

5 CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO DE MITIGACIÓN

5.1 Introducción

Los objetivos principales de este capítulo son:

- Caracterización de los diferentes subcircuitos, de los que consta el conjunto, por sus formas de onda al introducir una señal patrón.
- La creación de una base de datos a partir de las señales obtenidas, para la realización de análisis en frecuencia y amplitud.

Con la creación de esta base de datos podremos estimar, sin la necesidad de realizar pruebas adicionales, las formas de onda a la salida de los diferentes subcircuitos implicados en el estudio.

A continuación procederemos a la caracterización de todos los subcircuitos por el análisis directo inyectando diferentes señales de referencia.

5.2 Circuito adaptador de la señal de referencia

La función principal de este bloque es la lectura del campo magnético inducido, producido por la línea en estudio, y transformarla en una señal eléctrica capaz de ser reconocible por el dispositivo de control DSP.

Aquí existen diferentes bloques que se puede esquematizar de la siguiente forma:

- Lector de campo: Este consistirá en un conjunto de espiras por el cual al ser atravesado el área que lo forma por un campo magnético, inducirá una corriente y a su vez una f.e.m. que se opondrá a dicho flujo.
- Un bloque que leerá la tensión producida en los extremos de la bobina, amplificando y filtrando dicha señal para adaptarla al dispositivo de control.
- Y un último bloque cuyo objetivo únicamente es proteger al DSP de sobretensiones en las entradas conversoras del mismo.

Para el estudio de esta fase realizaremos la división del circuito en dos montajes:

- En este primero estará la bobina y el primer bloque de adaptación de señal. Todo esto está montado en una sola placa.
- En este segundo estará la segunda etapa de adaptación de la señal, dejando lista la señal para el conversor del DSP. Esta etapa esta montada en otra placa junto el bloque de adaptación del lazo y subcircuitos de alimentación.

Comenzamos, por tanto, el estudio y caracterización del montaje.

En este bloque del circuito de adaptación lo podemos dividir en 3 partes, aunque 2 de ellas son las fundamentales. La tercera solo tiene la función de protección contra tensiones elevadas.

El esquema de este bloque

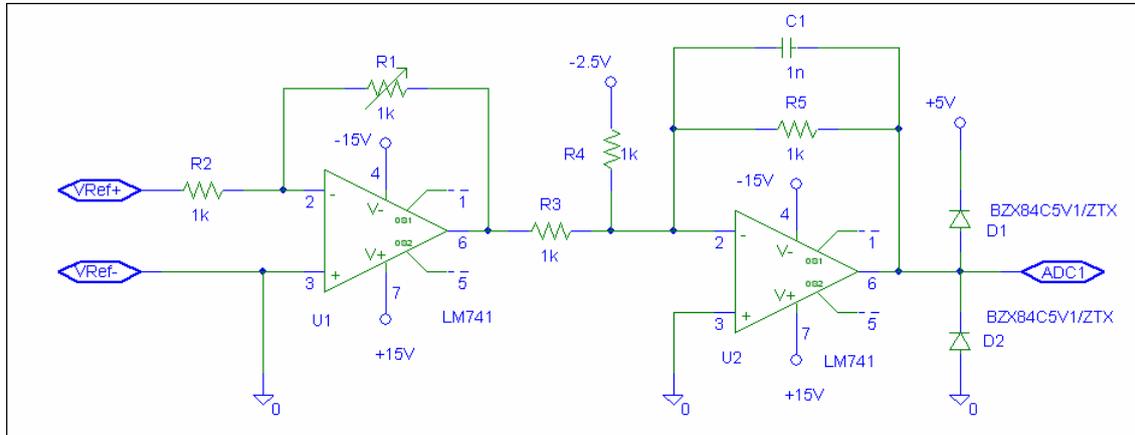


Figura 5.1. Bloque adaptador de señal de referencia

Primeramente vamos a introducir una señal a la entrada del circuito (figura 5.1), conectando el generador de señal y el osciloscopio entre VRef+ y VRef-. A partir de ese momento procederemos a capturar diferentes señales en distintos puntos del circuito, variando la posición en que colocaremos la sonda del osciloscopio, que posteriormente se irán analizando.

Como primer comentario a las capturas de onda, que el osciloscopio Tektronix nos ofrece, tomaremos dos tipos de ellas, siendo una la captura por matriz de puntos que representa gráficamente, por lo que permite la manipulación de la señal, y la otra una simple captura de pantalla, la cual podemos tener lecturas como tensión de pico a pico, frecuencia, período, tensión media y tensión eficaz.

La señal de entrada corresponderá una señal senoidal con frecuencia de 50 Hz. y tensión $1 V_{PP}$, un voltio de pico a pico.

La forma de onda es la esperada en el osciloscopio

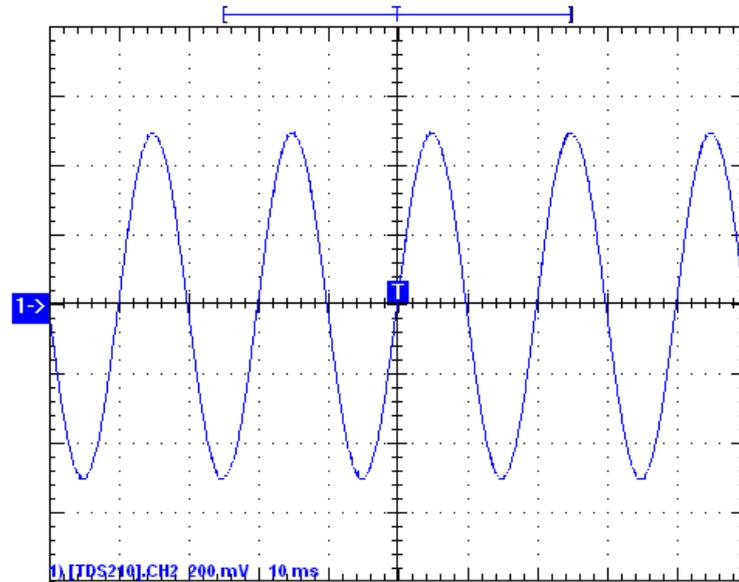


Figura 5.2. Señal de entrada

Utilizando la opción de promediado (promedio de 4 lecturas) del Tektronix las lecturas son:

$$f = 50\text{Hz}, V = 1.01 V_{PP}.$$

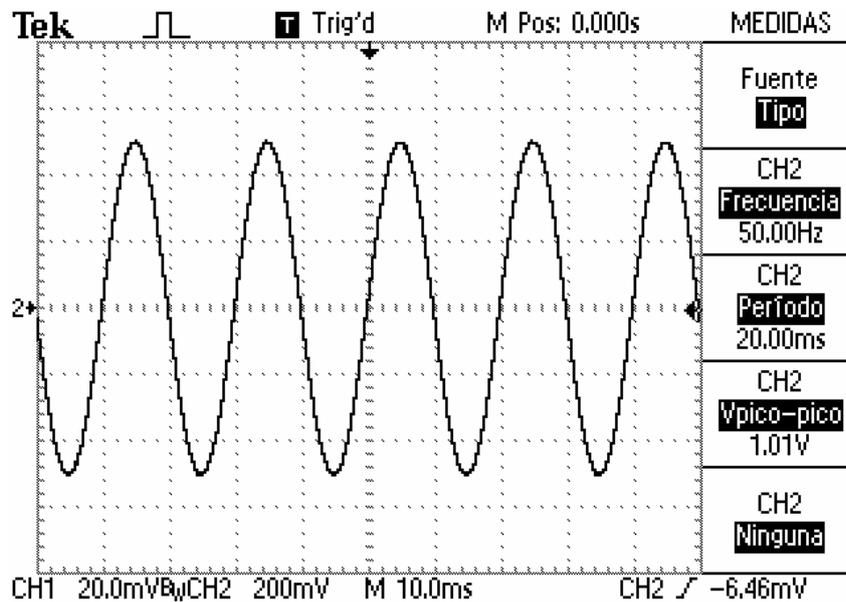


Figura 5.3. Señal de entrada

Procedemos a conectar la alimentación del circuito de adaptación. Las tensiones medidas en los bornes de alimentación son para la tensión positiva de +15.01 voltios y para la tensión negativa de -15.02 voltios. Con la alimentación conectada procedemos a la lectura de la señal de entrada.

La forma de onda en la entrada, una vez conectada la alimentación:

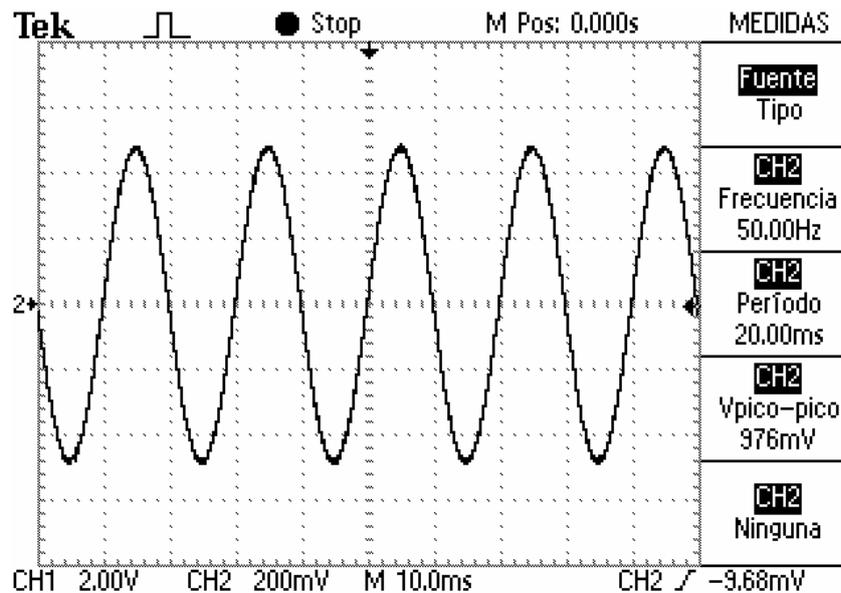


Figura 5.4. Señal de entrada

En la medida vemos que existe una pequeña caída pasando de los $1.01 V_{PP}$ a $976 mV_{PP}$, por lo que se produce una pequeña atenuación a la entrada. Esta atenuación es debida a la impedancia de salida de la fuente que genera la señal senoidal y la impedancia de entrada de la primera etapa amplificadora del circuito inversor de la adaptación de señal, produciendo una caída de tensión en el momento que se conectan (efecto divisor de tensión). Como se verá más adelante este efecto hará que tengamos que realizar modificaciones en el circuito.

Vamos a subir la tensión de la entrada hasta alcanzar el valor aproximado de $1 V_{PP}$. La tensión de entrada, conectada la alimentación, es de $1.01 V_{PP}$.

Nota: He cambiado los canales de las medidas, el canal 1 estará mi señal de referencia y en el canal 2 estará la señal de salida de los amplificadores operacionales, la patita 6.

Realizamos las siguientes medidas, teniendo en cuenta que:

- La sonda del canal 1 está conectada a la señal de referencia procedente del generador de señal.
- La sonda del canal 2 está conectada a la salida del amplificador inversor, U1, patilla 6 (U1-6) del operacional modelo LM741.

