



Experiencia 2: Sistema de transmisión por canal infrarrojo

3 Sesiones

1. Objetivos

Esta experiencia busca que el alumno logre aplicar conceptos de acondicionamiento de señales en un problema práctico, la modulación y demodulación de una señal PWM transmitida a través de un enlace infrarrojo.

Lea **muy bien** esta guía antes de la sesión de laboratorio, ya que hay partes que deben ser desarrolladas previamente.

2. Marco Teórico

Cada etapa de esta experiencia cuenta con un trabajo previo que es necesario para poder desarrollar el trabajo en el laboratorio. Si no completa este trabajo con anterioridad probablemente no alcanzará a terminar la experiencia en el tiempo provisto. Los gráficos, ecuaciones y análisis realizados en este trabajo deben ser incorporados en su informe.

Antes de comenzar la experiencia revise que posee todos los materiales necesarios y que su mesón de laboratorio se encuentra ordenado y libre de objetos que puedan dañar los equipos (principalmente líquidos). Recuerde calibrar ambas puntas del osciloscopio antes de realizar cualquier medición y de tener correctamente conectados todos los equipos. Si es necesario levante de tierra el o los equipos que correspondan.

2.1. Descripción general

La experiencia consiste en el diseño e implementación de un sistema de transmisión de audio por canal infrarrojo. La operación general del sistema es la siguiente: un transmisor modula una señal de audio con modulación PWM y la transmite por el aire mediante un LED infrarrojo, mientras que un receptor recibe la señal de audio mediante un fototransistor y la acondiciona para poder ser escuchada con audífonos.

El circuito transmisor deberá tener dos modos de operación: transmisión de audio externo y modo de pruebas. En el modo de transmisión de audio externo se utilizará una señal de audio proveniente de un teléfono celular, generador de señales, PC u otro, la cual

será digitalizada por la MSP430G2553, y transmitida a la tarjeta *Basys 3* mediante una comunicación serial de alta velocidad (115200 *baud*). En el modo de pruebas, se utilizará un oscilador sinusoidal generado localmente en la *Basys 3*, cuya frecuencia se deberá encontrar dentro del rango audible.

2.2. Transmisor PWM

2.2.1. Esquema de modulación

Un esquema común para la implementación de modulación PWM es comparar la señal a modular con un tren de rampas (portadora). En la figura 1 se muestra un esquema simplificado de este concepto.

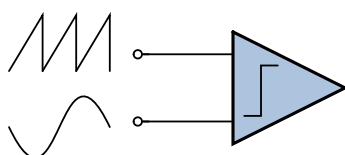


Figura 1: Diagrama modulación PWM.

A modo de ejemplo en la figura 2 se muestra una señal sinusoidal de entrada y el tren de rampas utilizado como portadora. En la figura 3 se muestra la salida resultante al comparar ambas señales junto con la señal de entrada.

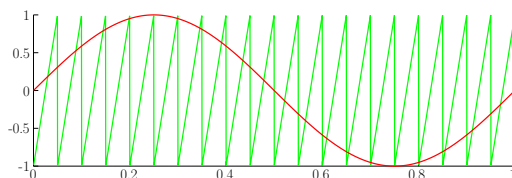


Figura 2: Señal de entrada y tren de rampas.

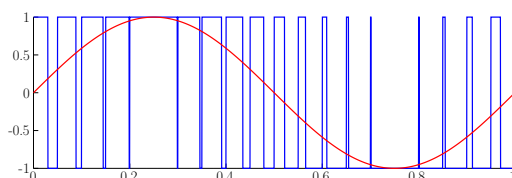


Figura 3: Señal de entrada y señal modulada PWM.

Al analizar el gráfico de la figura 3 podemos notar que la información de amplitud de la señal de entrada queda codificada en el ancho de pulso de la señal de salida. Debido a esto la amplitud de la señal modulada no contiene información de la amplitud de la señal de entrada. Esto hace atractivo este esquema de modulación para su uso con un enlace infrarrojo, ya

que el enlace presenta muchas no idealidades que producen que la señal recibida no tenga una amplitud constante.

