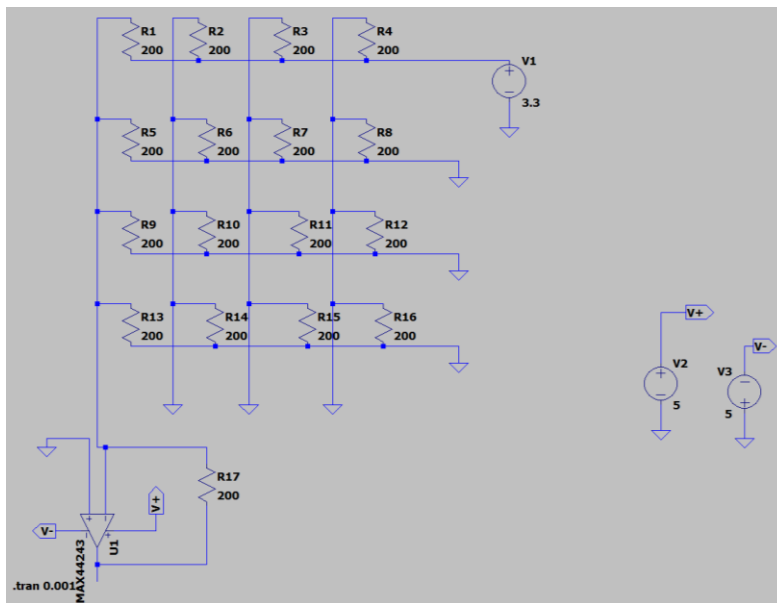


Figura 9: Simulación LTspice circuito ZPM

Datos a destacar serían: la fuente de tensión V1 de 3.3V, al voltaje que se va a operar; fuentes de alimentación del amplificador operacional, V2 y V3 ($\pm 5V$); resistencia en cada fila de 200 ohmios (con lo que equivalente de las cuatro filas serán 50 ohmios), correspondiéndose al peor caso cuando una persona se pone encima de la malla (el valor de las resistencias disminuye); resistencia de realimentación del amplificador operacional, R17, del mismo valor que la de la fila seleccionada para obtener ganancia de valor “-1” y, por consiguiente, un voltaje de salida, V_o , de -3.3V; el amplificador operacional utilizado no se corresponde con el seleccionado en el modelo teórico ya que no se ha encontrado el modelo “spice” de

dicho componente. Es por eso que los valores obtenidos en la simulación se compararán con los que aparecen en el datasheet. Por último, no aparecen modelos de los interruptores que se han utilizado en la teoría por lo que, al no usarlos, se encontraría en el caso ideal (consumo despreciable, $R_{on}=R_{off}=0$). Entonces, la fila y columna que se quiere analizar, se conectan a V1 y al amplificador operacional, respectivamente, dejando las demás conectadas a tierra.

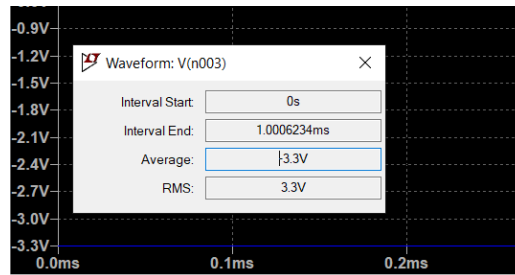


Figura 10 :Voltaje de salida del amplificador operacional, V_o

Como se puede observar, se ha medido la salida del amplificador, V_o , la cual funciona correctamente ya que, como se ha mencionado anteriormente, habría una ganancia de valor -1, obteniéndose así el valor esperado de -3.3V.

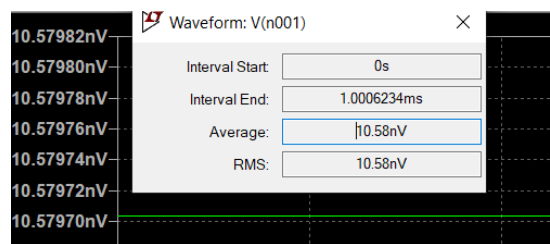


Figura 11: Voltaje V_- del AO

En un amplificador ideal, $V_+ = V_- = 0$ (ya que V_+ está conectado a masa). Al tratarse de un caso real el voltaje V_- no tiene un valor de 0 pero es muy pequeño del orden de nano Voltios y no afectaría considerablemente en el proceso.

Para comprobar si el supuesto consumo del amplificador en la hoja de características se corresponde con lo que se obtenga en la simulación, se miden ambas corrientes de las fuentes de alimentación del AO en LTspice, donde:

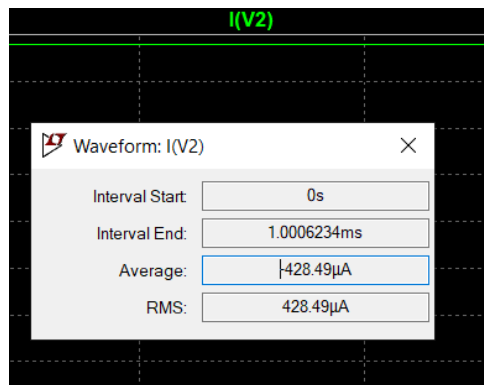


Figura 12: Intensidad fuente V2

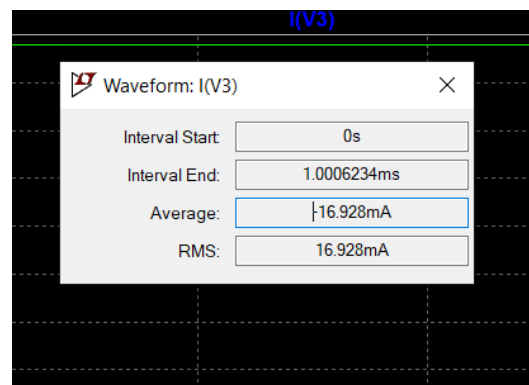


Figura 13: Intensidad fuente V3

Aquí se pueden ver las corrientes de dichas fuentes, V2 y V3, respectivamente. Echando un vistazo en la hoja de características aparece la siguiente tabla de la evolución de la corriente de suministro por amplificador respecto al voltaje de suministro (en nuestro caso sería de 5V).