Las lecturas son:

Captura de pantalla:

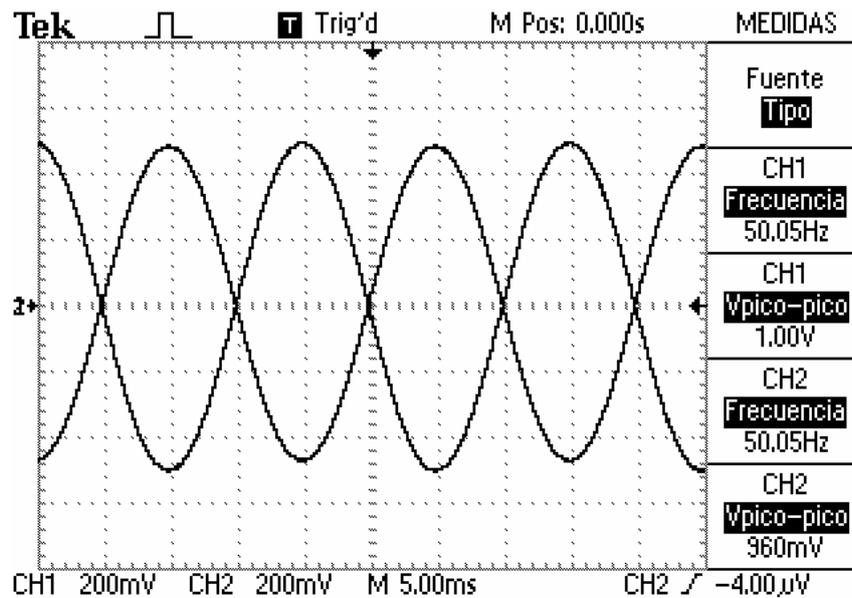


Figura 5.5. Lectura canal 1 y 2

Captura matriz de puntos

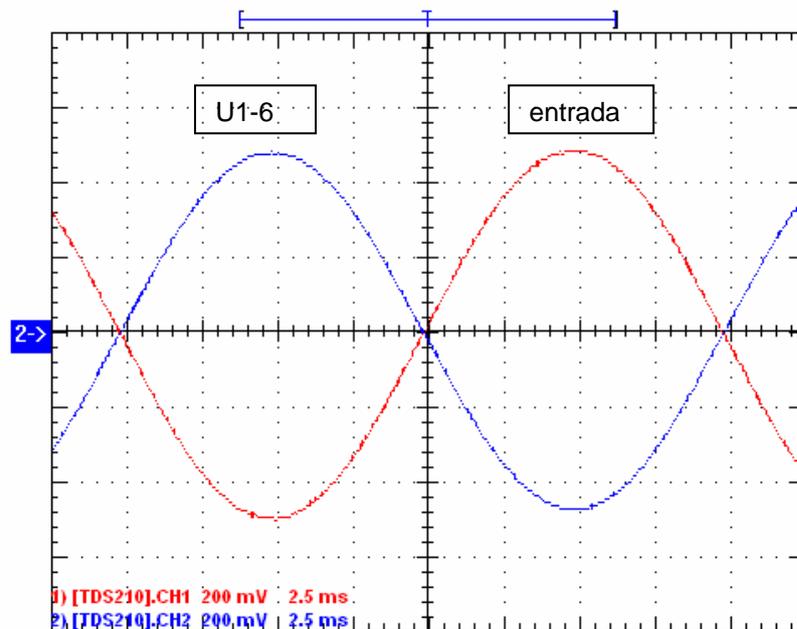


Figura 5.6. Lectura canal 1 y 2

La forma de onda en rojo corresponde a la señal de entrada y la forma de onda en azul a la señal de salida.

Analizando la onda de salida y comparándola con la entrada se observa:

La Amplitud tiene un valor diferente a 1, concretamente de 960 mV_{PP}. En este caso se procede al ajuste de la ganancia por medio del potenciómetro R1, figura 5.1, hasta tener una ganancia unidad. El objetivo del potenciómetro es corregir pequeñas variaciones en la ganancia debidas a los valores no ideales

de las resistencias, ya que estas últimas presentan pequeñas variaciones de su valor respecto al ideal, lo comúnmente llamado precisión. Además el potenciómetro montado, R1, es del tipo multivuelta obteniendo una buena precisión al realizar el ajuste de su valor.

El desfase, en este caso, es de 180 grados correspondiéndose a lo esperado por un montaje inversor. De existir variaciones en el ángulo, éstas son imperceptibles.

Por tanto se procede al ajuste del potenciómetro asociado al U1 para hacer la ganancia unidad. En la nueva figura se aprecia ya que ambas señales son idénticas salvo que están invertidas.

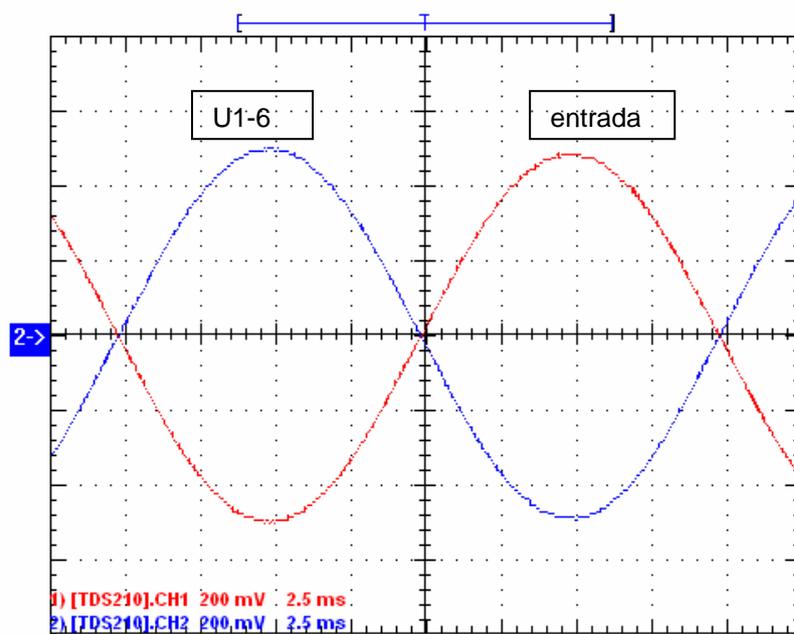


Figura 5.7. Lectura entrada y U1-6

Procedemos a la medida de la señal del segundo grupo amplificador, para lo cual realizamos las siguientes conexiones:

- La sonda del canal 1 está conectada a la señal de referencia procedente del generador de señal.
- La sonda del canal 2 está conectada a la salida del amplificador operacional, U2, patilla 6 (U2-6) del operacional modelo LM741, que en su conjunto forma el circuito sumador.

La representación gráfica de ambas señales la tenemos ilustrada en la figura siguiente donde la señal en rojo es la correspondiente a la sonda 1, la entrada del conjunto del montaje, y la señal en azul es la correspondiente a la sonda 2, salida del montaje, la cual está conectada directamente al DSP por medio de la patilla ADC1.

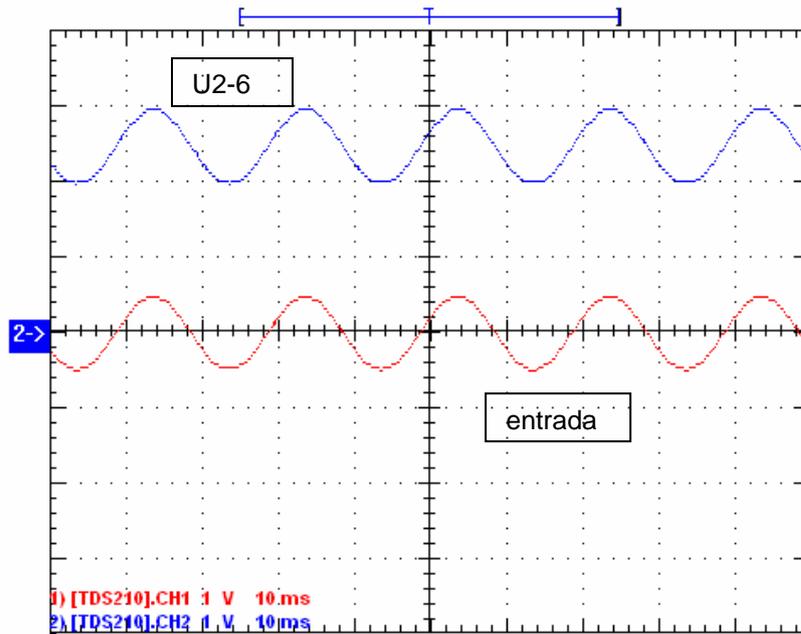


Figura 5.8. Lectura entrada y LM741 U2-6

De la figura anterior se extrae el siguiente análisis:

En primer lugar, lo primero que se aprecia en la onda de salida, canal 2, es el offset de 2.5 voltios. Como circuito sumador, suma la señal procedente del amplificador U1, patilla 6, con los -2.5 voltios procedentes de la fuente de tensión diseñada para tal efecto. Como ambas señales son negativas (U1 da una señal invertida) la suma tendrá un valor negativo. Ahora bien, el montaje además de sumador invierte el conjunto de la suma, por lo que su resultado final es positivo.

Seguidamente se aprecia que aparte del offset introducido, la señal es seguida fielmente por el circuito obteniendo las lecturas, por medio del osciloscopio, de

Tensión media: 2.5 voltios.

Tensión de pico a pico: 1 Voltio.

Analizamos el desfase entre la entrada y la salida. Realizando la medida de los pasos por cero de las señales, se observa de la existencia de un desfase de 79.77 microsegundos, en retraso, de la señal de salida respecto a la entrada. Puesto la frecuencia de la onda es 50 Hz, el período es $1/50=0.02$ s, aplicando una sencilla regla de tres, se obtiene que

$0.02 \text{ s} \rightarrow 360 \text{ grados}$

$x \rightarrow 1 \text{ grado}$

por lo que implica que

$$x = \frac{0.02 \text{ s}}{360 \text{ grados}} = 5.555 \cdot 10^{-5} \text{ s/grado}$$

aplicándolo a la lectura obtenida del osciloscopio tenemos

$$\text{desfase} = \frac{79.77 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{5.555 \cdot 10^{-5} \text{ s/ grado}} = 1.43 \text{ grados}$$

En la siguiente figura se puede observar la realización de la medida. Para esto, utilizamos las opciones de las que dispone el WaveStar de Tektronix y realizamos un zoom en búsqueda de una mejor precisión en la medida. Definido dos ejes verticales, el WaveStar nos aporta la diferencia en tiempos de la distancia entre ejes, por lo que solo es necesario colocar ambos ejes en los pasos por cero de ambas graficas. Para la grafica en azul, canal 2, el paso por cero se supone que se encuentra en 2.5 voltios al imponerse el offset.

Respecto al error encontrado se puede hacer diferentes suposiciones, siendo 2 las más acertadas para este caso.

La primera es la correspondiente a la incorporación de un condensador en paralelo con la resistencia R5 del montaje, véase figura 5.1. Este condensador tiene la finalidad de filtrar las componentes en alta frecuencia que puede tener la señal muestreada. El retraso es debido al proceso de carga y descarga del mismo.

Otra razón diferente es la debida a pequeñas inexactitudes en precisar una tensión de exactamente 2.5 voltios como tensión de offset a la entrada del circuito sumador. Una imprecisión de 0.01 voltio, para una señal de entrada de 1 voltio de pico a pico, significa un error introducido de 1.15 grados, muy próximo al error obtenido. Este se obtiene de

$$0.01 \text{ V} = 0.5 * \text{sen}(x)$$

despejando

$$x = \arcsen(0.01/.5) = 1.15 \text{ grados}$$

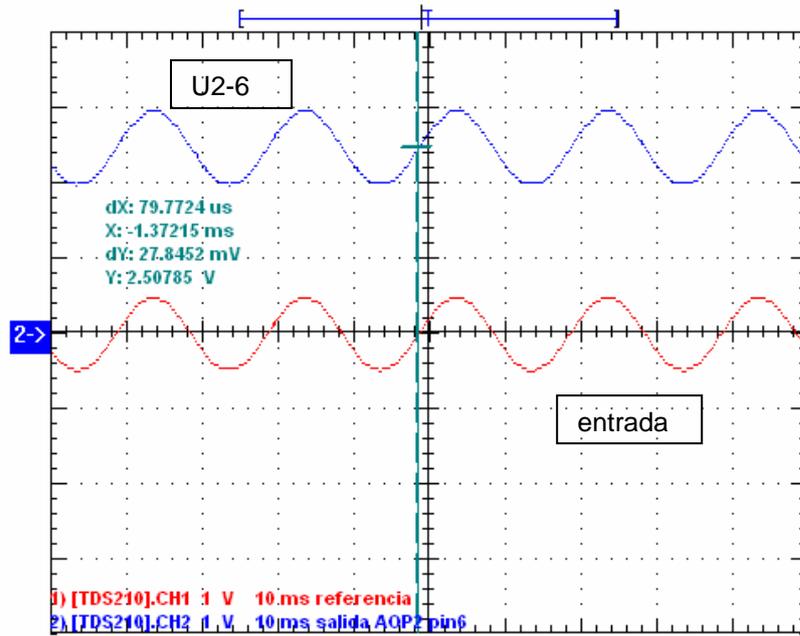


Figura 5.9. Lectura señal de entrada y U2-6

Se realiza ahora un estudio en frecuencia con el objetivo de buscar con mayor precisión la causa de tal desfase, suministrando una señal cuadrada, la cual se hace variar su frecuencia y estudiando su respuesta a la variación de su frecuencia. Las lecturas del osciloscopio representadas corresponde para el canal 1, en rojo, la entrada al circuito generada por el generador de onda, y para el canal 2, en azul, a la salida del segundo amplificador, la patilla 6 del U2.