2.2.2. Detalles de implementación

A continuación se especifican los detalles sobre una implementación posible para el transmisor. No es obligación guiarse por el diseño aquí propuesto para la implementación en FPGA, pero la funcionalidad deberá ser equivalente.

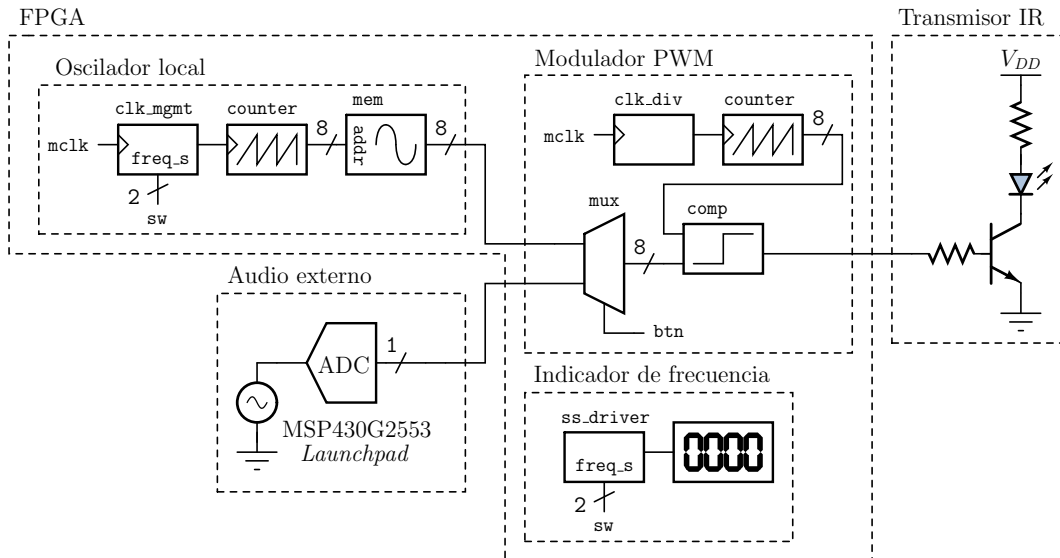


Figura 4: Diagrama de bloques del transmisor PWM.

Consideremos el diagrama de bloques de la figura 4. De manera general, el circuito se divide en tres partes: la señal de audio, ya sea externa o generada localmente, el modulador PWM y el circuito transmisor infrarrojo. A continuación se explican las distintas partes del diagrama con más detalle:

- **Audio externo:** Audio generado por una fuente externa, como un teléfono celular o un PC. El audio es muestreado por el ADC de la tarjeta MSP430G2553 y conectado a la FPGA para su procesamiento.
- **Oscilador local:** El oscilador local genera una señal sinusoidal cuya frecuencia se encuentra dentro del rango audible ¹.

En la memoria `mem` es de 256x8 (256 palabras de 8 bits cada una), y guarda un período completo de una señal sinusoidal de 8 bits. La memoria recibe de entrada una señal

¹Típicamente definido entre los 20 Hz y los 20 kHz.

que representa la dirección que se desea leer (`addr`) y de salida entrega la muestra que se encuentra en dicha dirección.

La memoria se recorre muestra por muestra con el contador `count` que cuenta a frecuencia variable, la que define la frecuencia de la señal sinusoidal de salida. A modo de ejemplo, si se cuenta a una tasa de 1 kHz, significa que se recorren 1000 muestras de la memoria por segundo, por lo que la frecuencia de la señal sinusoidal de salida será $1000/2^8 \approx 3.9$ Hz.

La tasa de conteo del contador se define mediante el divisor de reloj `clk_mgmt` que divide la frecuencia del reloj interno de la FPGA. Con dos switches de la tarjeta *Basys* se configura el módulo `clk_mgmt` para elegir entre las cuatro frecuencias posibles a transmitir.

- **Modulador PWM:** El modulador PWM recibe señales de audio de 8 bits de dos fuentes, y selecciona una mediante el multiplexor `mux` controlado con un switch de la tarjeta *Basys*.

En paralelo, el modulador genera una señal triangular digital (el contador `count`) de 8 bits, cuya frecuencia se encuentra definida mediante el divisor de reloj `clk_div` que define la frecuencia a la que se cuenta.

