



Capítulo 5

Pasos hasta la solución final

5.1.- Sensores

5.1.1.- Modelo analítico equivalente del transceptor

5.1.2.- Transceptores piezoeléctricos comerciales

5.1.2.1.- Prowave 400ST/R160

5.1.2.2.- muRata MA40MC10-1B

5.1.2.3.- muRata MA40E7R/S

5.1.3.- Razones que llevaron a la elección del 400EP250

5.1.4.- Resultados experimentales del transceptor escogido

5.2.- Amplificadores

5.2.1.- Características buscadas

5.2.2.- Razonamiento de la solución escogida

5.2.2.1.- Etapa de amplificación

5.2.2.2.- Etapa de comparación

5.3.- Cambios no previstos durante la realización

5.3.1.- Cambio de base

5.3.2.- Adición de más elementos

5.3.2.1.- Multiplexores

5.3.2.2.- Switches

5.1.- Sensores

5.1.1.- Modelo analítico equivalente del transceptor

En un primer momento se tuvo que estudiar el comportamiento de un transceptor de ultrasonidos. El circuito equivalente de un transductor piezoeléctrico de ultrasonidos es similar al de un cristal, y está compuesto por una rama serie RLC en paralelo con una capacidad. Los valores de los distintos elementos vienen dados por las siguientes expresiones:

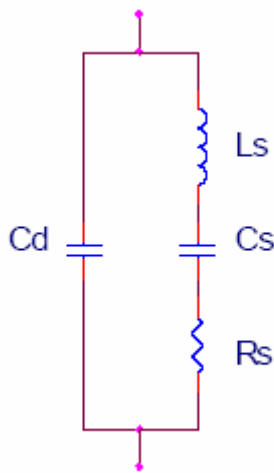


Ilustración 39: Modelo analítico del transceptor

C_d **Capacidad de fijación:** se mide a una frecuencia lejana a la frecuencia de resonancia, aproximadamente la capacidad estática

L_s **Inductor equivalente:** $L_s = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 C_s}$

C_s **Capacidad equivalente:** $C_s = C_d * [(f_p^2 / f_s^2) - 1]$

R_s Parte real de la impedancia a la frecuencia de resonancia

Los valores de f_s y f_p se corresponden con los valores de las frecuencias de resonancia de la rama serie y del paralelo, que son los siguientes:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \frac{C_s \cdot C_d}{C_s + C_d}}}$$

Como se puede ver en el artículo *Equivalent Circuit of Piezo Ceramic Ultrasonic Transducers* (publicado por **Pro-Wave Electronics Corp.** en agosto de 2005 como resultados del modelo de transductor 400ER250) se llega al resultado que se expone a continuación.

Es fácil de comprobar como la frecuencia central se modifica variando el valor del producto $L_S C_S$. Con su valor apropiado para el caso se obtiene lo siguiente, gráfica en este caso obtenida usando Matlab.

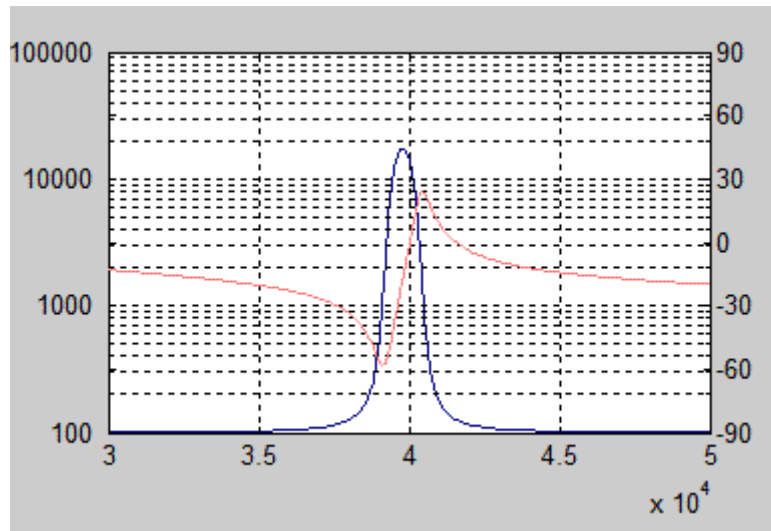


Ilustración 40: Resultado para un transceptor de 40 KHz

En la gráfica se muestra, de rojo, el valor de la impedancia a las distintas frecuencias, y en azul, la fase. Es un comportamiento muy parecido al que propone el artículo, y se ha obtenido el resultado buscado.

La idea de este apartado es conocer el funcionamiento de este tipo de sensores y como se ha visto este funcionamiento tiene mucha analogía al de un circuito RLC y por eso se utiliza este símil para su estudio.

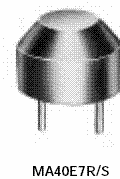
5.1.2.- Transceptores piezoeléctricos comerciales

En un comienzo se contaba con los siguientes transductores para realizar las primeras pruebas de transmisión y recepción, todos ellos con una frecuencia nominal de funcionamiento de 40 KHz:

1. **muRata MA40MC10-1B**: sensor ‘water proof’ (impermeable), dual, sensibilidad de -86dB, presenta una capacidad de 2400pF y una directividad de 100°.



2. **muRata MA40E7R/S**: sensor que actúa como receptor (R) o transmisor (S) (también los hay duales) con una sensibilidad de -74dB, capacidad de entrada de 2200pF y directividad de 100°.



3. **Prowave 400ST/R160**: sensor de tipo abierto, receptor (R) o transmisor (T), con una sensibilidad de -65dB, capacidad de entrada de 2400pF y una directividad de 55°. No puede ser usado en el diseño final ya que no es impermeable.



Estos fueron los primeros sensores con los que se podía comenzar el estudio y las pruebas. El último de ellos, estaba descartado de antemano para el diseño final, ya que una de las características que se buscaba era que fuera resistente al agua (‘water proof’), y este no lo es. Se uso para realizar las primeras pruebas y esperar mejores resultados, ya que contaba con un valor de sensibilidad mucho mejor que los otros dos. Este aspecto se vio reflejado después durante la realización de los primeros experimentos de transmisión recepción.

Al sensor escogido se le enviarán pulsos con frecuencia de 40KHz, frecuencia para la que están diseñados (es la frecuencia a la que resuenan) y a una distancia a la que se pueda medir correctamente se colocará el receptor. La señal recibida sufrirá el proceso de amplificación descrito posteriormente, para así llegar a producir una interrupción en el PIC que detenga el contador que mide el tiempo entre la transmisión y la recepción de dicha interrupción.

Ya sabemos que los sensores deben ser **resistentes al agua** y deben ser **duales**, ya que deberán realizar funciones tanto de transmisión como de recepción. Además de esto, se buscarán las siguientes características:

- **Mayor sensibilidad posible:** a mayor sensibilidad, recibirá mejor y será necesaria una menor amplificación
- **Mayor directividad posible:** como transmisor y receptor estarán completamente alineados, una mayor directividad ayudará también a tener una sensibilidad mejor

Para establecer una primera comparación, se monta el siguiente esquema, donde el amplificador usado es el INA217 (por su facilidad para pruebas, ya que se encuentra en formato DIP), se busca una resistencia R_G con la que se ofrece una ganancia de 1000, y así se puede establecer una primera prueba que enfrente a los distintos dispositivos. Se montará el esquema de la figura para la recepción.

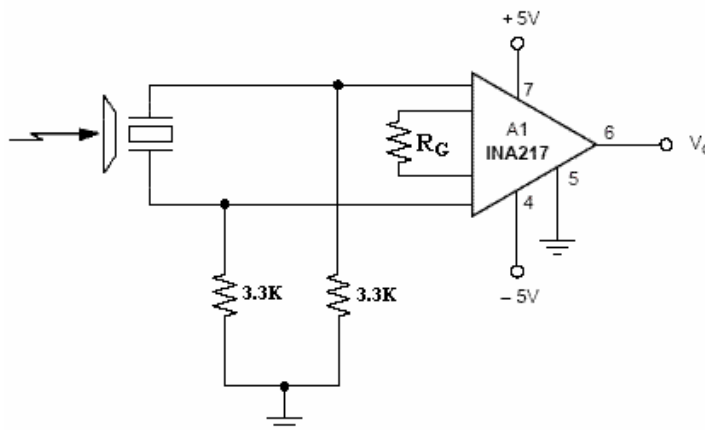


Ilustración 41: Montaje para la comparación de los sensores

El valor de las resistencias que están entre las patas del sensor y tierra fue probado para obtener el mejor resultado posible. Para valores menores, se tenía una respuesta mucho menos estable, ya que a menor valor necesita una mayor cantidad de intensidad para responder a lo que le llega desde el sensor. Para valores algo mayores, el resultado no variaba demasiado, y se escogió este valor por similitud al que expone en su interior el catálogo *Piezoelectric Ceramic Sensors (PIEZOTITE)* y por disponibilidad en ese momento.