La primera onda es una señal cuadrada de 50 Hz, intentando mantener la tensión de entrada próxima a 1 V_{PP}.

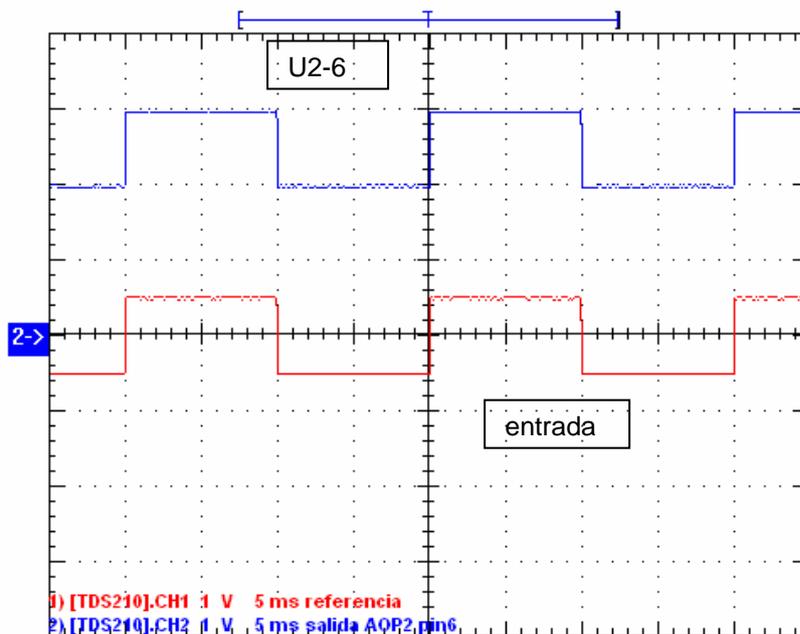


Figura 5.10. Respuesta a una señal de 50 KHz de U2-6

La forma de onda a la salida es una copia de la entrada y no se aprecia a simple vista desfase entre ellas.

Ahora bien, si se realiza una ampliación de la misma se aprecia un retardo entre el cambio de valor de la señal original y la salida del conjunto de amplificación en estudio (ver figura).

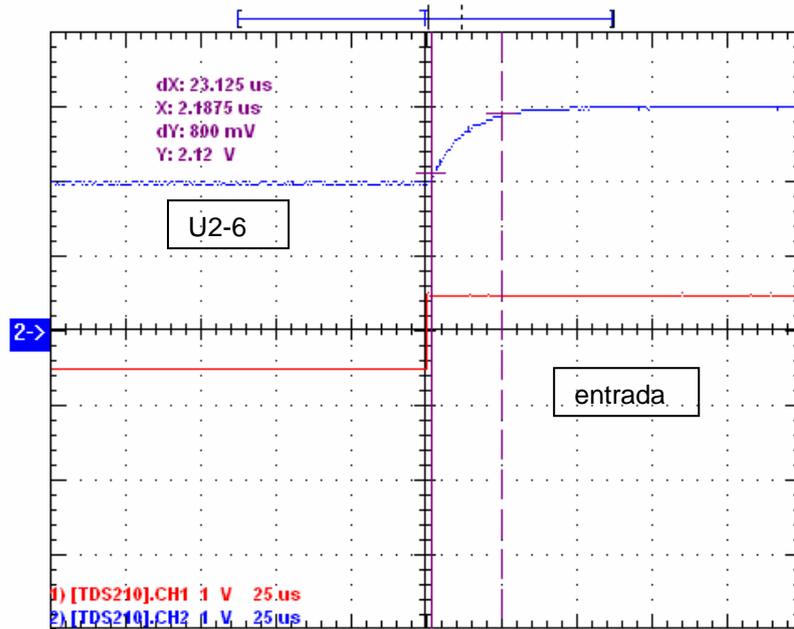


Figura 5.11. Tiempo respuesta del U2-6

Para medir ese retraso en la respuesta al escalón se toma para la medida del 10% al 90% del cambio de valor en el escalón. El tiempo transcurrido entre ambos intervalos corresponde a $23.125 \mu\text{s}$, por lo que en parte explica el ligero desfase en la señal senoidal antes introducida.

Si se procede a ir ampliando la frecuencia en múltiplos de 10 se observa que para una frecuencia de 500 Hz, para la respuesta al escalón, el tiempo de respuesta sigue siendo aproximadamente igual. Para la frecuencia de 5000 Hz este tiempo sigue manteniéndose.

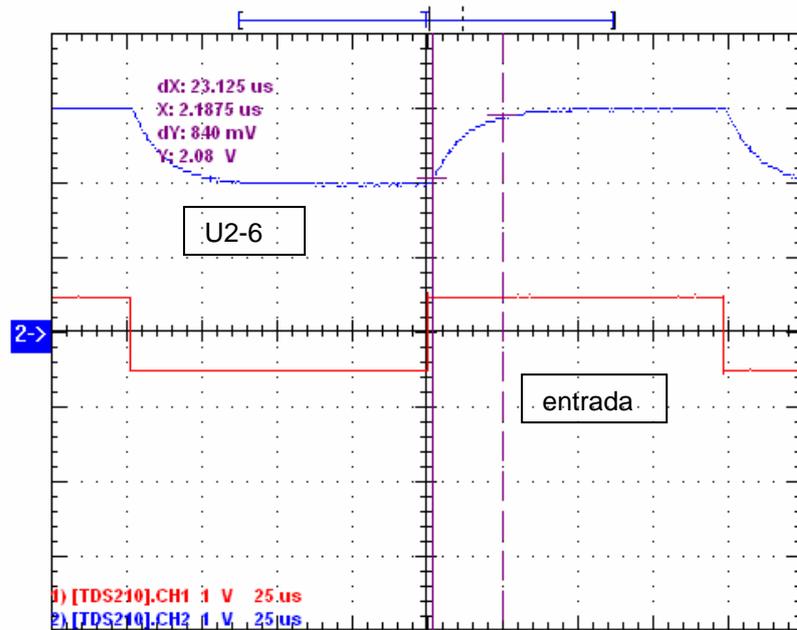


Figura 5.12. Respuesta una señal de 5 KHz.

Ahora bien si aumentamos a 50Khz vemos que:

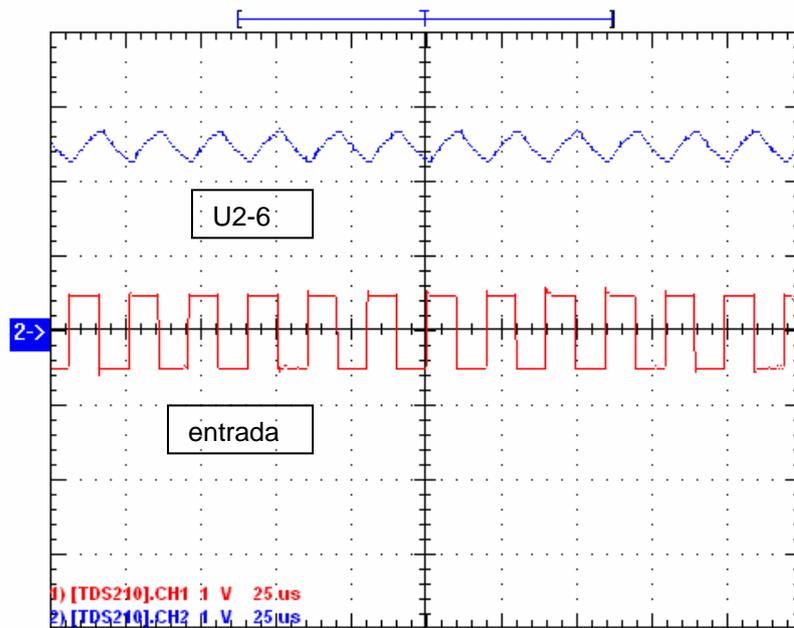


Figura 5.13. Respuesta a una señal de 50 KHz.

La entrada es un escalón pero la señal de salida es una onda triangular. Si bien observamos, exactamente no es una onda triangular pues su forma corresponde más a la característica de carga y descarga de un condensador, el asociado al U2, de capacidad 1 nF.

Para asegurarnos que este efecto no es debido al amplificador operacional U1, para la misma frecuencia, 50 KHz., analizamos la respuesta U1, por lo que

el canal 2 corresponderá a la salida de la patilla 6 del amplificador U1. El tiempo de respuesta al escalón es de 1.30 μs , muy lejos de los 23 μs del total del conjunto, por lo que el principal motivo de desfase y respuesta de la onda se debe al condensador de 1 nF.

Hecho este análisis con el escalón, se realizará ahora con la onda senoidal. Empezamos por 500 Hz. . Puesto la frecuencia de la onda es 500 Hz, el período es $1/500=0.002\text{s}$, aplicando una sencilla regla de tres, se obtiene que:

El desfase a 500 Hz es de 9.42us.

$$x = \frac{0.002 \text{ s}}{360 \text{ grados}} = 5.555 \cdot 10^{-6} \text{ s/grado}$$

Aplicándolo a la lectura obtenida del osciloscopio tenemos:

$$\text{desfase} = \frac{9.42 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{5.555 \cdot 10^{-6} \text{ s/grado}} = 1.69 \text{ grados}$$

El aumento de frecuencia apenas aumenta el desfase entre ambas señales.

Para 5 Khz. tenemos que la tensión de offset pasa de 2.5 a 2.52voltage y el retraso varia a 11.08 μs . . Puesto la frecuencia de la onda es 5 Khz., el período es $1/5000=0.0002\text{s}$, Por tanto se obtiene que:

$$x = \frac{0.0002 \text{ s}}{360 \text{ grados}} = 5.555 \cdot 10^{-7} \text{ s/grado}$$

Aplicándolo a la lectura obtenida del osciloscopio tenemos:

$$\text{desfase} = \frac{11.08 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{5.555 \cdot 10^{-7} \text{ s/grado}} = 19.94 \text{ grados}$$

Para esta frecuencia ya si es apreciable el aumento de desfase entre ambas señales. En la figura siguiente se puede observar la lectura obtenida como también las medidas de los desfases.

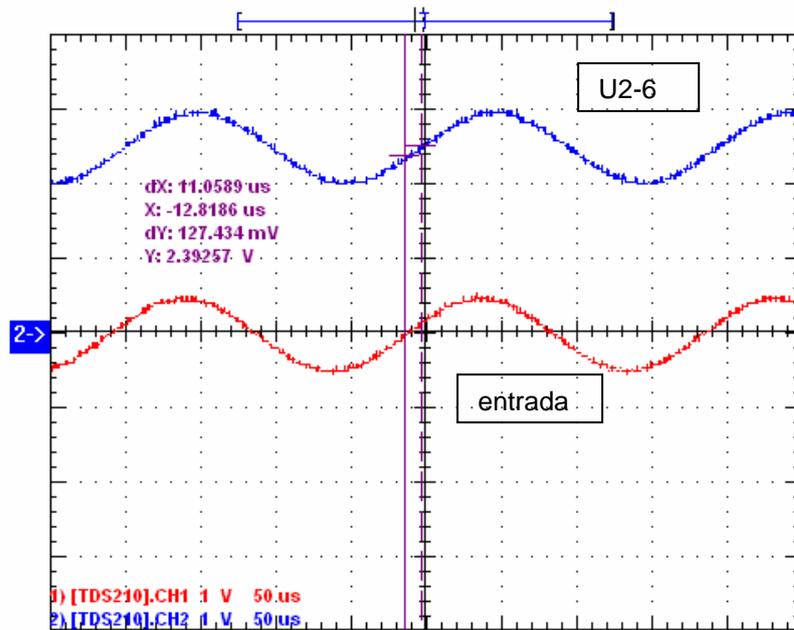


Figura 5.14 Desfase a 5 KHz.