Utilizando el esquema de modulación descrito en la sección anterior, ambas señales se comparan en el módulo comparador `comp` para generar la señal modulada PWM.

- **Indicador de frecuencia:** El indicador de frecuencia debe mostrar la frecuencia de la señal sinusoidal que se transmite en el modo de pruebas. La frecuencia que se muestra está controlada por los mismos switches que controla el módulo `clk_mgmt` en el oscilador local.
- **Transmisor IR (infrarrojo):** El transmisor infrarrojo consiste en un LED infrarrojo controlado con un driver de LED. Este permite convertir el valor de voltaje de la señal PWM en un valor de corriente, de modo de replicar la señal en el encendido y apagado en el LED infrarrojo.

2.3. Receptor PWM

En la figura 5 se muestra un diagrama de bloques de las diferentes etapas del sistema de recepción y demodulación que vamos a utilizar.

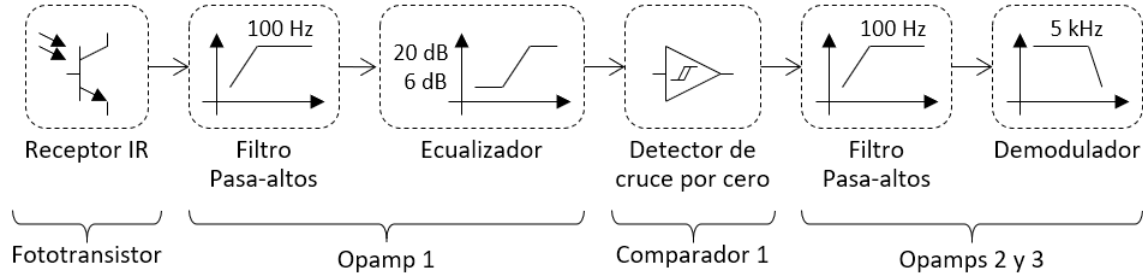


Figura 5: Diagrama de bloques del receptor y demodulador.

Su trabajo consiste en implementar cada etapa y probar el sistema de recepción completo en conjunto con el sistema de transmisión.

2.3.1. Descripción de las Etapas

1. En la figura 6 se muestra el circuito utilizado para convertir una señal de luz en una señal de voltaje. Cuando la base del transistor se ilumina aumenta su conducción, lo que permite circulación de corriente a través de la resistencia de carga R_1 . Como el transistor posee una capacitancia interna, se forma una red RC pasa bajos que limita el ancho de banda de la señal de entrada. Para prevenir esto es conveniente utilizar una resistencia de carga pequeña, sin embargo, esto genera un aumento de la corriente que circula por el fototransistor.

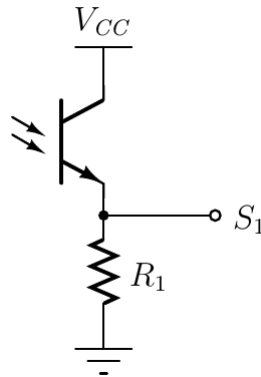


Figura 6: Circuito de recepción IR.

2. El fototransistor que se utiliza en el laboratorio no solo es sensible a la luz infrarroja del transmisor, debido a esto en el circuito de recepción va a aparecer ruido proveniente

de la luz ambiental y otras fuentes. El objetivo del filtro pasa altos presente en la figura 7 es eliminar parte de este ruido. Considere una frecuencia de corte de 100 Hz para cumplir este objetivo.

En la misma figura se muestra una implementación de un ecualizador con ganancia que amplifica en mayor medida las frecuencias altas, con el objeto de compensar el ancho de banda limitado del fototransistor. Dicho ecualizador está compuesto de R_3 , R_4 , R_5 y C_2 . Según se muestra, la ganancia en bajas frecuencias es de 6 dB, mientras que en alta frecuencia es de 20 dB. Ud. deberá escoger adecuadamente el valor del capacitor C_2 de manera de optimizar la ecualización en función de las características del transistor utilizado. Inicialmente puede usar algún capacitor en el rango de 1 a 10 nF.