Una cosa a apuntar es que los pulsos que se dan como entrada al sensor de transmisión pueden tener un voltaje distinto a las tensiones del PIC para así producir una señal más fuerte y más notoria en recepción. Esto conllevaría un circuito de adaptación que consiga adaptar las tensiones de 0-5V a otras más elevadas.

Existen además otros factores que pueden llevar a una mejor recepción, pero que tienen algún tipo de característica en su contra. En la siguiente tabla se intentan exponer posibles causas de una recepción mejor, y explicaciones de porqué se tratará de evitar su utilización en el diseño a menos que sea inevitable:

Mejor respuesta si... Sensor abierto	En contra... No resistente al agua. Una condición necesaria es que debe ser impermeable y soportar las condiciones atmosféricas a la intemperie, lo que hace inviable su utilización en el diseño final. Se utilizarán solo para pruebas.
Mayor número de pulsos	El transductor transmisor estará recibiendo más ciclos de excitación, y enviará señal durante más tiempo, por lo cual se recibirá también durante un mayor periodo. Además se tendrá un 'tiempo de persistencia' de las oscilaciones o de 'ringing' de mayor longitud. Ese tiempo residual en recepción no interesa y será negativo en cuanto a cuestiones de velocidad.
Pulsos de mayor nivel de tensión	Para generar esos pulsos será necesario un circuito adicional que transforme las tensiones del PIC (0-5V) a esos valores de mayor voltaje. Se necesitará también tener una tensión superior en placa.
Menos distancia entre transmisor y receptor	La medición resultante será menos precisa ya que el viento ayudara/se enfrentará a las ondas durante menos espacio y puede notarse menos su presencia.

A continuación se van a definir las causas de la no utilización de cada uno de los tres sensores expuestos anteriormente, y el porqué de desestimar su utilización en un diseño final. Se realizará una comparación con el transceptor escogido para evaluar las causas de su no elección.

5.1.2.1.- Prowave 400ST/R160

Como se dijo antes, se trata de un sensor de tipo abierto, y la resistencia al agua es una de las cualidades esenciales que debe tener el transceptor escogido. Pero entre las primeras pruebas que se hicieron fue tenido en cuenta, ya que servía para probar esquemas de amplificación con un sensor que se sabía que tenía un buen nivel de recepción. Como ejemplo de esas pruebas, con el esquema de amplificación de prueba, se tiene la siguiente figura, donde se ve tras amplificar por 1000:

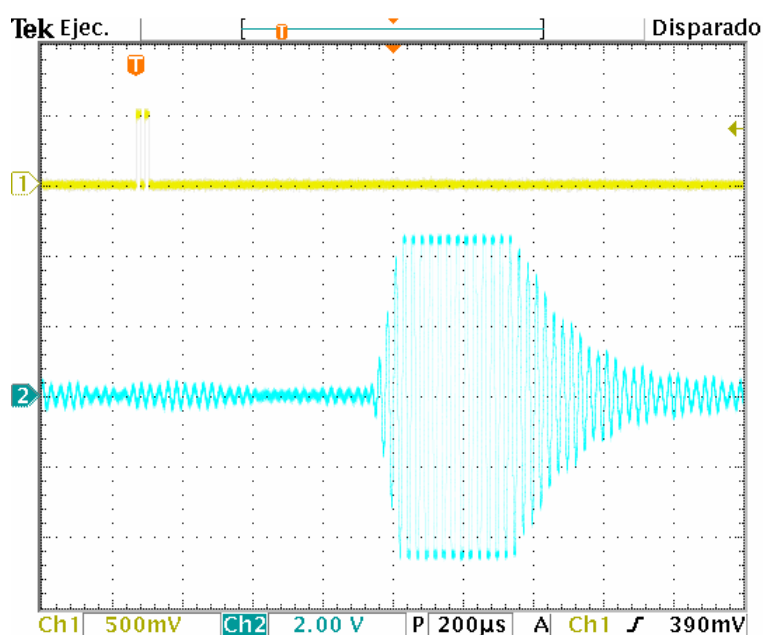


Ilustración 42: Resultado para el 400ST/R160

En este caso la amplificación ya llega a saturar y ofrece márgenes de algo más de 1V donde después se podría realizar la comparación. Sería una buena señal resultado de la amplificación, ya que alcanza niveles altos y además el resto del tiempo se mantiene en niveles muy bajos. Pero ya sabíamos de antemano que estaba desestimado su uso por tratarse de un sensor abierto, por lo cual se debían estudiar otros transceptores.

5.1.2.2.- muRata MA40MC10-1B

En este caso si se trata de un sensor ‘water proof’ (impermeable), aunque presenta una sensibilidad muy baja (-86dB), lo cual hace que las señales que se reciben

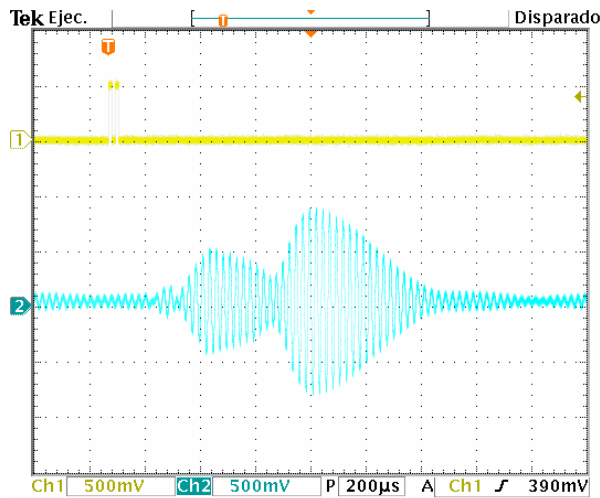


Ilustración 43: Resultado para el MA40MC10-1B

sean de muy pequeña amplitud. En la siguiente figura se observa la señal tras su amplificación con el esquema explicado antes, es decir, con una ganancia de 1000 usando el amplificador de Texas Instruments INA217, y se ve claramente como la señal resultado tiene unos valores muy pequeños y que traerían problemas en un segundo paso de comparación.

Los dos problemas que se tienen, a la vista de los resultados y de la gráfica, son:

- **Valores pequeños de la señal tras amplificar** → esto no permite fijar un nivel claro de referencia para la posterior comparación. Hay que intentar tener un rango amplio en el que realizar la comparación, dejando unos márgenes de seguridad entre la referencia y el lóbulo anterior y posterior para tener así una comparación clara. Necesitaría mucha más amplificación antes de poder fijar un nivel con suficientes garantías.

- **Aparece un lóbulo antes de que llegue la verdadera señal** → la recepción que se espera es precedida de un lóbulo indeseado que puede llevar a errores. Más tarde se vería que este lóbulo puede venir dado por una transmisión entre los sensores por el material que los une. Parte de las ondas viajarían a través de los elementos que sujetan y alinean los sensores, a mayor velocidad que por el aire, llegando antes al sensor final y produciendo esa ‘recepción fantasma’.

5.1.2.3.- muRata MA40E7R/S

Ahora se trata de un transceptor que se contaba con el como receptor (R) o transmisor (S), aunque se podría haber llegado a tener el sensor dual. En este caso tenía una sensibilidad mayor que el anterior (-74dB), por lo que se esperaba una mejor respuesta y de mayor amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura, y se confirma que si se obtenían unas amplitudes mayores.