Ya, en último lugar, para 50 KHz. tenemos esta forma de onda:

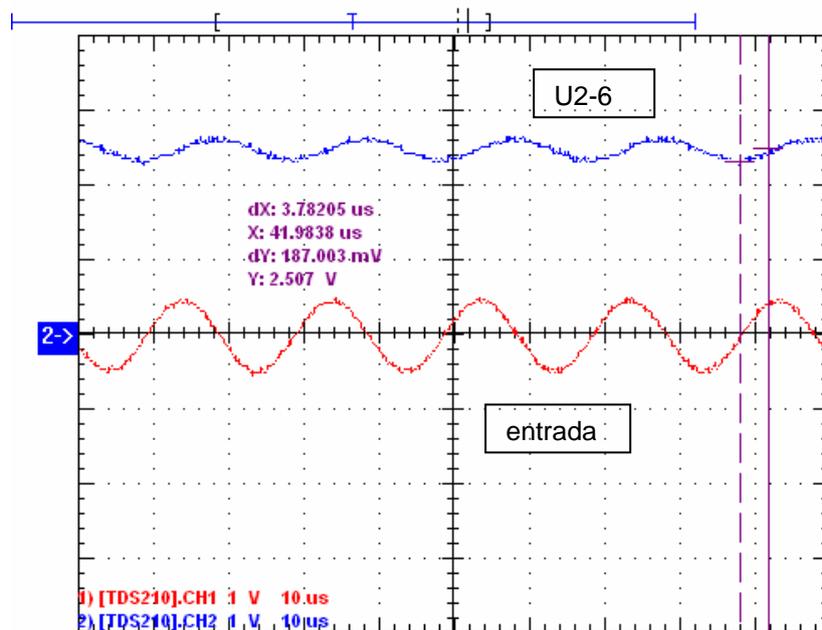


Figura 5.15 Desfase a 50 KHz.

Y en este caso el desfase calculado es muy evidente a simple vista, pues teniendo una lectura de $3.78 \mu\text{s}$, el desfase es $3.78/.0555=68.01$ grados.

$$x = \frac{0.00002 \text{ s}}{360 \text{ grados}} = 5.555 \cdot 10^{-8} \text{ s/grado}$$

Aplicándolo a la lectura obtenida del osciloscopio tenemos:

$$\text{desfase} = \frac{3.78 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{5.555 \cdot 10^{-8} \text{ s/grado}} = 68.01 \text{ grados}$$

Con los datos ya obtenidos se puede llegar a las conclusiones siguientes:

- A bajas frecuencias los desfases entre señales se pueden considerar constantes. Al trabajar con frecuencias que va a oscilar alrededor de los 50 Hz, pequeñas variaciones de la misma, del orden de .5 Hz, no va a significar alguna variación significativa en el desfase.
- El desfase debido al ajuste del offset muestra cierta sensibilidad si las tensiones son relativamente pequeñas. Por eso es recomendable ajustar el offset al valor objetivo con la mayor precisión posible y posteriormente realizar las medidas de desfase, teniendo en cuenta que dicha medida es la suma del error producido por el offset y el desfase debido al condensador del filtro.

5.3 Adaptador lazo activo

Para el análisis de las diferentes respuestas del conjunto de circuitos que compone el adaptador de lazo activo procederemos, al igual que el apartado del estudio de la señal de referencia, a introducir una señal de $1 V_{PP}$ a la entrada V_r-V_c .

Al conectar la tensión de alimentación al circuito de adaptación se observa, al igual que el en el estudio del circuito de adaptación de la señal de referencia, que la tensión de entrada pasa de $1 V_{PP}$ a $960 mV_{PP}$. A igual que antes, por la literatura encontrada en la red, se deduce que esta pequeña caída de tensión se debe a la adaptación de impedancias del circuito de entrada con el generador de señal, lo que suele llamarse efecto de carga (para eliminar este efecto es necesario introducir a la entrada un circuito seguidor de tensión, si la impedancias entre la entrada y la resistencia shunt, que mide la intensidad del lazo, son similares), de esa manera la tensión sería una copia fiel de la entrada eliminando tal efecto.

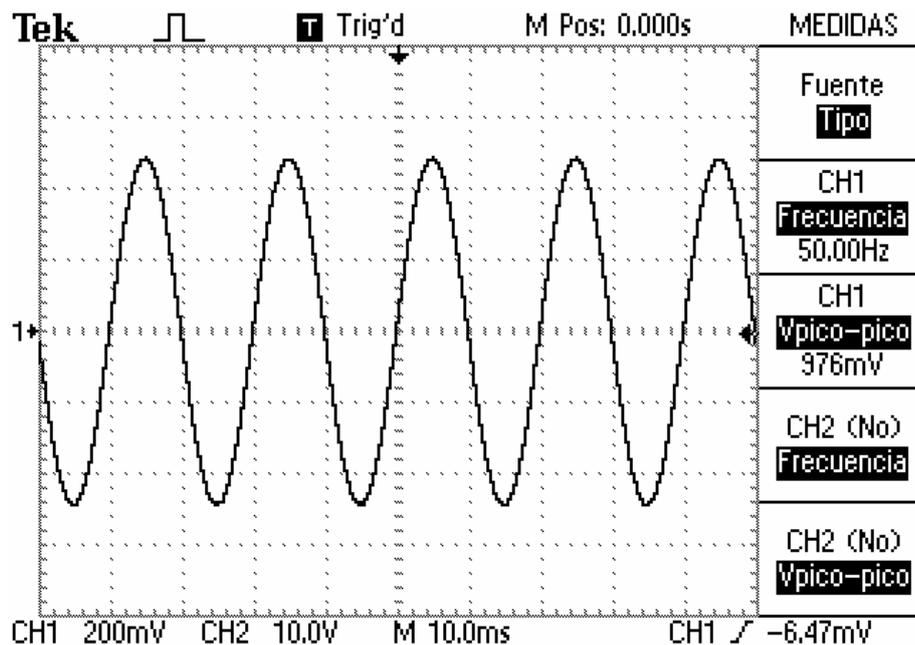


Figura 5.16 Forma de onda referencia

Este efecto se produce tanto si la onda es senoidal como si es cuadrada con un porcentaje caída muy aproximado, pasando para la onda cuadrada de $1.04 V_{PP}$ a $1 V_{PP}$ y para la señal senoidal de $1.01 V_{PP}$ a $976 mV_{PP}$. Se utiliza en el osciloscopio el valor promedio para definir mejor la onda eliminado los valores picos.

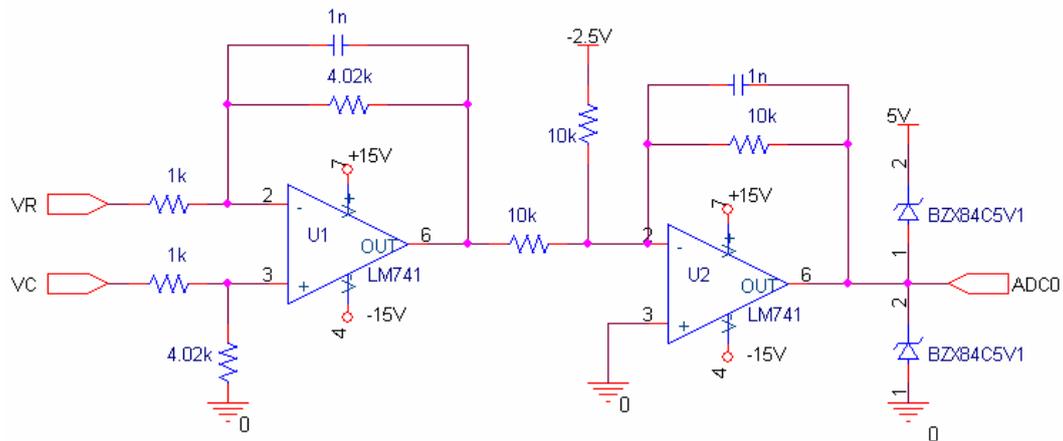


Figura 5.17. Esquema del adaptador lazo activo

Teniendo esto en cuenta y suponiendo corregido este efecto en las pruebas sucesivas, se dispone subir la tensión de entrada corregida a un $1 V_{PP}$.

Para las medidas se coloca las sondas en:

- Para el canal 1, la señal supuestamente procedente del lazo, en rojo, la señal procedente del generador de señal.
- Para el canal 2, en azul, la salida del amplificador operacional que actúa como diferenciador en este montaje.

Una vez colocadas las sondas y alimentados los circuitos correspondientes se obtiene las diferentes capturas de señal seguidamente expuestas.

Para asegurarnos si la ganancia es constante o depende de algún factor, como puede ser aumento de la amplitud o variación de la frecuencia, se procederá a realizar un barrido con medidas para buscar relaciones o dependencias de estos dos factores.

En la figura se observa claramente como la señal del canal 2, en azul (U2-6), que corresponde a la salida del amplificador 1, está desfasada 180 grados respecto a la referencia, en rojo (entrada), y además amplificada aproximadamente 4 veces. Se ha utilizado para la medida el promediado de 16 imágenes del osciloscopio. Si se introduce una señal de entrada superior a $1 V_{PP}$ se obtiene:

- Para $2 V_{PP}$, la amplitud de la señal de salida es de $8 V_{PP}$ por lo que para grandes amplitudes se comporta bien.
- Con una entrada de $728 mV_{PP}$, la amplitud de la señal de salida es de $2.92 V_{PP}$, siendo un valor esperado pues $2.92/0.728 = 4.01$ esta dentro del posible error de lectura.

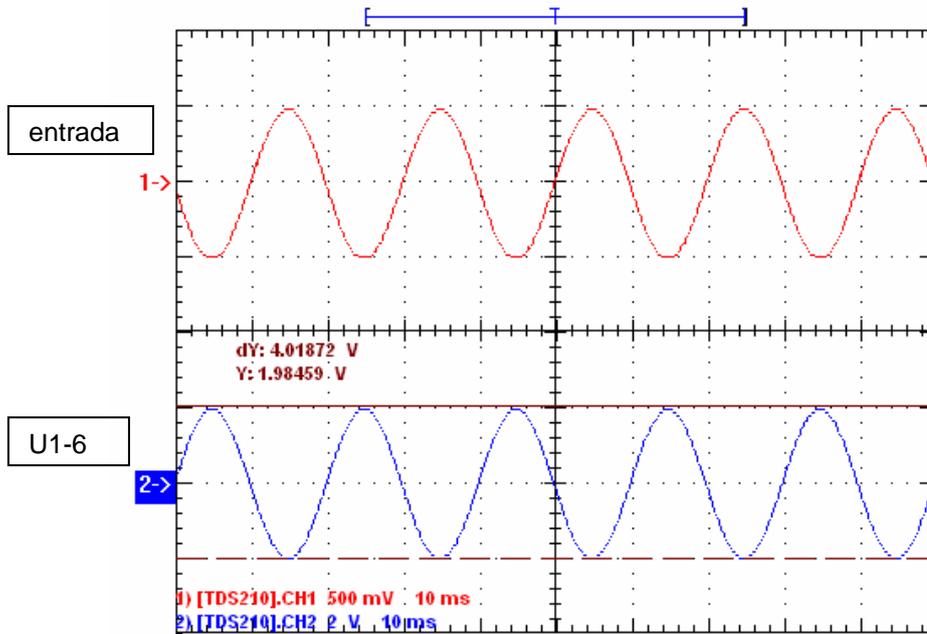


Figura 5.18. Respuesta U1-6 a la señal de entrada

Ahora ver la salida del amplificador operacional 2

Para las medidas se coloca las sondas en:

- Para el canal 1, la señal supuestamente procedente del lazo, en rojo (entrada), la señal procedente del generador de señal.
- Para el canal 2, en azul (U2-6), la salida del amplificador operacional 2 que actúa como sumador en este montaje.

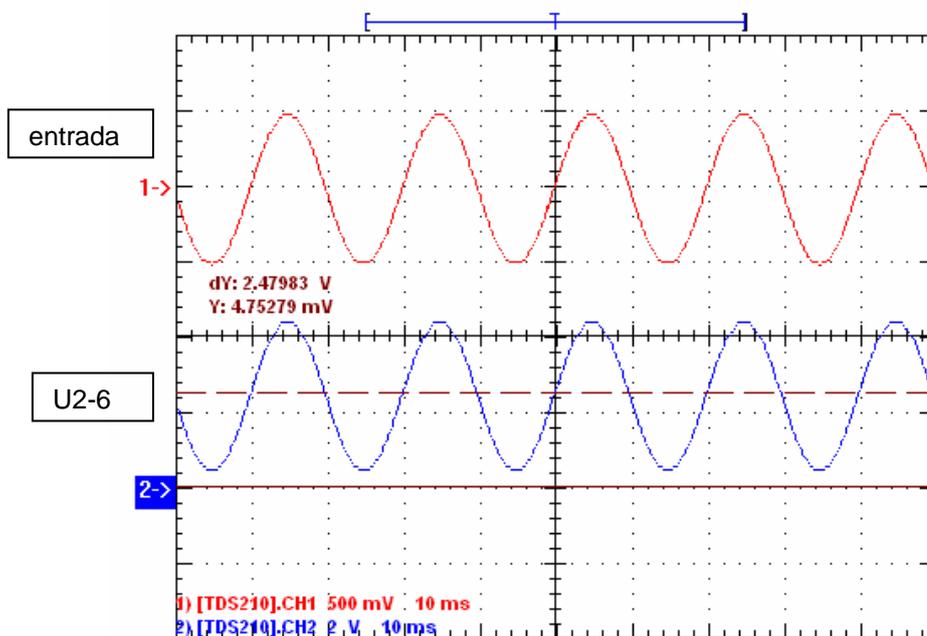


Figura 5.19. Lectura señal entrada y U2-6

De la figura se mide el offset que el circuito sumador introduce a la señal procedente del primer amplificador, observando que es aproximadamente 2.5 voltios, siendo el valor concreto 2.48 V. Esto introduce un pequeño desfase entre la señal origen y la salida.