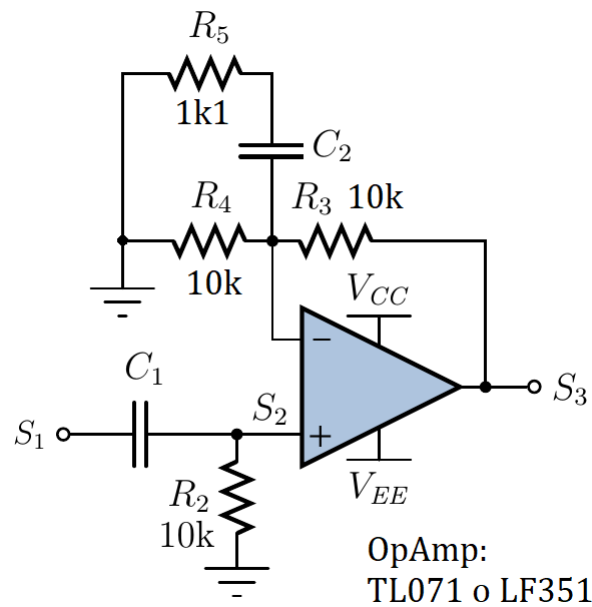


Figura 7: Filtro pasa altos y ecualizador con ganancia.

3. Cuando se estudió las propiedades de la modulación PWM, se hizo énfasis en que la información de la señal transmitida no se encuentra en la amplitud de la señal modulada, sino en sus cruces por cero. Sin embargo, como se mostró previamente, la amplitud de la señal recibida varía con la distancia del transmisor, por lo que si se utilizara directamente esta señal en el circuito demodulador, la amplitud de la señal de demodulada cambiaría si el transmisor se mueve. Para prevenir este problema, se utiliza un circuito detector de cruces por cero, el cual tiene como salida una señal de amplitud constante con la misma información de cruces por cero de la señal de entrada. En la figura 8 se puede ver un gráfico que explica este concepto.

Para implementar el detector de cruces por cero se puede utilizar el circuito de la figura 9. La salida de este circuito tiene dos valores posibles si la señal de entrada en el

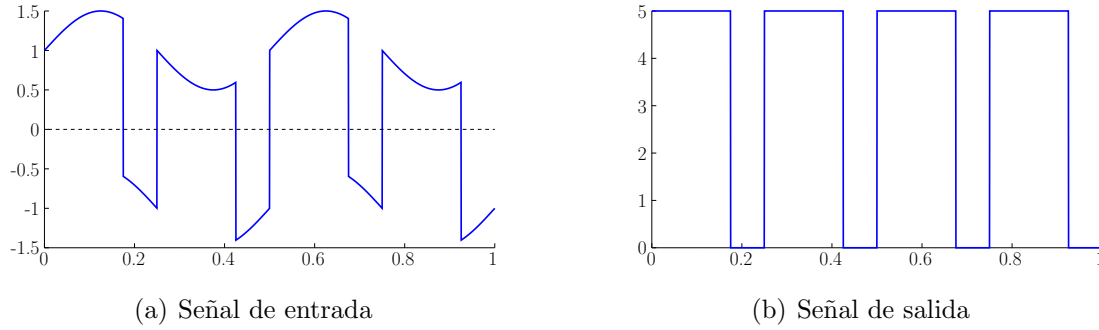


Figura 8: Ejemplo detector cruces por cero.

terminal (+) se encuentra por sobre o por debajo de la señal de referencia del terminal (-). El potenciómetro en el circuito se utiliza para ajustar el nivel de referencia que determina el voltaje exacto del cruce por cero. En la práctica, este control es útil para compensar cualquier *offset* proveniente de la etapa anterior.

Se recomienda usar un comparador de voltaje LM311 o bien LM393 (este último es doble). Estudie cuidadosamente la hoja de datos del comparador utilizado y recuerde usar una resistencia de *pull-up* en la salida.