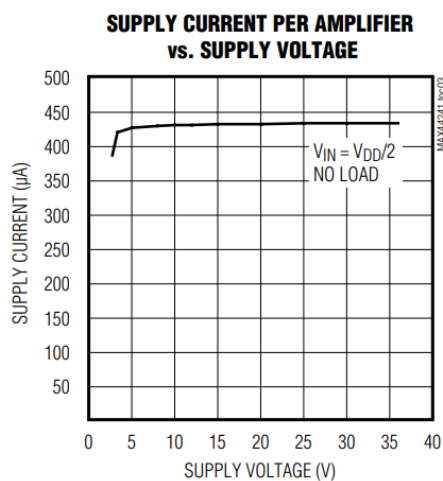


Figura 14: Gráfica corriente de suministro por amplificador VS voltaje de suministro.

Dicha gráfica resulta interesante salvo que la medida de corriente resulta muy pequeña, no alcanza el valor de miliamperios que, finalmente, es lo que se mide. Esto puede deberse a la no existencia de carga a la salida (NO LOAD) y, por tanto, de corriente en la salida. En nuestro caso sí que habría una corriente en la salida y es apreciable.

Es por eso que no se podría realizar un claro análisis del consumo real y teórico del amplificador operacional.

13.1. Selección y consumo del amplificador operacional

Para la selección del amplificador operacional, se empezó por la página que se ha utilizado en todo el proyecto, “mouser.com” donde contiene una sección personalizada de búsqueda de componentes pudiendo escoger ciertos parámetros según las preferencias que se necesitan. Los amplificadores operacionales que aparecieron seleccionando todos rangos posibles de los diferentes parámetros no se encontraban en el software LTspice, por lo que se tuvo que hacer una selección de los que ya existían en dicho software.

Se optó por un AO que, a la hora de la simulación, los resultados no eran los esperados. Más tarde nos dimos cuenta de la importancia de un parámetro que hasta entonces no se le prestaba la atención que tenía, era la corriente de salida por canal, (es decir, la corriente que pasaba por el AO) la cual se calcula con el voltaje de la propia fuente de alimentación, 3.3V y una de las resistencias que es de 200 ohmios. Así pues, lo que pasaba era que dicha corriente tenía un valor muy por debajo de los 16.5mA ($3.3V/200\Omega$), por lo que el alto valor de las resistencias en comparación con la baja corriente hacía que los resultados no fueran correctos. La salida del amplificador, V_o , y el voltaje del AO, V_- , también se veían distorsionados. Una solución era incrementar el valor de las resistencias, lo que hacía que se necesitara un valor menor de corriente y, por tanto, los parámetros tomaban valores normales, pero ya no se estaría en el caso más desfavorable (cambio de las resistencias).

Por lo que se pasó a realizar otra búsqueda intensiva fijándose en ese parámetro también.

Una vez encontrado el componente que, tras las mediciones en la simulación, los resultados tengan sentido, se miden las intensidades que pasan por ambas fuentes de alimentación y, compararlas con la que aparece en la hoja de características para, calcular el consumo y comprobar si existe algún pequeño error entre ambos valores. Se ha llegado a la conclusión de que los valores del consumo obtenidos a partir de la simulación distan, en gran medida, de los que aparecen en las hojas de características, siendo una posible razón la diferencia en las condiciones de utilización. Así pues, en este caso y con nuestras condiciones de uso, no sería posible hacer una correcta comparación de consumos a través de la datasheet.

14. Conclusión final

Considerando los objetivos que se habían propuesto para este proyecto, ahora se puede comprobar que han sido cumplidos.

Se han analizado y estudiado ambos sistemas de adquisición y su posterior selección óptima de sus componentes para, finalmente, realizar comparaciones de coste y consumo entre las diferentes alternativas (“BluePill” y “componente a componente”) y opciones de dichos sistemas de adquisición, MUXs y ZPM.

Respecto a la simulación de LTspice, varias aplicaciones para realizar en un futuro y como continuación y mejora serían la de realizar dicha simulación con unos interruptores válidos y que cumplieran con los requisitos necesarios con el objetivo de obtener unos resultados más cercanos a la realidad y que puedan dar conclusiones más específicas.

Otra mejora podría ser la búsqueda de un método para la reducción de las corrientes de alimentación del AO, como por ejemplo con ayuda de etapa de transistores (etapa de simetría complementaria de colector común) a la salida del circuito. Esto permitiría utilizar unas resistencias de menor valor teniendo así más rango de modificaciones, aparte de poder realizar comparaciones con las gráficas que aparecen en la datasheet y obtener una comparación del consumo real y teórico del AO.

Pienso que ha sido un trabajo un poco diferente a lo que usualmente se suele hacer, pero del que, de todas formas, se han obtenido conclusiones muy interesantes y útiles y que, además, deja las puertas abiertas para seguir estudiándolo y ampliándolo más profundamente.

15. Referencias

ⁱ J. Martinez-Cesteros et al., *A Velostat-Based Pressure-Sensitive Mat for Center-of-Pressure Measurements: A Preliminary Study*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021/1, 18(11).

ⁱⁱ J.A: Hidalgo-López et al., *A Proposal to Eliminate the Impact of Crosstalk on Resistive Sensor Array Readouts*, *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(22), pp: 13461-13470