Vemos ahora el desfase y estudiamos la respuesta al escalón

El desfase debido a la precisión de la muestra es difícil determinarlo, así que procedo al estudio al escalón. Con la misma configuración en las sondas se procede a la medida.

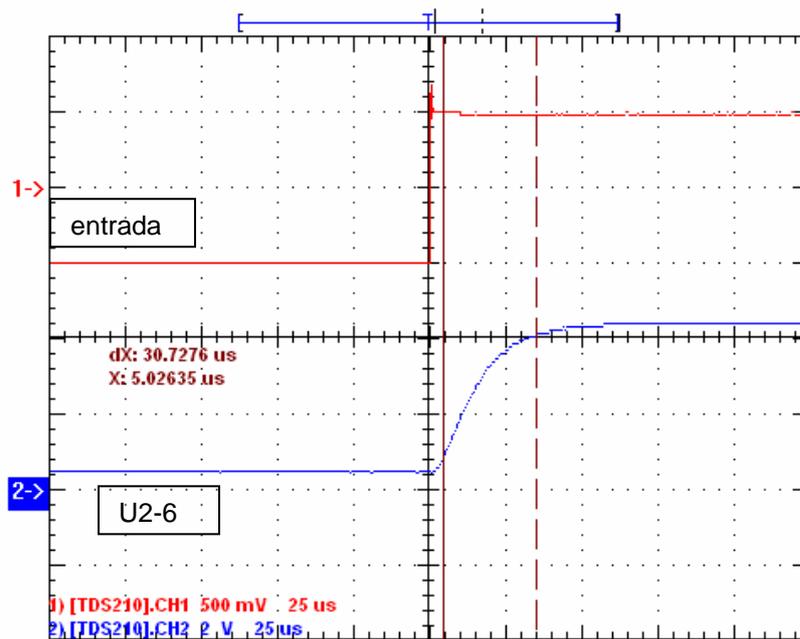


Figura 5.20. Lectura entrada y U2-6. Tiempo de subida.

el tiempo de subida de la onda es de 30.72us, un tiempo parecido al circuito de la etapa adaptación a la señal de referencia, por lo que estimo que el desfase final debe de ser muy similar al anterior, alrededor de los 2 grados.

Puesto que la frecuencia en que trabajaremos es de 50 Hz, para la componente principal, y de varios kilohercios para las señales producidas por la generación del DSP (control bang-bang), se realizará posteriormente un barrido desde 500Hz hasta 5Khz.

La lectura es la esperada, para 500 Hz tenemos una lectura de 1 V_{PP} de entrada y 4 V_{PP} salida aunque la lectura ya se empieza a notar un ligero desfase. A medida que aumentamos la frecuencia este se va haciendo más evidente. En las lecturas del osciloscopio vemos una que comienza una ligera caída de la tensión alrededor de los 1000 Hz, con una señal de tensión de 3.92 V_{PP}; con 5000 Hz la lectura del osciloscopio es de 3.76 V_{PP}.

5.4 Driver

En este capítulo se continuará con el estudio de las diferentes formas de ondas que intervienen en este circuito, vital para la comunicación entre el DSP y el inversor, para la creación de la señal seno en el inversor. En esta figura tenemos la representación del esquema de montaje de dicho circuito.

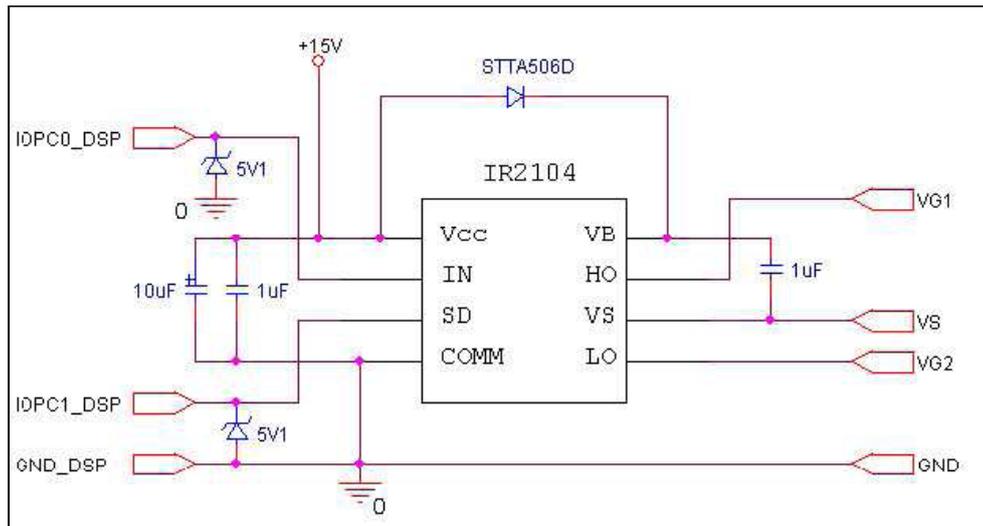


Figura 5.21. Esquemático driver

Continuando con el estudio, se procede a inyectar una señal cuadrada de 5 KHz por la conexión IOPC0_DSP, analizando posteriormente las señales a la salida de las diferentes conexiones que conectan el DSP con el inversor. La patilla IOPC1_DSP es necesario que esté a 5 Voltios, UNO lógico, para que esté habilitado el IR2104. No se va a utilizar el DSP para estas pruebas, sino el generador de señal Hameg para minimizar riesgos sobre el DSP. Realmente para la construcción de la señal bang-bang es necesario una señal cuadrada pero de frecuencia variable (PWM), pero para este estudio no es necesario dicha señal.

Para la medida de la salida del driver VG1, las conexiones de las sondas del osciloscopio son

- Para el canal 1, en rojo, una señal cuadrada de 5 voltios y 5 KHz. Este tipo de señal corresponde a una señal lógica donde la tensión en alto representa 1 lógico, 5 voltios, y la tensión en bajo representa el 0 lógico, 0 voltios.
- Para el canal 2, en azul, corresponde a la salida VG1 del circuito driver, el cual está conectado a una de las puertas del inversor.
- La masa de las sondas están conectadas a GND del circuito.

Se procederá primeramente a no alimentar el inversor y a continuación a alimentar el inversor. A continuación se estudiarán las posibles variaciones encontradas.

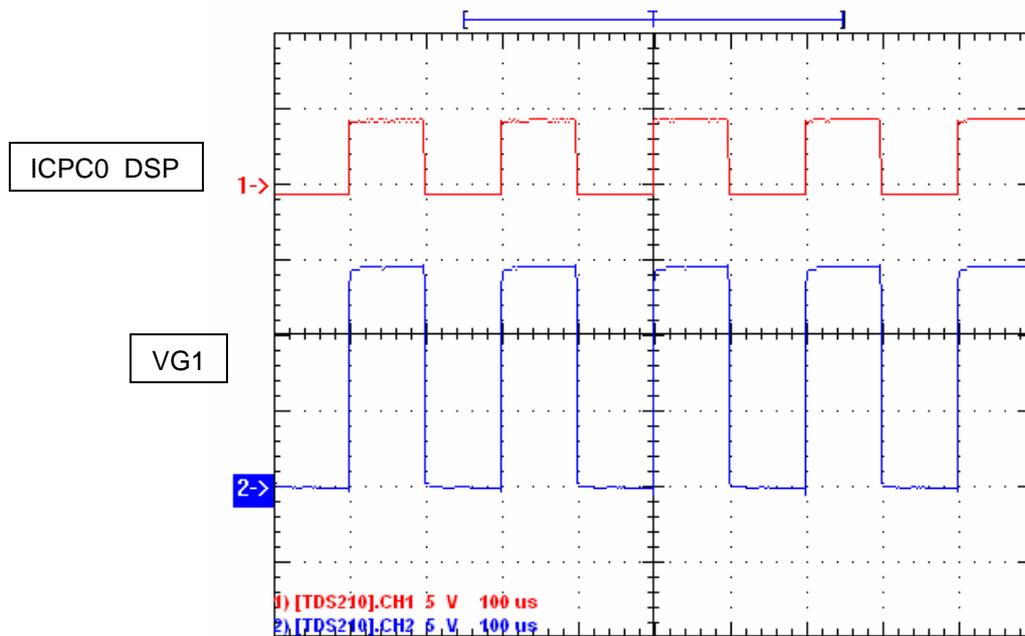


Figura 5.22. Señal salida driver en VG1

La figura representada anteriormente corresponde a la salida de la señal VG1 del driver sin alimentación del inversor. Según la medida del osciloscopio tenemos una lectura algo inferior a $15 V_{PP}$. Esta lectura está dentro de los márgenes de catálogo del fabricante. Además la señal se encuentra en fase con la señal de referencia, lo que debería ser normal en este caso.

Procediendo a alimentar el inversor, se observará las señales de salida por el driver y como evolucionan éstas.

A medida que la tensión de alimentación del inversor se va incrementando, la tensión respecto a tierra de VG1 también se va incrementando con los siguientes valores obtenidos de laboratorio:

- Para $V_{CC}=10$ voltios se tiene una lectura de $25.2 V_{PP}$
- Para $V_{CC}=20$ voltios se tiene una lectura de $35.6 V_{PP}$.
- Para $V_{CC}=24$ voltios se tiene una lectura de $39.2 V_{PP}$.

En los tres casos anteriores, la forma de onda es idéntica con la salvedad de que las tensiones no son iguales sino varían con la tensión.

Ahora bien, en la entrada del Transistor 1 que se utiliza en el inversor como interruptor, la tensión V_{GS} , tensión puerta-surtidor, es la diferencia entre la tensión que hay entre el terminal VG1 y el terminal VS, así que procede a representar esta diferencia en la siguiente figura. Esta diferencia está representada por el canal 3, en negro.

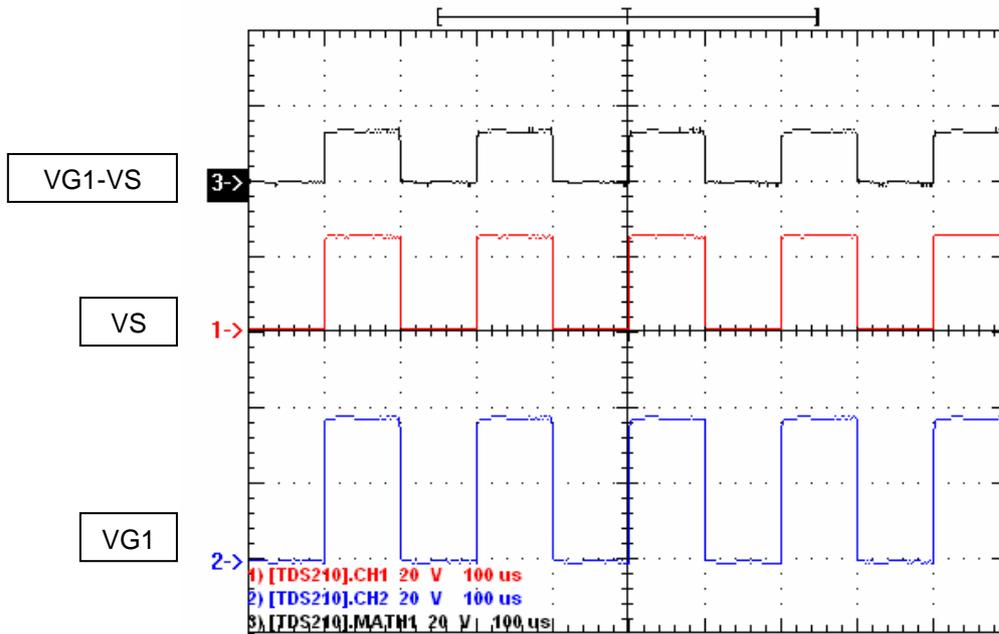


Figura 5.23 Lectura señales VG1 y VS

Según esta lectura, el canal 1, en rojo, corresponde a la señal VS y el canal 2, en azul, corresponde a la lectura VG1. La diferencia de ambas señales es VG1-VS, canal 3, que es la tensión de entrada del transistor 1. Por tanto, si en VG1 la tensión medida es de 39.2 V_{PP} y en VS es de 24.8 V_{PP}, entonces $V_{G1-Vs} = 14.4$ V_{PP}, un valor dentro de las especificaciones de catálogo.