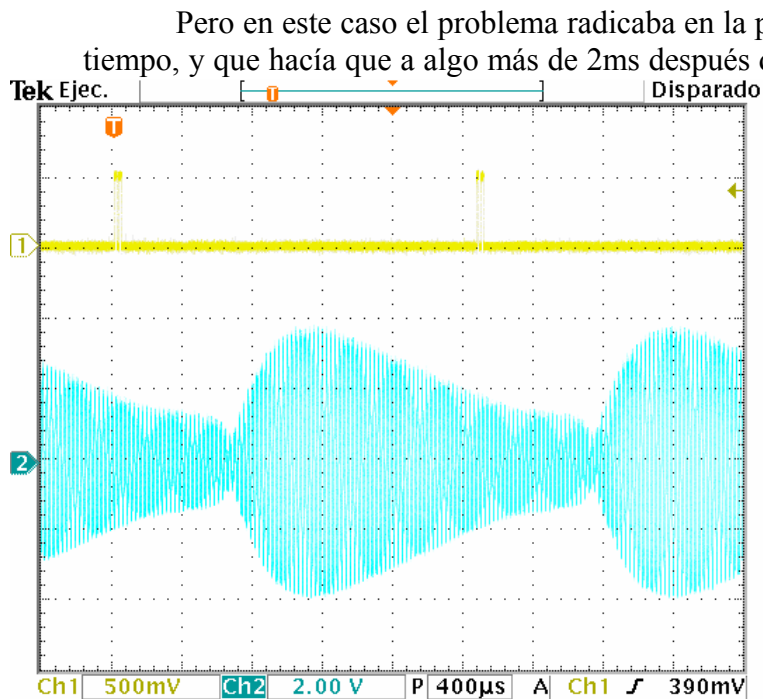
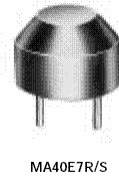


Ilustración 44: Resultado para el MA40E7R/S

señales enviadas todavía no se habían atenuado las oscilaciones y por tanto no era conveniente intentar recibir de nuevo. Esto traería consigo limitaciones en las velocidades de muestreo ya que antes de volver a muestrear había que asegurarse de que las oscilaciones anteriores habían desaparecido (o se habían atenuado lo suficiente). Por tanto, esta persistencia en el 'ringing' de la señal fue el motivo por el que se negó su uso.

5.1.3.- Razones que llevaron a la elección del 400EP250

Este transceptor fue escogido porque cumplía con las características que en los otros tres casos descartaban al sensor para su uso:

Sensor	Descartado por...	¿Porqué el 400EP250 si?
Prowave 400ST/R160	Este es el sensor que tenía mejor resultado, pero tenía en su contra que no era admisible su utilización en el diseño final ya que se trata de un transceptor abierto, y por lo tanto no cumple con la característica fundamental que es la resistencia al agua.	Se trata de un sensor 'water proof', característica fundamental.
muRata MA40MC10-1B	En este caso, el problema era que la señal tras ser amplificada presentaba unos valores muy pequeños, por lo que necesitaba una amplificación con un valor de ganancia demasiado elevado. Señal de esto era la baja sensibilidad que tiene este sensor (-86dB), además de la baja directividad (100°).	Desde las primeras pruebas los resultados eran bastante mejores, llegando a alcanzar valores de amplitud muy aceptables. Su sensibilidad en recepción era bastante mejor (-72dB). También es mucho más direccional (sólo 30° para el ángulo de -6dB).
muRata MA40E7R/S	A pesar de tener unos buenos resultados en amplitud, la señal en recepción tenía una persistencia en las oscilaciones o 'ringing' que provocaría limitaciones en la velocidad de muestreo.	Una de las características que el fabricante ofrecía es su pequeño tiempo de oscilación, del que da un valor máximo de 1.2ms. También se obtuvieron en el laboratorio mejores resultados en este sentido.

5.1.4.- Resultados experimentales del transceptor escogido 400EP250

Como cabía esperar, las primeras pruebas de los sensores en el laboratorio ya hacían ver que los resultados superaban a los anteriores sensores como en un principio se podía suponer viendo los datos que el fabricante facilitaba. No obstante, para establecer una comparación válida con los anteriores transceptores, se montó el mismo circuito de amplificación, en el que al INA217 se le dota de una ganancia de 1000. Se volvieron a enviar dos pulsos de frecuencia 40 KHz, obteniéndose el resultado que se muestra en la figura anterior, donde destacan dos cosas:

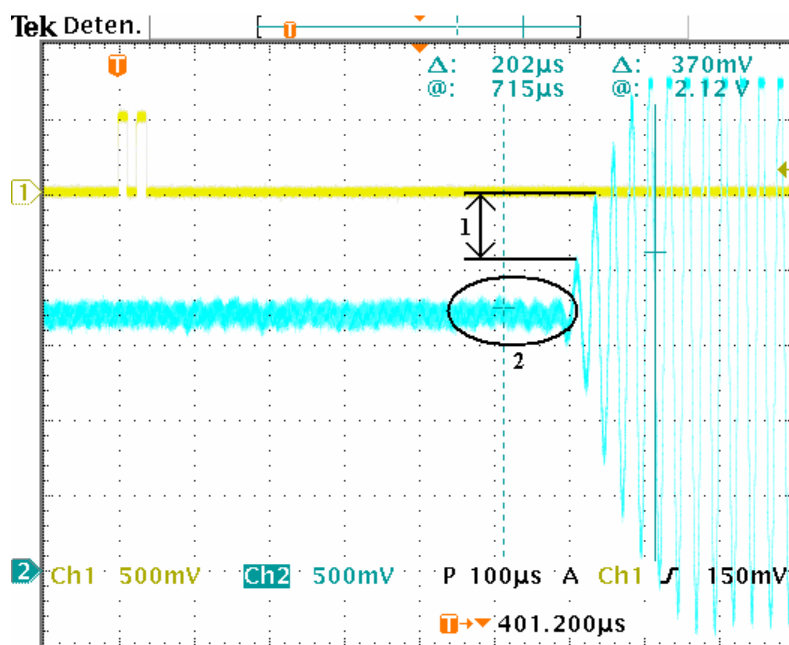


Ilustración 45: Razones para la elección del 400EP250

1.- En la gráfica se puede ver como se obtienen unos valores de amplitud que ya si pueden dar un rango amplio donde realizar la comparación (hay una zona de aproximadamente 500mV entre el primer y el segundo máximo de señal), como no ocurría en el caso del transductor anterior **MA40MC10-1B**. Estos resultados se obtenían con una ganancia de 1000, por lo que si se aumentaba aún más se podía suponer un mejor resultado incluso.

2.- Justo antes de comenzarse la recepción de unos pulsos, la señal se encuentra ya estable, habiendo desaparecido ya el ringing o persistencia en las oscilaciones que presentaba el sensor piezoeléctrico **muRata MA40E7R/S**.

5.2.- Amplificadores

Como vimos en un principio, en la parte de acondicionamiento de señal se quería llegar a lo siguiente:

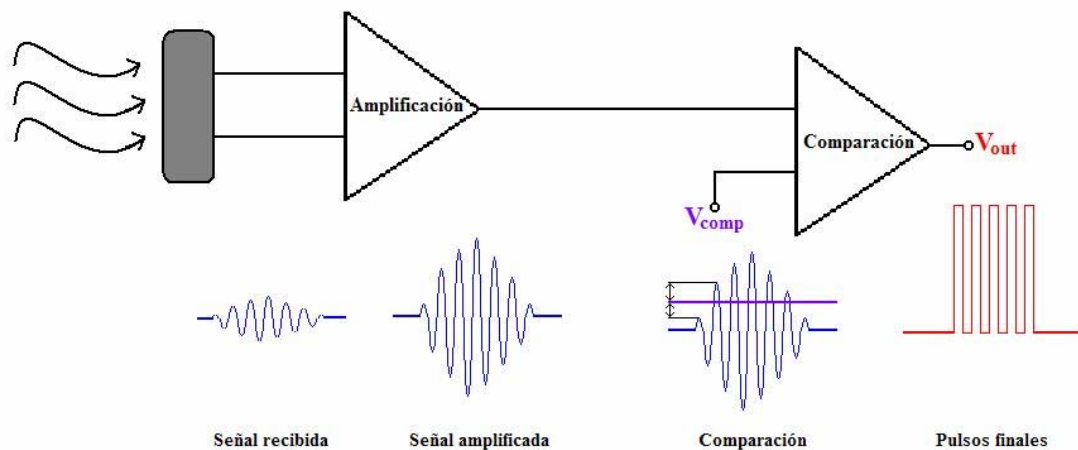


Ilustración 46: Acondicionamiento de señal para el PIC

En la figura se distinguen claramente los dos bloques de los que se compone esta etapa de acondicionamiento, es decir, el bloque que realiza la amplificación de las recepciones del transceptor y el bloque que realiza una comparación con un nivel constante. Cada uno de ellos pedirá distintas condiciones a los elementos que vayan a tratar la señal:

- El primer bloque realiza una amplificación de la señal que proviene del sensor. Su objetivo es dar a su salida una señal lo suficientemente clara y constante para realizar una comparación con un valor de referencia fijo.
- El segundo bloque realiza una comparación, por lo cual deberá ser un amplificador con un gran producto ganancia-ancho de banda, ya que se pide que responda saturando cuando tenga una diferencia entre sus entradas que puede no ser demasiado grande.