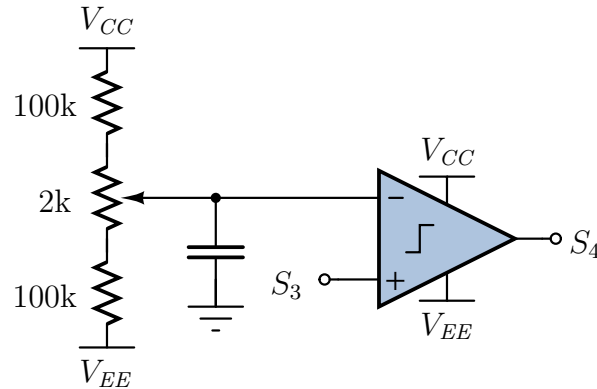


Figura 9: Implementación circuital de detector de cruces por cero.

4. Dependiendo de los valores que toma la salida del detector de cruces por cero, puede ocurrir que esta señal tenga un valor DC. Para eliminar dicho valor se deberá utilizar un capacitor de desacople entre el detector de cruces por cero y la etapa de demodulación².
5. En la figura 10 se muestra el circuito para demodular la señal PWM. Éste consiste en un filtro pasabajos de tercer orden de dos etapas. La primera etapa consiste en un

²Escoja un valor adecuado para dicho capacitor según la frecuencia de corte del filtro pasa-altos resultante, idealmente cercano a 100 Hz.

integrador con pérdidas. Se recomienda calcular los componentes de esta etapa para implementar un filtro Butterworth de tercer orden con frecuencia de corte en 5 kHz. Se recomienda usar un OpAmp doble, tipo TL072 o LF353. Note el uso de los capacitores C7 y C8 para desacoplar las tensiones de alimentación.

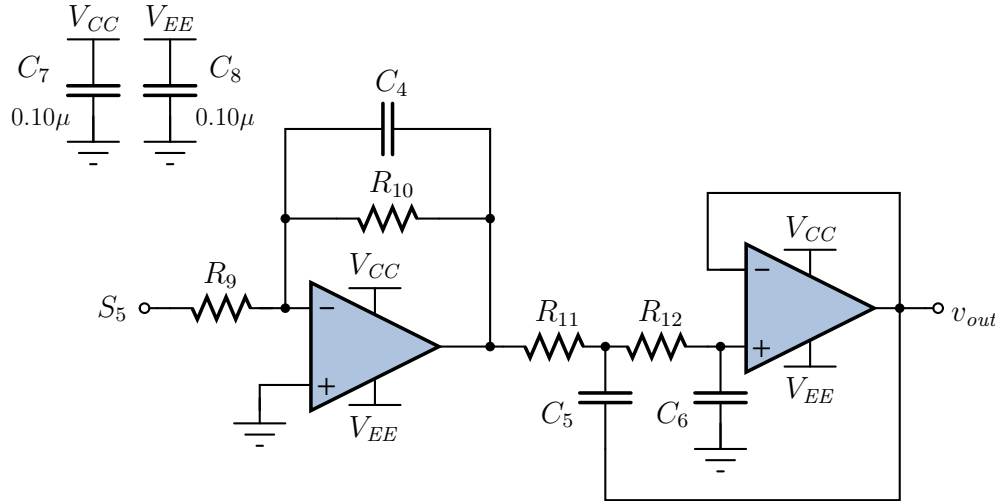


Figura 10: Circuito demodulador PWM.

3. Desarrollo de la Experiencia

3.1. Trabajo previo

3.1.1. Transmisor PWM

Esta parte del trabajo previo y la correspondiente del receptor son independientes. Puede destinar parte de la primera sesión para desarrollar el trabajo previo con ayuda del profesor o los ayudantes.

1. Utilizando algún programa de computación científica como MATLAB, Scilab u Octave, genere la forma de onda de la señal sinusoidal. Específicamente, genere un ciclo de 256 muestras ³ con amplitud entre 0 y $2^8 = 256$. Redondee los valores obtenidos al entero más cercano y genere un módulo para su implementación en FPGA de la manera que le parezca más conveniente.
2. Considere que cuenta con un reloj maestro único para su implementación en Verilog. Describa al menos dos maneras distintas de dividir la frecuencia del reloj en Verilog. Comente acerca de las ventajas y limitaciones de cada método.