Se procede a analizar la salida VG2 del driver. Las conexiones de las sondas del osciloscopio son:

- Para el canal 1, en rojo, una señal cuadrada de 5 voltios y 5 KHz. Este tipo de señal corresponde a una señal lógica donde la tensión en alto representa 1 lógico, 5 voltios, y la tensión en bajo representa el 0 lógico, 0 voltios.
- Para el canal 2, en azul, corresponde a la salida VG2 del circuito driver, el cual está conectado a una de las puertas del inversor.
- La masa de las sondas están conectadas a GND del circuito y V_{cc} es 24 V.

Sin alimentar el inversor, se puede observar en la figura siguiente como la salida del driver, VG2, está desfasada 180 grados respecto a la señal de referencia, el disparo del transistor conectado a dicha puerta. Además, la salida tiene la forma de una onda cuadrada perfecta. La tensión de pico a pico es de 14.7 V. La tensión entre puerta-surtidor del transistor 2 del circuito inversor es, en valor, muy próxima a la tensión puerta-surtidor del transistor 1.

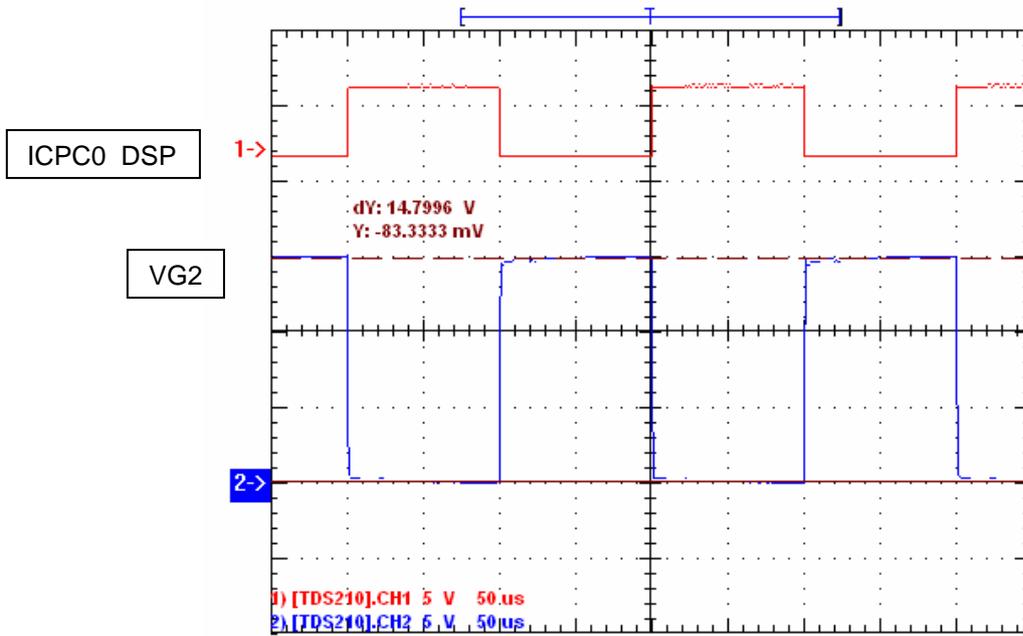


Figura 5.24 Lectura señal del VG2

Con la misma configuración de las sondas, alimentando el inversor, se obtiene la figura siguiente. En este caso, prácticamente como el caso anterior, apenas no hay variaciones de las tensiones medidas entre puerta-surtidor de los transistores.

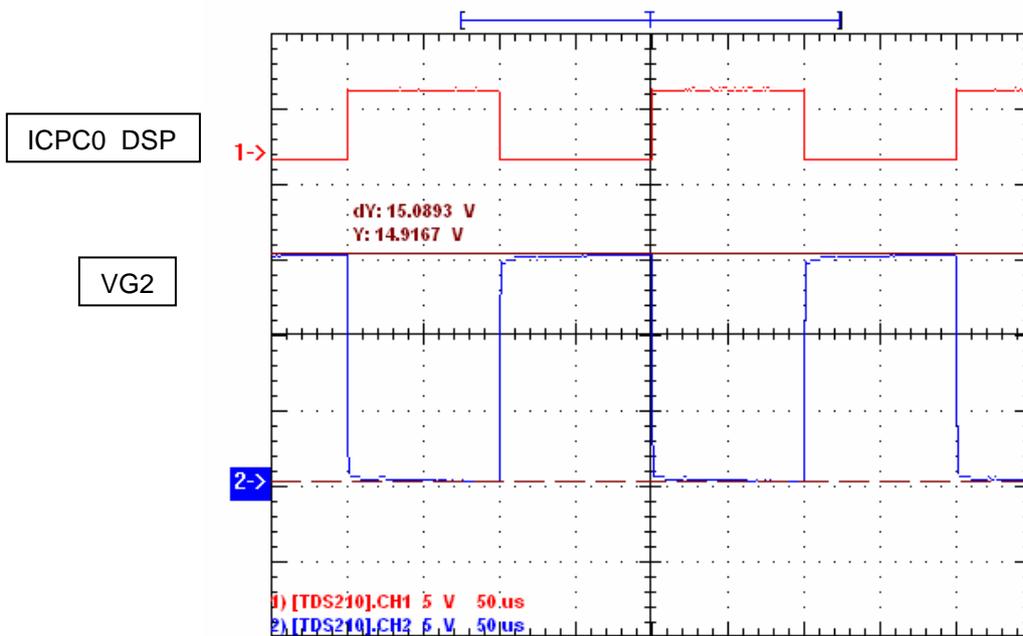


Figura 5.25. Lectura señal del VG2

Recommended Operating Conditions

The Input/Output logic timing diagram is shown in Figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S offset rating is tested with all supplies biased at 15V differential.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply absolute voltage	$V_S + 10$	$V_S + 20$	V
V_S	High side floating supply offset voltage	Note 1	600	
V_{HO}	High side floating output voltage	V_S	V_B	
V_{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	10	20	
V_{LO}	Low side output voltage	0	V_{CC}	
V_{IN}	Logic input voltage (IN & \overline{SD})	0	V_{CC}	
T_A	Ambient temperature	-40	125	°C

Note 1: Logic operational for V_S of -5 to +600V. Logic state held for V_S of -5V to $-V_{BS}$. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Figura 5.28. Rango de señales

Este primer estudio nos puede ser útil para ver como reacciona el driver al estímulo de una señal lógica. También para buscar fallos o averías si alguno de los componentes del circuito no funciona correctamente. Como dato a resaltar, el estudio del driver sin estar conectados los terminales correspondientes con el inversor no es posible.

Siguiente procedimiento medida de los desfases del disparo e influencia en los retrasos.

Datos facilitados por el fabricante:

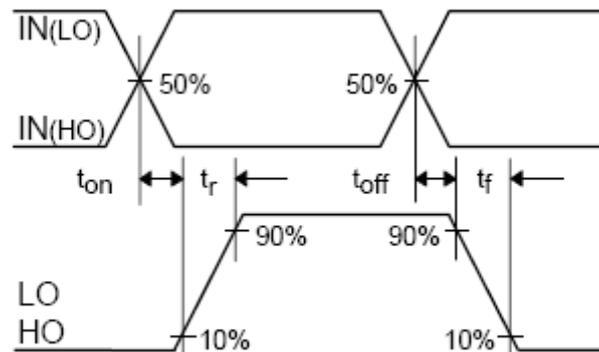


Figure 2. Switching Time Waveform Definitions

Figura 5.29. Tiempos de cambio de estado

Dynamic Electrical Characteristics

$V_{BIAS} (V_{CC}, V_{BS}) = 15V$, $C_L = 1000 \text{ pF}$ and $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	—	680	820	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	—	150	220		$V_S = 600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	—	160	220		
t_r	Turn-on rise time	—	100	170		
t_f	Turn-off fall time	—	50	90		
DT	Deadtime, LS turn-off to HS turn-on & HS turn-on to LS turn-off	400	520	650		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	—	—	60		

Figura 5.30. Tabla con los tiempos cambio de estado

Forma de onda VG1: de 0 a 1 lógico. Disparo de Transistor puerta VG1

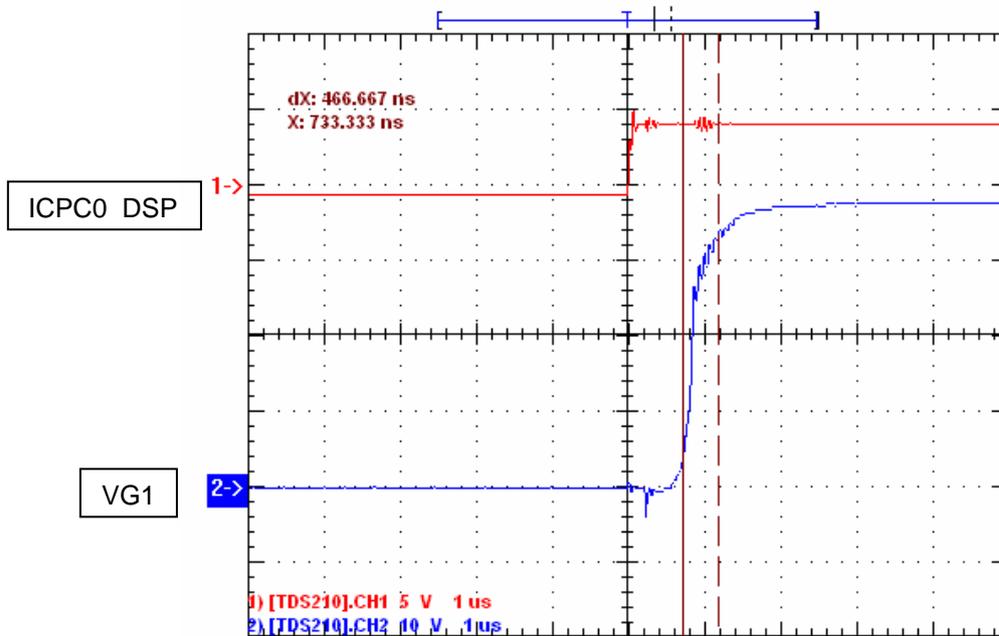


Figura 5.31. Rampa de disparo

En este periodo de la gráfica solo intervienen los valores t_{on} y t_r . Como se puede apreciar en la figura t_{on} tiene un valor de 733 ns y t_r un valor de 466 ns. Sumando t_{on} y t_r se tiene total un valor de 1.2 μs . El valor de t_r es superior al valor de catálogo.

Forma de onda VG1: de 1 a 0 lógico. Apagado de Transistor puerta VG1

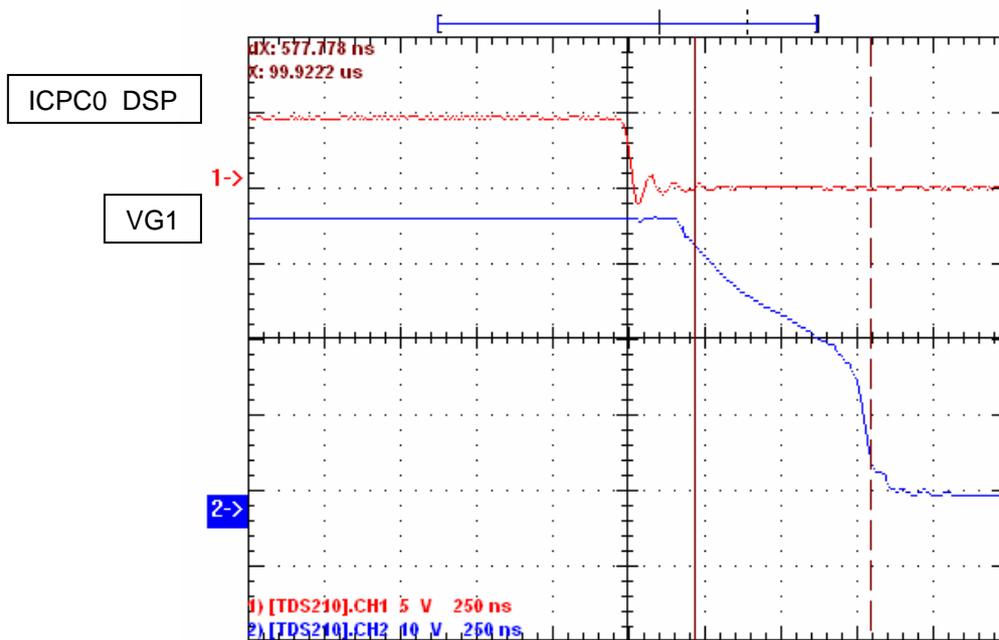


Figura 5.32. Rampa de apagado

En este periodo de la gráfica solo intervienen los valores t_{off} y t_f . El tiempo t_{off} es de 221 ns (distancia entre el eje y la primera barra vertical de la figura) y el tiempo t_f de 577.78 ns (distancia entre la primera barra vertical y la segunda barra). El tiempo total es de 798.78 ns. Como se puede observar las especificaciones de catálogo no se cumple para t_f que especifica un tiempo inferior a 90 ns.