En las siguientes tablas se describen características **deseables** en una y otra etapa, que serán las principales cualidades que se han ido buscando durante el diseño:

5.2.1.- Características buscadas

En las siguientes tablas se exponen las características deseadas para cada bloque, las cuales fueron perseguidas desde un primer momento.

Etapas de amplificación	
Producto GBW alto	Debe ofrecer una alta ganancia a los 40KHz debido a que debe amplificar una señal de amplitud muy pequeña
Amplificador diferencial de instrumentación	Para el caso de sensores piezoeléctricos, los amplificadores diferenciales ofrecen un buen funcionamiento, ya que están diseñados para amplificar la diferencia entre sus entradas. Son el tipo de amplificador ideal para este tipo de transductores.
Ganancia ajustable	Como no se conoce en principio el valor de ganancia que se va a necesitar, es bueno que se pueda ajustar en función de lo que se vaya observando.
Rangos de alimentación	En un principio parecía que la alimentación iba a ser del tipo ' <i>single supply</i> ', es decir, entre 0 y V _{dd} voltios. Una vez comenzado el proyecto se conoció la noticia de que se podría tener también una tensión negativa de -5V, y sería tenido en cuenta por si fuese necesario.
Nivel de referencia para la salida	Puede ser necesario que la salida tenga un modo común distinto de 0V, por lo que será bueno que el amplificador ofrezca una tensión de referencia para dar su salida.

Etapas de comparación	
Alta Ganancia	Para realizar la comparación se debe contar con un comparador con buena respuesta o con un amplificador que ofrezca una alta ganancia.
Salida entre 0-5V	Se pretende que la salida de la comparación actúe directamente sobre el modulo CCP del PIC para que detecte el primer flanco. Para ello, es requisito fundamental que la salida se ajuste perfectamente a los niveles que usa el PIC.
Salida rail-to-rail	Como se ha dicho en el punto anterior, nos debemos ajustar a los niveles del PIC. Por ello, esta segunda etapa debe ofrecer a su salida el rango completo de tensiones del PIC, es decir, las saturaciones se deben producir a los mismos niveles de alimentación. Por ello, se buscará un amplificador alimentado a estos niveles y que ofrezca su salida rail-to-rail.

5.2.2.- Razonamiento de la solución escogida

5.2.2.1.- Etapa de amplificación

En un primer momento una restricción en el proyecto era que no se iban a poder usar tensiones negativas, por lo que se debían usar dispositivos ‘*single supply*’, con alimentación entre la V_{DD} escogida y tierra. Esto limitaba mucho, ya que en un principio los amplificadores que mejor parecían adaptarse a lo que se buscaba tenían alimentación bipolar. Una vez en curso el proyecto se conoció que también se podía usar una tensión de -5V, lo cual, como se verá, facilitaría la amplificación de la señal del sensor. La diferencia está en el valor de ganancia que los amplificadores son capaces de dar.

Si no se contara con esa tensión negativa, de los amplificadores conseguidos para las pruebas el que mejor funciona es el INA331, ya que se trata de un amplificador diferencial y funciona mejor que los operacionales para este tipo de señales.

En la figura se ve en azul la salida cuando en la amplificación se usa el INA331, y se observa que el margen para la comparación es muy pequeño, no llegando siquiera a los 200mV. Este margen tan pequeño provocará una salida muy poco estable (como se verá después), y con ella unos resultados poco precisos debido a esta inestabilidad. Se necesita, por tanto, un margen mayor para que la salida sea lo más estable posible y para tener más seguridad en los resultados.

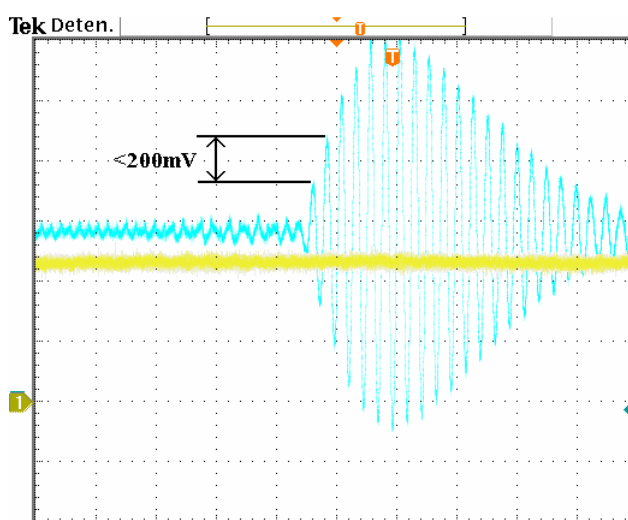


Ilustración 47: Amplificación con INA331

Esto se consiguió al conocer que se podía usar la tensión de -5V, por lo cual se podía usar un amplificador alimentado entre $\pm 5V$ y que contara con una ganancia mayor.

La mejora en los resultados se puede ver en las siguientes figuras, donde primero con el INA217, con ganancia de 1000, y luego con el INA166, con una ganancia que puede ser mayor de 2000 (en este caso, así como en el diseño final, ganancia de 2500).

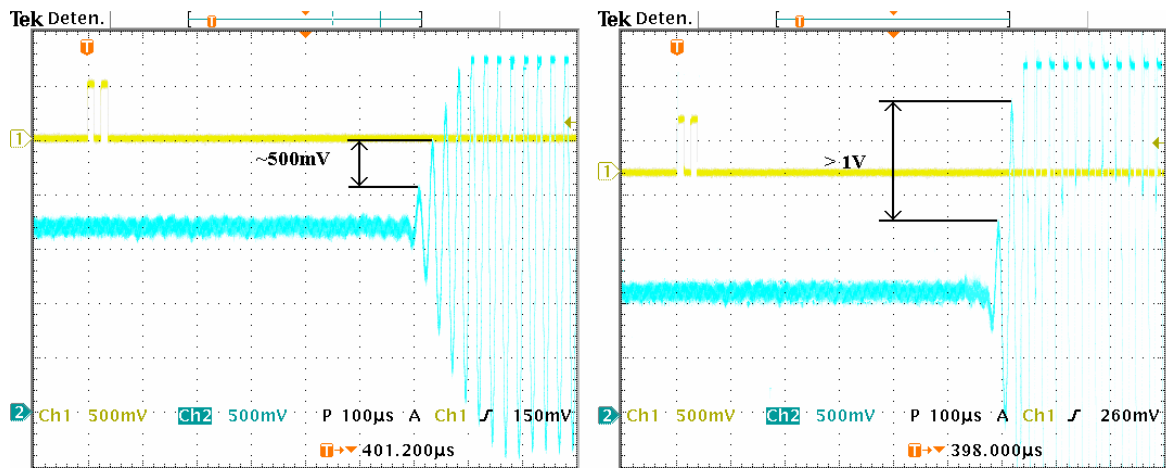


Ilustración 48: Amplificación con INA217 y con INA166

Se observa como conforme ha aumentado la ganancia el margen se ha hecho mayor también, por lo cual parece que es recomendable usar el INA166 y así aprovechar que se pueden crear mayores distancias al nivel de comparación. Esto debe traer una mayor precisión en la comparación que se realiza a continuación, y con ello, una mayor exactitud en los resultados.

Por estas razones, la primera idea es intentar usar el amplificador que más ganancia tenga para así tener el mayor margen posible. Esto se hará siempre que se pueda, ya que al introducir otros elementos (multiplexores, switches...) puede que el funcionamiento cambie y no sea tan bueno.