El programa que trata las figuras, el WaveStar, toma como comienzo de tiempos el paso del escalón de 0 a 1 en esta situación, por lo que el valor que aparece en la figura de x: 99.922 μ s es referido al comienzo del escalón hasta el eje Y de la figura actual.

Forma de onda VG2: de 0 a 1 lógico. Disparo de Transistor puerta VG2

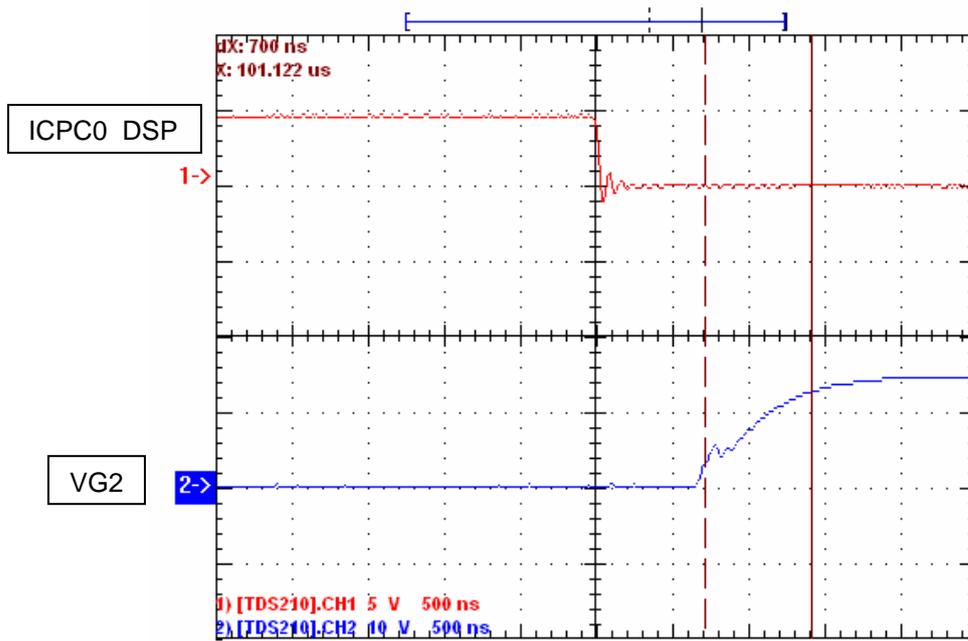


Figura 5.33. Rampa de disparo

En este periodo de la gráfica solo intervienen los valores t_{on} y t_r . El valor de t_{on} es de 722.22 ns y el tiempo t_r es de 700 ns. Sumando, el total es de 1422.22 ns, o sea, 1.422 μ s. El valor de t_r es muy superior al valor de catálogo.

Forma de onda VG2: de 1 a 0 lógico. Apagado de Transistor puerta VG2.

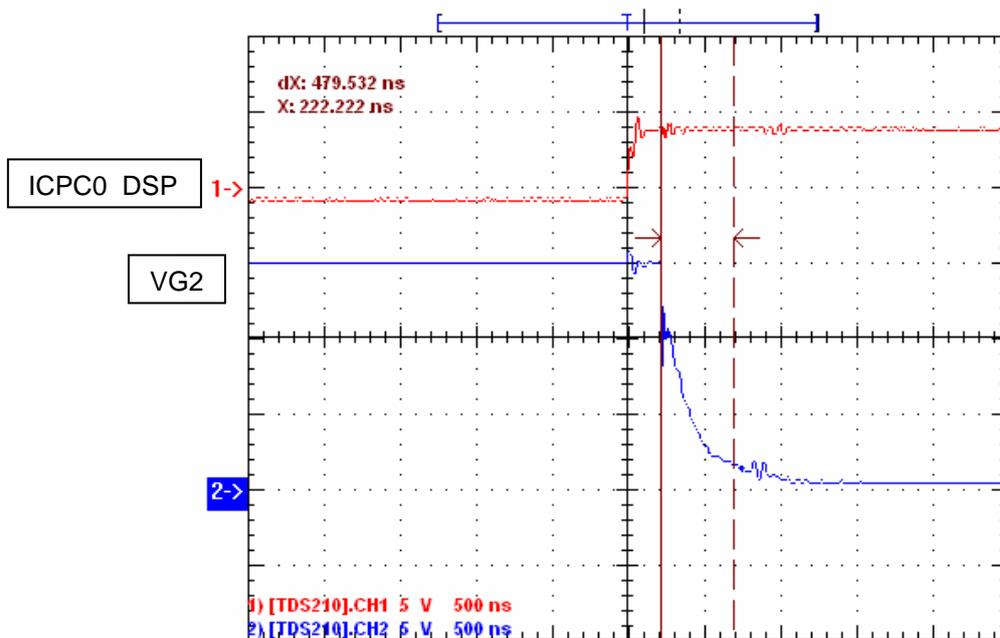


Figura 5.34. Rampa de apagado

El tiempo de t_{off} es 220 ns. El tiempo t_f es de 479.532ns. El tiempo total de apagado es de 699.532 ns.

Tiempos muertos entre VG1 y VG2

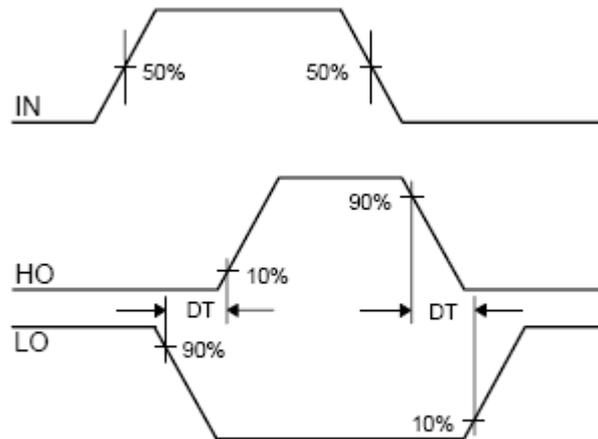


Figure 4. Deadtime Waveform Definitions

Figura 5.35. Tiempos muertos

encendido T1 y Apagado T2

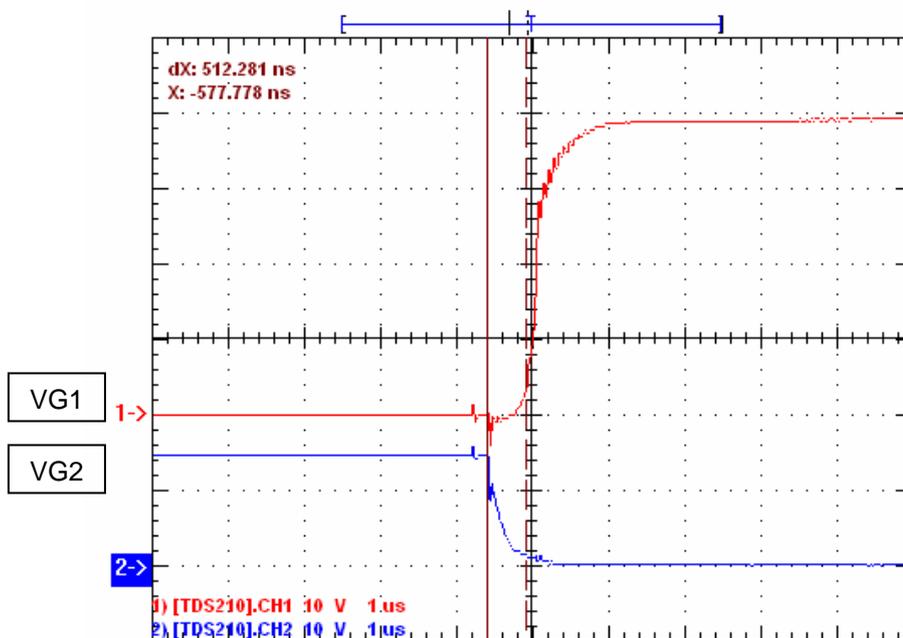


Figura 5.36. Tiempos muertos entre VG1 y VG2

El tiempo muerto introducido es de 512 ns. Se encuentra dentro del catálogo. El tiempo está medido entre el 90% de la tensión de la entrada a VG2(corte) y el 10% del VG1(encendido).

Apagado T1 y Encendido T2

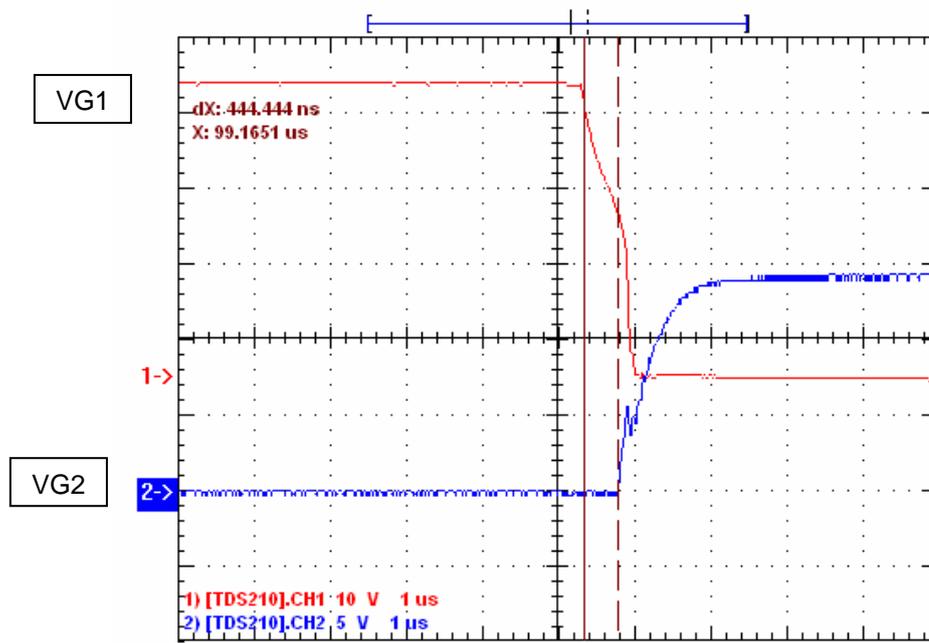


Figura 5.37. Tiempos muertos entre VG2 y VG1

El tiempo muerto aquí es de 444 ns.
La respuesta aquí es más rápida que en el anterior.

5.5 Inversor: Análisis y caracterización de la señal de salida al lazo

Para la medida de la forma de onda de la intensidad en el inversor es necesario aislar la alimentación del osciloscopio del resto de los circuitos. Al intentar medir las tensiones en la resistencia shunt se produce una derivación de corriente a través de la pinza de masa del osciloscopio a tierra, produciendo la descarga de uno de los condensadores a tierra y la posterior rotura de los fusibles de protección. Como se puede apreciar en el esquema adjunto, la carga, situada entre los puntos VS y VC, no está conectada a masa por lo que cualquier conexión de la masa de la sonda a cualquiera de los mencionados puntos cortocircuita ese punto a masa. Estando aislada la masa de la sonda de la tierra del circuito elimina este fenómeno indeseado.