5.2.2.2.- Etapa de comparación

Para realizar una buena comparación se necesitan principalmente tres factores:

- Señal lo suficientemente clara procedente de la etapa de amplificación, con buenos márgenes para afrontar la comparación
- Alto producto-ancho de banda del amplificador, para tener la mayor rapidez posible
- Adaptación a los valores del PIC

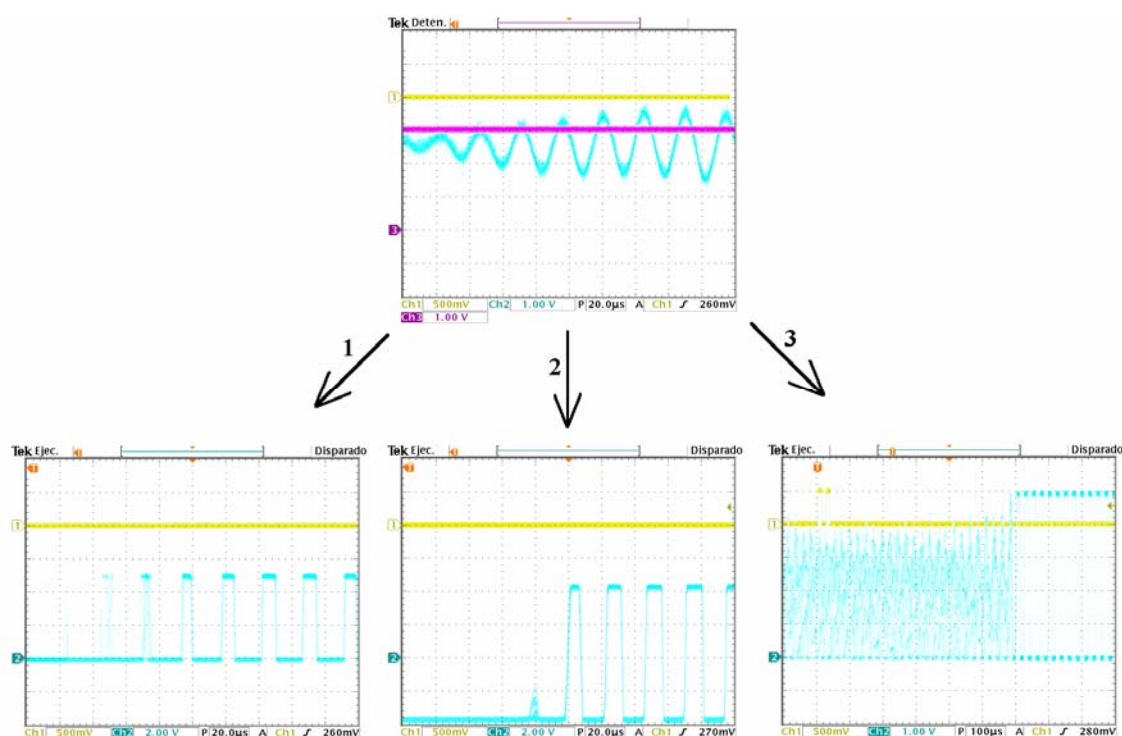


Ilustración 49: Resultado de una mala señal de entrada a la comparación

La primera de las condiciones viene dada por la etapa de amplificación, y se ha descrito anteriormente. Si no se llega a cumplir esta condición, se puede llegar a resultados poco claros:

Como se ve en la figura de arriba, una amplificación insuficiente o poco clara hace que la señal resultante del primer bloque no ofrezca unos altos márgenes para realizar la comparación con la señal de referencia, lo que puede conducir a varios tipos de errores.

El primero de ellos (casos 1 y 2) podría ser que tras la comparación no sea estable el primer ciclo de saturación, y ésta se produjese alternándose aleatoriamente entre distintos ciclos. Entonces la primera interrupción estaría provocada por un ciclo

indeterminado, con lo que los tiempos se tomarían en instantes distintos, y por lo cual no podría darse un valor bueno como resultado.

Otra causa de malos resultados es que si la señal de referencia no se separa lo suficiente del modo común de la señal amplificada, el ruido que esta lleve puede hacerse muy notorio. En el caso 3 exhibido en la figura anterior, aparece el resultado de tener una referencia muy cercana a ese modo común. Por eso, siempre será mejor no utilizar el primer ciclo que se tiene en recepción sino esperar a que la señal crezca, y ese tiempo residual tenerlo después en cuenta para hacer correcta la medida.

Se ve por tanto que si no se ofrece un buen margen pueden aparecer/desaparecer ciclos previstos, por lo cual el primer flanco, que es el que provocaría la interrupción, podría llegar antes o después de una forma incontrolada e imprevista.

La segunda de las condiciones que se dijeron al comienzo era que se tratará de buscar un amplificador lo más rápido posible, para que cuando la señal atraviese la referencia sea capaz de conmutar su salida a nivel alto rápidamente, sin necesidad de que la diferencia con esa referencia tenga que ser muy grande. Esto haría una buena detección de los instantes de tiempo en donde esa referencia es superada o queda por debajo.

Para terminar, es importante que su salida se ofrezca a 0 ó a 5 voltios, es decir, que se trate de un amplificador rail-to-rail y que funcione a esas mismas tensiones que el PIC. De esta manera ya se consigue una adaptación total, y no hace falta nada más para que el PIC sea capaz de darse cuenta de que ha ocurrido un flanco en la señal. Es fácil darse cuenta de que esto no ocurriría en el caso de la figura anterior, donde se tiene el resultado de realizar la comparación usando un amplificador alimentado a $\pm 5V$. Puede

verse también que este amplificador no es rail-to-rail ya que en los instantes de saturación no alcanza los valores de +5 ó -5 voltios, sino que las saturaciones se quedan en algo más de 3V la positiva y aproximadamente -4V la negativa.

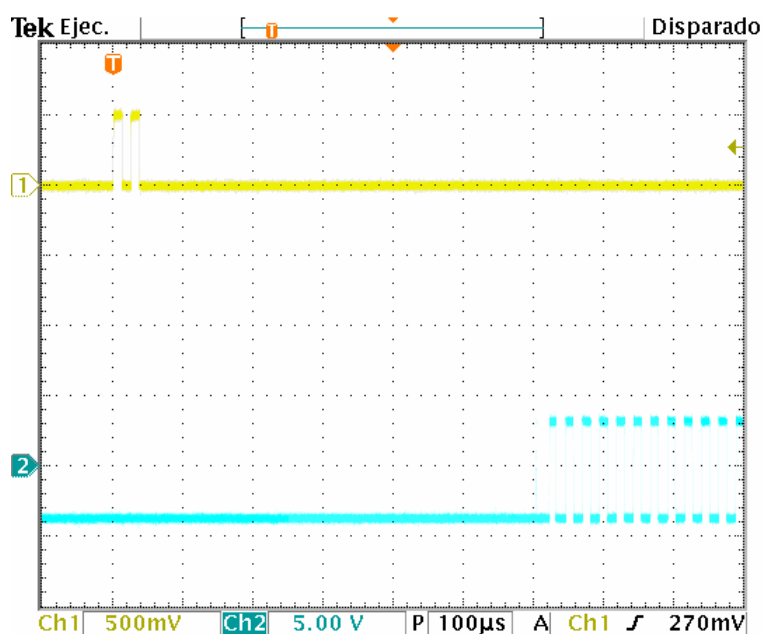


Ilustración 50: Salida no rail-to-rail

5.3.- Cambios no previstos durante la realización

Tras las primeras pruebas ya satisfactorias, que modelaban un único sentido de una de las dos direcciones, se va a pasar a ver como se comporta cuando se intente modelar el comportamiento completo, y ver también como afectará la inclusión de un nuevo elemento que se precisa como es el multiplexor.

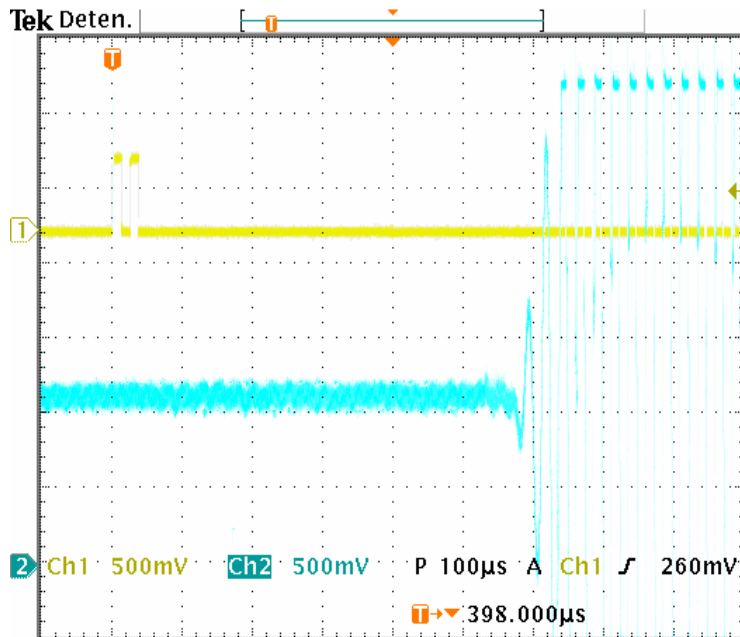


Ilustración 51: Resultados iniciales

repetitiva como resultado, que es lo que se buscaba. La recepción es muy constante antes de recibir la señal y después ésta se va incrementando de manera limpia sin ser incluida ninguna otra señal ni ninguna componente de ruido que la distorsione y que la haga inestable.

Para la realización completa se necesitaba crear una base común para los cuatro transmisores/receptores. Se montó un tablero de madera que ejercería como base para el conjunto de los cuatro sensores, sobre la cual permanecerían enfrentados dos a dos y en direcciones perpendiculares. De esta forma se podría dar la cobertura deseada.

Pero desde este momento comenzaron a aparecer distintos problemas que afectaban al funcionamiento y que requerían cambios para que el funcionamiento no cambiara. Estos problemas, sus causas y sus soluciones se van a debatir en los siguientes puntos:

En la figura se puede observar el resultado que se obtenía tras las primeras pruebas, donde tras un tiempo después de dar los dos pulsos se comenzaba a recibir la señal, la cual iba incrementando su amplitud hasta llegar incluso a saturar esta primera amplificación. Lo importante de estos resultados es que se obtenía una señal muy clara y muy

5.3.1.- Cambio de base

El primer problema que apareció fue el siguiente. Comprobando en la nueva base de madera el mismo montaje que anteriormente había funcionado correctamente, la señal que antes se obtenía aparecía ahora junto con otra onda que se añadía, de menor frecuencia a los 40KHz (en torno a los 8KHz). Esta onda se incrementaba de amplitud

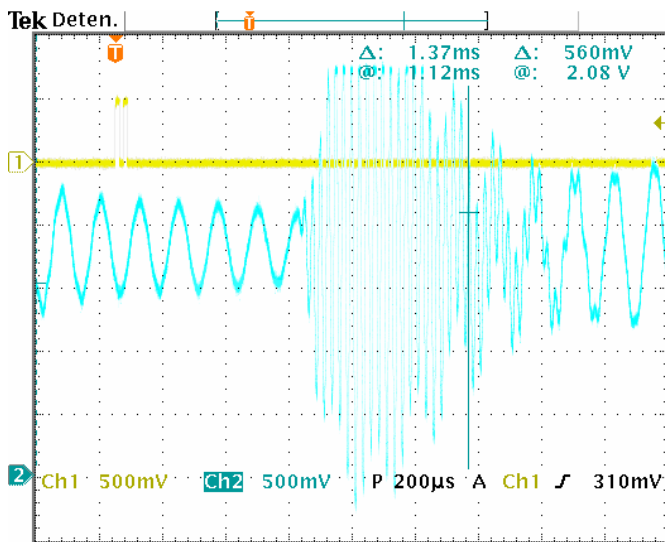


Ilustración 52: Problema al cambiar la base

cada vez que se producía una interrupción (una recepción), y después se iba decrementando poco a poco, no llegando a anularse en el momento del comienzo de la recepción (para una distancia entre distintas recepciones de unos 2ms). Por esta razón afectaría a la señal recibida en el momento de dar la interrupción.

El problema parece provenir del cambio de base, ya que aparece en el momento en que se ha realizado este cambio.

Al probarla de nuevo en el



Ilustración 53: Causa probable del problema

montaje anterior se obtienen los mismos buenos resultados que antes, por lo que parece que el problema ha venido por el cambio.

Como se ha intentado mostrar en la figura, el cambio de base afectaba de tal forma que parte de la señal que se quería transmitir al iniciar con los pulsos se transmitía por el contacto que se tiene por los codos/tablero. Antes la base que proporcionaba buenos resultados era una pletina metálica sobre la cual se sostenían los dos sensores, y con ella ninguna señal más se añadía a lo deseado. Entonces llegó el momento de buscar un material para la base que sea lo más aislante acústico posible y que evite estos malos resultados.

Aislar supone impedir que un sonido penetre en un medio, o que salga de él; por ello, la función de los materiales aislantes, dependiendo de donde estén, puede ser o

bien, reflejar la mayor parte de la energía que reciben (en el exterior), o bien, por el contrario, absorberla.

A pesar de ello, hay que diferenciar entre aislamiento acústico y absorción acústica:

- El **aislamiento acústico** permite proporcionar una protección al recinto contra la penetración del ruido, al tiempo, que evita que el sonido salga hacia el exterior.
- En cambio, **la absorción acústica**, lo que pretende es mejorar la propia acústica de un recinto, controlando el tiempo de reverberación, etc.

No se puede decir que existan aislantes acústicos específicos, como existen aislantes térmicos que si lo son. La capacidad de **aislamiento acústico** de un determinado elemento constructivo, fabricado con uno o más materiales, es su capacidad de atenuar el sonido que lo atraviesa. La atenuación o pérdida de transmisión sonora de un determinado material se define como la diferencia entre la potencia acústica incidente y el nivel de potencia acústica que atraviesa el material.

Para conseguir un buen aislamiento acústico son necesarios materiales que sean duros, pesado, no porosos, y, si es posible, flexibles. Es decir, es preferible que los materiales aislantes sean materiales pesados y blandos al mismo tiempo. El plomo es el mejor aislante de todos ya que aísla del sonido y de las vibraciones. Otros materiales aislantes son materiales tales como hormigón, terrazo, acero, etc. que son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser buenos aislantes.

Por tanto lo que iremos buscando será un material que para realizar esa tarea de aislamiento lo que haga es intentar absorber y atenuar la mayor potencia de señal posible que se intente propagar a través de la superficie que en ese caso separe los dos sensores.

En el laboratorio se ha tenido la posibilidad de realizar un montaje sobre una base de corcho blanco, que permitía la colocación de los cuatro

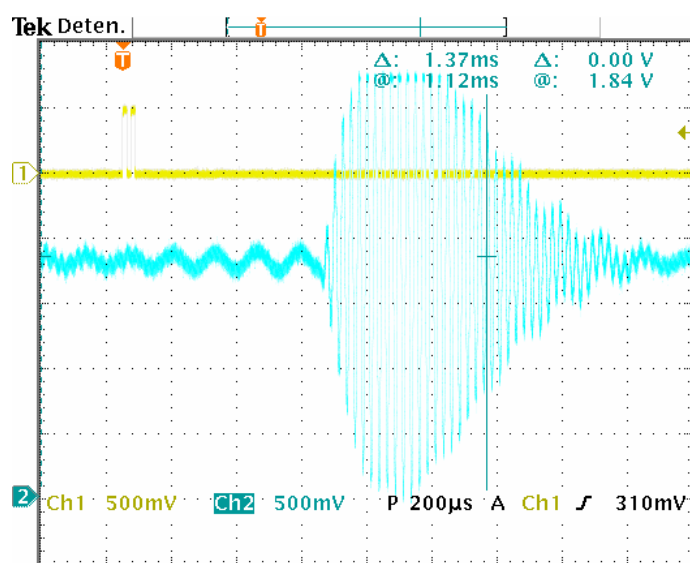


Ilustración 54: Resultados sobre la superficie de corcho

sensores a una distancia de unos 20cm, que es la distancia que en un principio se iba buscando. Con esta nueva base, los resultados obtenidos se observan en la figura anterior, donde se tiene que esa frecuencia aparece mucho más atenuada que antes.

Se comprobó que esta frecuencia no está relacionada con la distancia entre los pulsos ni con el número de pulsos que se transmiten, pero hay dos formas de reducir su amplitud:

- Con el material de la base
- Cortando las oscilaciones al dar la interrupción

La primera de las formas se ha observado en la figura anterior, donde con el cambio madera-corcho se han conseguido mejorar ostensiblemente los resultados. El caso de cortar las oscilaciones se tratará a continuación conjuntamente con la inclusión de nuevos elementos, y se verá como de manera notoria se reduce esta señal hasta el punto de dejar de ser importante. Consiste en no dejar que la señal se siga amplificando tras dar la interrupción, deshabilitando los dispositivos que hay entre el sensor receptor y la cadena de amplificación.