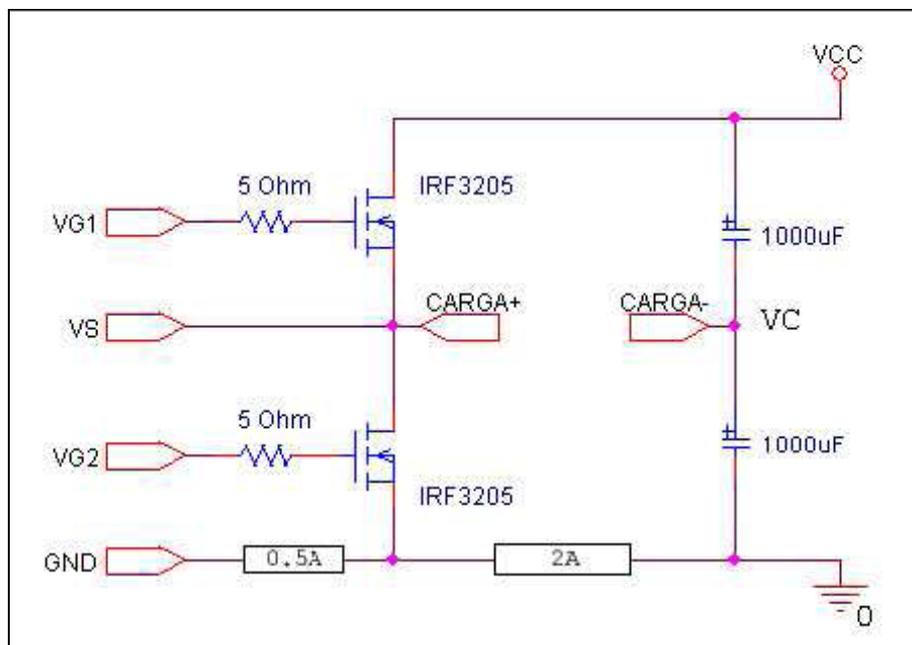


Figura 5.38. Inversor

La señal medida en la carga, entre Vs y Vc, y la resistencia entre inductor y resistencia y Vc

Para la medida se procede a realizar la siguiente conexión de las sondas:

- Para el canal 1 se conecta el terminal de la sonda a Carga+, conectando la masa de la sonda al terminal Carga-.
- Para el canal 2 se conecta el terminal de la sonda a la resistencia shunt+, conectando la masa de la sonda al terminal Carga-.

Con ello, teniendo en cuenta que el osciloscopio debe estar aislado del circuito por medio de un transformador, se puede realizar las medidas con seguridad al tener las masas aisladas.

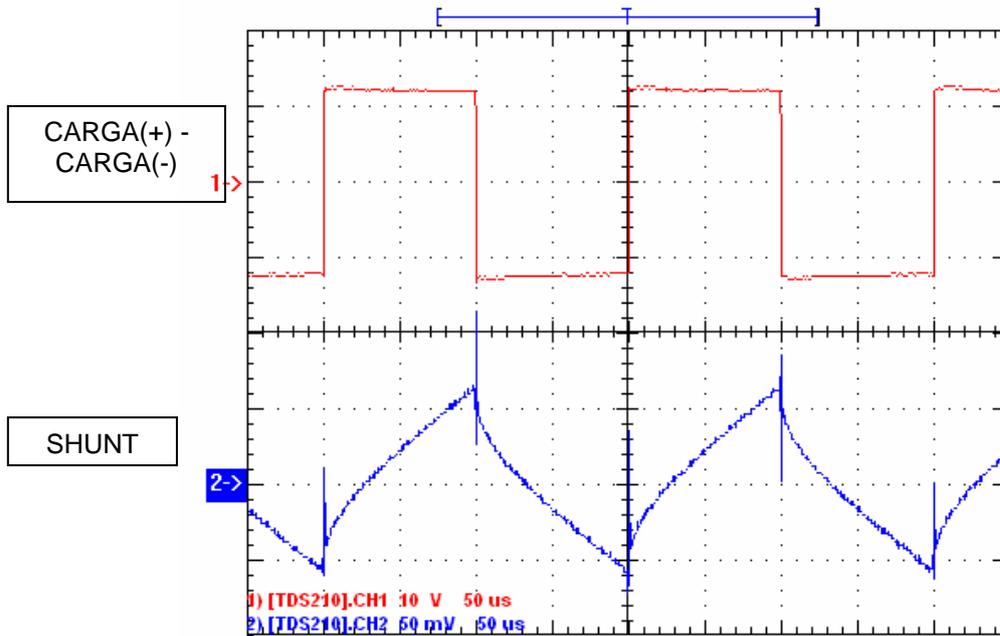


Figura 5.39. Mediciones en la resistencia Shunt

Para la figura adjunta, la tensión de pico a pico para toda la carga (bobina y resistencia shunt) es de 26,4 V (canal 1) y para la resistencia shunt es 123 mV_{PP}, eliminando para esta medida los picos de tensión, debido a las conmutaciones. Sin eliminar las conmutaciones tenemos 188 mV_{PP}.

La tensión RMS es de 12,3 V (canal1) y 36,6 mV (canal2) respectivamente. La tensión media es 79.5mV para canal 1 y -2.1mV canal 2. Esta tensión media indica que aparece una componente de continua en nuestra salida de onda. Esta componente de continua podría estar relacionado con la tensión de estabilización de los condensadores, pues aunque en teoría debería estar a 12 voltios, posteriores análisis en simulación con Spice han demostrado que esa tensión es muy próxima habiendo en un condensador una tensión algo ligeramente superior al otro. Esta diferencia es la que se introduce en la onda de salida. Para esta onda si comparamos la tensión de 123 mV_{PP}, al dividir nos quedamos en 61.5 mV_{PP} por lo que tenemos un desplazamiento del 3% aproximadamente. De todas formas es difícil precisar este error, pues aparecen unos picos de tensión debido a las conmutaciones de los transistores que dificultan esta medida. Realizando diversas medidas he comprobado que esta tensión offset es variable, por lo que esta, de existir, debe de ser pequeña, casi despreciable.

En la anterior medida no se encontraba conectado el circuito de lectura de la señal de lazo referente al adaptador de señal del lazo. Ahora se va a realizar las medidas de la onda pero con el circuito de medida de la señal del lazo conectado. Con esta conexión el inversor estará conectado al exterior por medio del driver, como señal de entrada y al adaptador de señal, como señal de salida.

Con la tensión aplicada y el circuito conectado, la forma de onda es similar. Se toma lectura de la entrada y salida en diferentes pantallas debido a la

imposibilidad de tomarlas juntas debido al problema de las masas antes descrito, por lo que las referencias de las medidas son diferentes. Las sondas no tienen conectadas las masas entre sí.

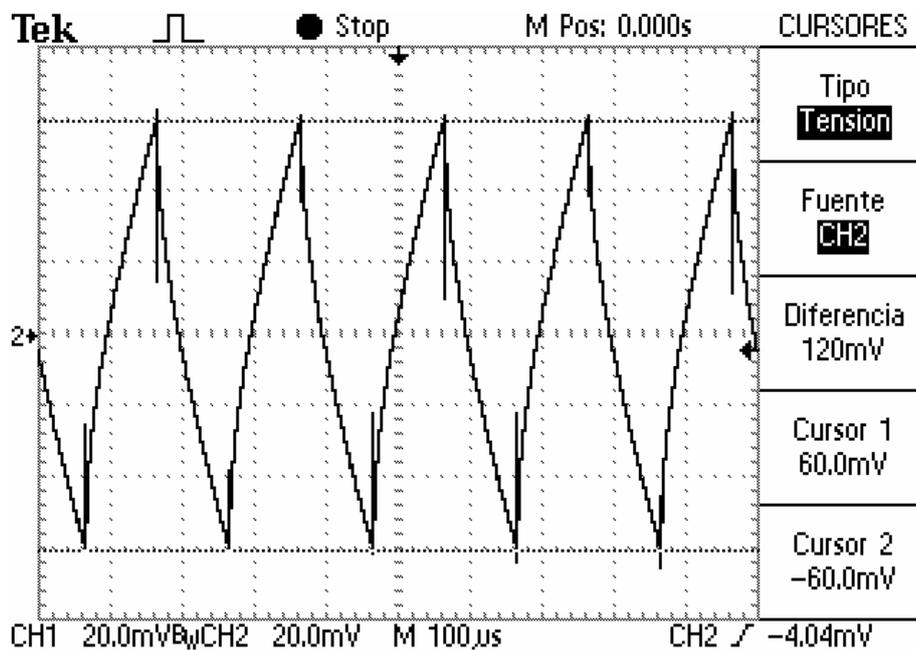


Figura 5.40. Lectura shunt

Esta es la lectura de la resistencia shunt, conectando la sonda del canal 1 a dicha resistencia, teniendo aislado la masa del resto del circuito. La conexión se realiza con el mismo protocolo utilizado en la anterior medida. Como se puede observar la tensión de pico a pico es de 120 mV. La lectura presenta simetría frente al eje X, eje horizontal. En esta lectura no se aprecia offset. La señal a tenido que filtrarse con el osciloscopio x16 para tener una lectura clara.

Para la lectura de la salida del primer subcircuito amplificador del adaptador de señal del lazo, la conexión de la sonda es diferente. En esta ocasión la sonda 1, canal 1, está conectada a la patilla 6 del amplificador operacional y su masa a la masa del circuito de adaptación de señal del lazo. Aquí no es preciso tener aislado el osciloscopio, la masa del circuito está conectada a la masa del conjunto de circuitos. De todas formas, es preferible tener aislado el osciloscopio por el peligro que representa si, por error, se realiza una medida en la carga del inversor estando conectadas todas las masas a un mismo punto.

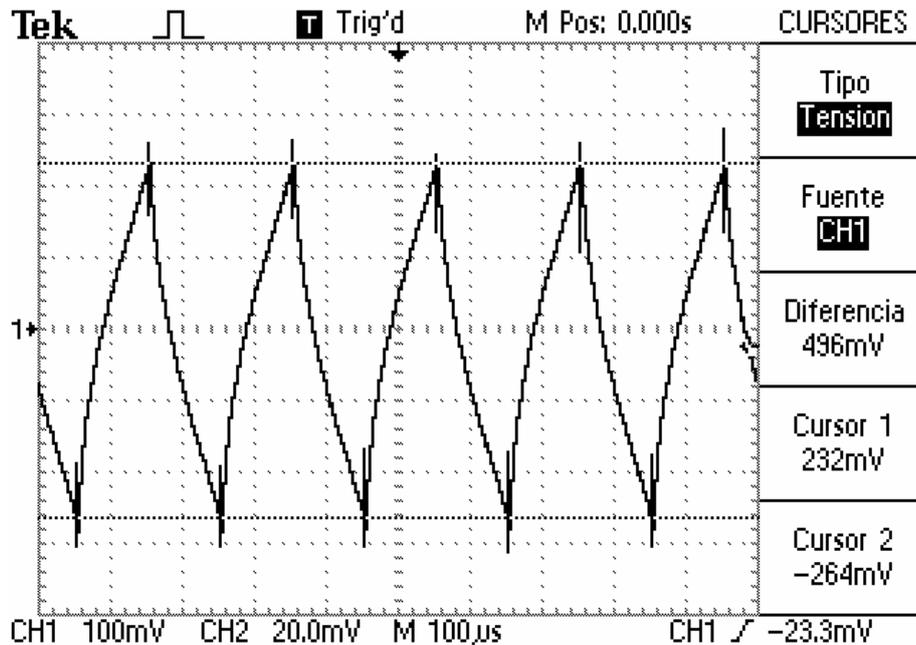


Figura 5.41. Lectura shunt

La señal aquí representada está invertida respecto a su original, aunque no se aprecie en la captura. Esto es debido a la amplificador diferencial que invierte la señal de entrada.

En esta gráfica, al visionarse la señal y compararla con las señales anteriores, se aprecia que la señal está amplificada. La amplificación es aproximada 4 veces mayor, la entrada al amplificador es de 120 mV_{PP} y la salida del mismo de 496 mV_{PP}. Ahora se encuentran diferencias al existir una componente de continua, un desplazamiento negativo de la tensión en 16 mV. Al ser sumado a la tensión de 2.5 V de la entrada del segundo operacional, se encuentra un offset de 2.516 voltios. Si se compara estos 16 mV con los $496/2=248$ mV, el error es del orden de 6% del voltaje. Pero este desplazamiento tiene otro inconveniente, pues además la onda al elevar esa tensión, respecto al origen, estamos introduciendo un pequeño adelanto en la señal. El adelanto medido en el osciloscopio es aproximado a 4 µs.

Con esto se da por terminado la caracterización del circuito y las pruebas de las formas de onda.