5.3.2.- Adición de más elementos

En un primer momento los resultados obtenidos parecían bastante satisfactorios, pero esos primeros valores se corresponden con un montaje de una sola dirección y de un solo sentido. En el proyecto se quiere realizar la misma medida para los dos sentidos de cada dirección perpendicular (para luego obtener tanto la dirección como el valor de la velocidad). Por ello se hace necesaria la variación de cual es el transductor que emite y cual el que recibe.

Se hace necesaria la inclusión de un elemento que realice esta conmutación, por lo cual se añadieron **multiplexores**, tanto para la parte de transmisión como para la recepción. Estos multiplexores así como su funcionamiento y pruebas son objeto del siguiente apartado:

5.3.2.1.- Multiplexores

El multiplexor escogido para este caso es el multiplexor **CD4052B** de *Texas Instruments*, obtenido como muestra gratuita para el proyecto al igual que los distintos amplificadores. También se probó el multiplexor **ADG609** de *Analog Devices*, aunque con peor resultado, de ahí la elección del primero de ellos.

Este multiplexor consta de cuatro canales que se seleccionan internamente a través de las dos líneas de selección **A** y **B**. Estos canales de entrada-salida se ponen en contacto con la salida-entrada común. De esta forma se puede dar

cobertura, tanto para recepción como para transmisión, a los cuatro transceptores que se usarán. Por tanto, añadiendo solamente un multiplexor que haga esta función en transmisión y otro en recepción se puede realizar la selección del sensor transmisor y del sensor receptor en cada momento.

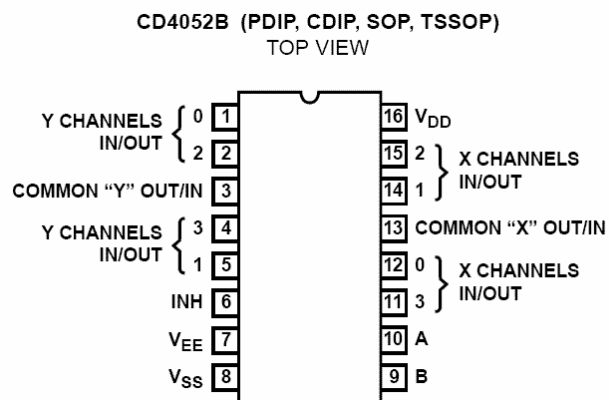


Ilustración 55: Esquema del multiplexor CD4052B

En un primer momento para las pruebas cada uno de los cuatro sensores estaría conectado directamente a una de las entradas del multiplexor, tanto en recepción como en transmisión. Este esquema ofrece la simplicidad del conexionado directo pero el problema que se detalla a continuación.

El problema encontrado tras las pruebas consistía en que **el multiplexor no aísla completamente** sus entradas-salidas. Esto no es demasiado problemático para el caso de los sensores que no intervienen en ese momento, pero si lo es, y de forma muy notoria en el caso de los sensores de la dirección que se está ejecutando en ese momento.

El transceptor transmisor (en el caso de la figura, el número 0) está siendo excitado con los pulsos que el PIC envía, por lo que en una de las salidas (la 0) será la seleccionada del multiplexor de transmisión, y allí tienen esos pulsos de excitación, que es lo que se busca.

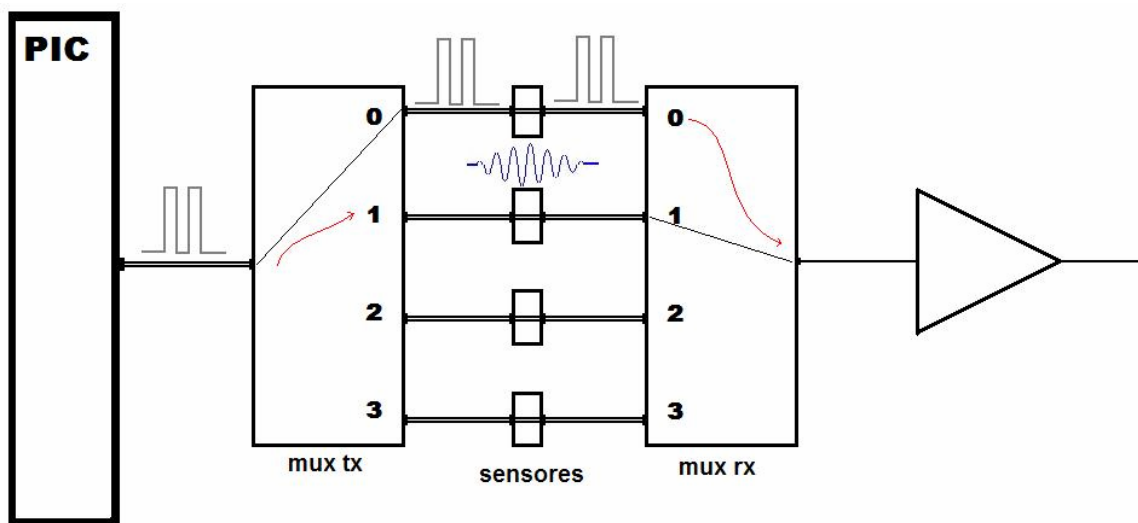


Ilustración 56: Aislamiento incompleto de los multiplexores

Como el multiplexor no aísla completamente sus distintas entradas, en el resto de entradas-salidas esos pulsos están presentes aunque en mucha menor magnitud. Pero este efecto de no aislamiento completo se manifiesta y se sumará desfavorablemente de dos formas, presentes en la figura:

- Aparecerán unos pequeños pulsos (debido al no aislamiento total) en el canal 1 del multiplexor de transmisión, y estos se van a añadir a la señal recibida por el transceptor 1
- Por el segundo multiplexor, también se añadirá una parte correspondiente a que los pulsos de transmisión también están presentes en su canal 0

A pesar de este decremento de magnitud, el problema viene en que justo después se encuentra la etapa de amplificación, de ganancia muy elevada, y que convierte la recepción en lo que se observa en la figura siguiente.

Se ve que desde el momento en que se lanzan los pulsos para transmisión, en recepción se empiezan a obtener, tras amplificación, salidas no deseadas de amplitud muy elevada. Esto provocará saturaciones continuas a la salida de la etapa de comparación, ya que repetidamente se superará el nivel de referencia en la comparación. Además, esa amplitud decrece lentamente por lo que en el comienzo de la recepción de la verdadera señal a recibir todavía no se habrá atenuado lo suficiente para poder distinguirlo claramente.

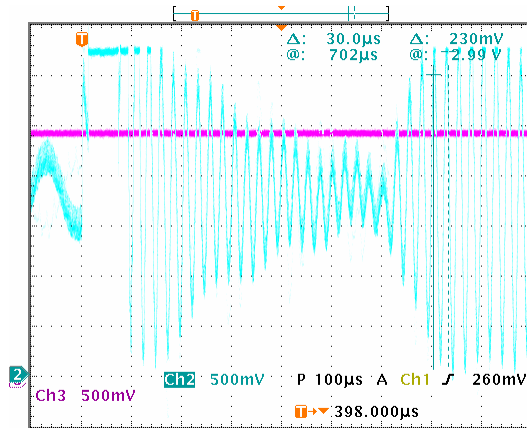


Ilustración 57: Resultado de esa falta de aislamiento

Este efecto para nada deseado puede que además no sea el mismo para todos los canales, ya que entre algunos puede haber más aislamiento que otros, por lo que puede añadirse una desigualdad más a la recepción.

Como el problema viene por el no completo aislamiento entre canales, se continuó añadiendo un elemento que realizará de nuevo esta función en cada canal, para introducir un segundo nivel de aislamiento entre canales. Para ello se introducirá un **switch** antes o después del multiplexor para así tenerlo más aislado con respecto a los otros canales. Este tema y sus resultados se discuten en el siguiente punto.

5.3.2.2.- Switches

Como se ha dicho anteriormente, se necesitaba otro nivel de aislamiento entre canales, para que los pulsos que se quieren transmitir no afecten a la recepción. Esto traía consigo una recepción incierta y no deseada. Se eligió la opción de introducir un nuevo elemento como es el switch que ayudara al multiplexor en la tarea de aislamiento de canales.

Se realizaron diversas pruebas a algunos switches, en concreto al **CD74HCT4066** y el **SN74LVC2G66**, de *Texas Instruments*, con resultados buenos en ambos casos. También se obtuvieron otros switches de *Texas Instruments* y de *Analog Devices*, pero ya los primeros resultados fueron satisfactorios por lo que no se procedió a la realización de más pruebas. El **CD74HCT4066** obtenido consiste en un encapsulado SOIC en el cual se tienen 4 switches, cada uno manejado con su señal de control. El **SN74LVC2G66** por su parte está compuesto por 2 switches con sus señales de control propias, y se obtuvo en encapsulado formato MSOP. En ambos casos se tuvo que realizar una placa de adaptación para su comprobación en placa de pruebas.

Como elección se escogió el segundo de ellos por diversas razones. Ambos tenían un funcionamiento y unos resultados similares, por lo que la elección vino debida a que con el **SN74LVC2G66** se tenía la posibilidad de tener una separación física de cada canal (dos canales no tendrían que compartir un mismo dispositivo) y por facilidad en el posterior rutado de la placa pcb.

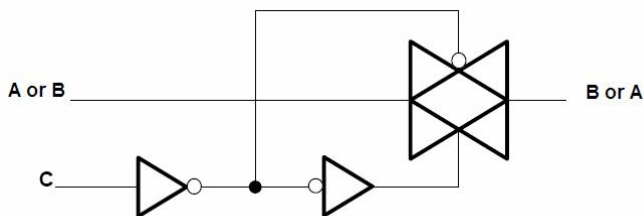


Ilustración 58: Esquema funcional del **SN74LVC2G66**

Este switch presentará otro nivel de aislamiento entre el sensor y lo que haya antes o después, teniendo entonces un nivel de protección más frente a los pulsos de transmisión y un nivel más de protección también en recepción, para que la señal recibida por el transceptor receptor llegue lo más pura posible a la parte de amplificación.

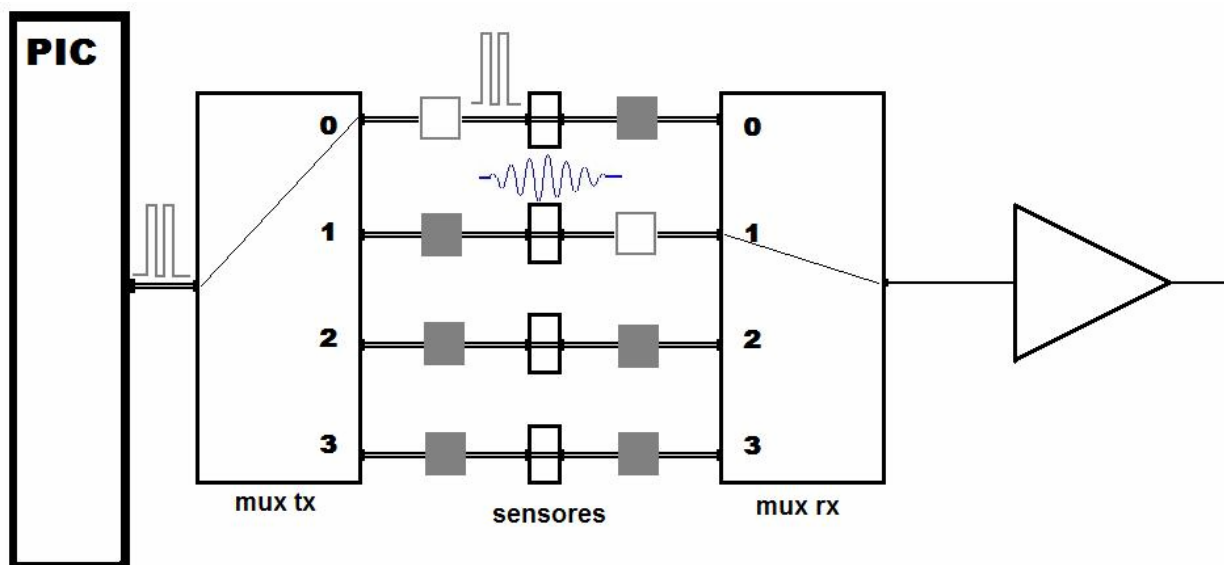


Ilustración 59: Esquema con switches

En el caso de la figura los switches habilitados serían el del canal 0 para la transmisión y el del canal 1 para la recepción. El resto permanecerían deshabilitados durante esta transmisión-recepción. La mejora en los resultados es muy considerable ya que de esta forma los pulsos de transmisión estarán más alejados de los sensores cuando funcionan como receptores y de la parte de amplificación, siendo así su efecto apenas notorio.

Ahora además se pueden habilitar tanto el switch como el multiplexor de recepción en un momento posterior al lanzamiento de los pulsos. Hay que decir que la habilitación/deshabilitación del multiplexor en el caso anterior no producía muchas mejoras ya que los pulsos seguían presentes en una de sus entradas, y por tanto afectaban a su salida, como se ha descrito anteriormente. Pero en este caso si se realizarán ambas habilitaciones y deshabilitaciones para intentar que los pulsos de transmisión afecten lo menos posible en la recepción y en la etapa de amplificación, que en definitiva es lo que se va buscando.

Además, si en el momento de la interrupción se deshabilitan esos switches y el multiplexor, estamos impidiendo que se sigan amplificando los siguientes ciclos, obteniéndose también una respuesta mucho más clara. Esto ayuda también a reducir esa frecuencia de unos 8KHz que se añadía a la señal, como se muestra en la figura siguiente, llegando a un buen resultado tanto después de la primera amplificación como después de la etapa de comparación, tras la cual se tiene claramente ese primer pulso que indicará el momento de la llegada de la interrupción:

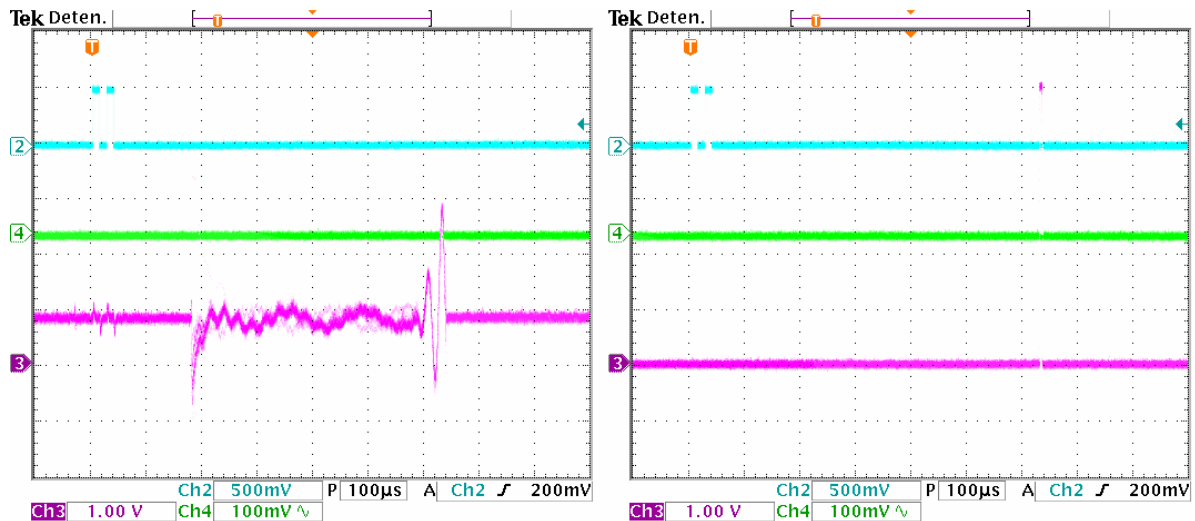


Ilustración 60: Resultados finales

De esta forma hemos conseguido una recepción (gráfica izquierda) mucho más clara que lo que obteníamos antes. En ella, tras el lanzamiento de los **pulsos de transmisión** la **recepción (tras amplificación)** apenas se ve afectada por ellos, y permanece en reposo hasta el momento donde se habilitan el multiplexor y el switch de recepción correspondiente, tras lo cual la **señal tras amplificación** es estable hasta el momento del comienzo de la recepción. A partir de este instante, la **esta señal** se va haciendo cada vez mayor hasta que supera el **nivel de referencia para la comparación** y se da la correspondiente interrupción, generada por el pulso que se observa en la gráfica de la derecha.