³Debe procurar que no haya saltos en la señal al repetir cíclicamente los valores de los vectores generados.

3. Implemente los módulos del oscilador local en Verilog (un ejemplo de implementación está en la figura 4). Sus módulos deben estar diseñados de manera que las frecuencias de salida del oscilador se encuentren alrededor de 220 Hz, 391.99 Hz, 554.36 Hz y 739.98 Hz. No es necesario que genere exactamente estas frecuencias. Llegue al valor más cercano que pueda y explique por qué el método escogido no permite llegar exactamente a la frecuencia deseada.
4. Calcule la frecuencia a la que debe contar el contador del modulador PWM para generar una señal triangular de 25 kHz, considerando que el contador es de 8 bits. Ésta es la frecuencia que debe utilizar para su implementación en FPGA. En caso de que no le sea posible llegar exactamente a esa frecuencia, explique la razón.
5. Investigue sobre el modo '*Repeat single channel*' de la tarjeta MSP430G2553 *Launchpad*.
6. Calcule el valor de la resistencia R_C del driver PWM de la figura 11 para obtener una buena amplitud en la señal de salida resguardando márgenes conservadores (50-80 %) para la corriente en el LED y el transistor (véase *datasheet* de IR333A). ¿Qué utilidad tendría agregar una capacitancia pequeña (del orden de unos 20 pF) en paralelo con R_B ?

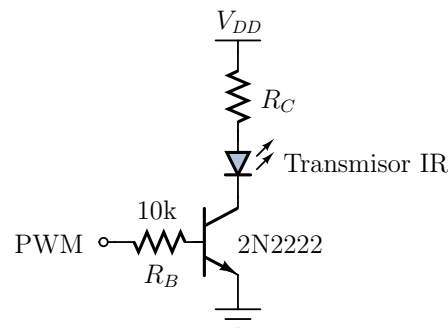


Figura 11: Driver para manejar LED con señal PWM.

7. Implemente el circuito de la figura 12 en LTSpice. Utilice fuentes de voltaje ideales para generar la señal de audio (sinusoidal) y la señal triangular. Considere una señal de entrada sinusoidal de 1 kHz y una señal triangular de 25 kHz, ambas con la misma amplitud. Puede utilizar un comparador ideal, pero asegúrese que su salida sea de amplitud 3.3V.
 - (a) Realice una simulación transiente y grafique la señal de entrada sinusoidal, la señal a la salida del comparador y la señal en el colector del transistor. Comente sus observaciones.
 - (b) Repita el inciso anterior, pero ahora con la señal sinusoidal de amplitud 70 % la amplitud de la señal triangular. Comente sus observaciones.

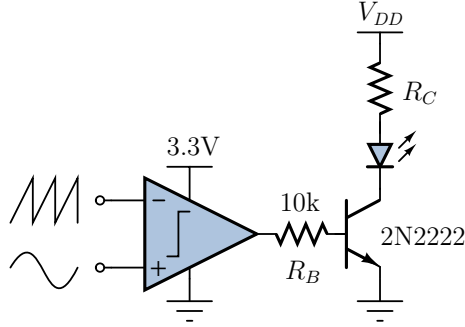


Figura 12: Circuito para simulación en LTSpice.

3.1.2. Receptor PWM

El trabajo previo de esta sesión debe estar terminado durante la segunda sesión.

1. Considere el esquema de la figura 6. En base a supuestos simples y a los datos del fototransistor presentes en la tabla 1, calcule la resistencia de carga R_1 de modo de mantener márgenes seguros de corriente (50-80 % de su valor máximo).

Parámetro	Valor máximo	Unidades
V_{ce}	30	V
V_{ec}	5	V
I_c	20	mA

Tabla 1: Valores máximos del fototransistor.

2. Explique el concepto de producto ganancia-ancho de banda de un amplificador operacional. ¿Por qué no es conveniente usar OpAmps tipo LM741 en este circuito?
3. Determine la función de transferencia del filtro pasa-altos y ecualizador con ganancia de la figura 7, con sus respectivas frecuencias de transición. Calcule C_1 para obtener una frecuencia de corte de 100 Hz. Utilice un valor de 1 nF para C_2 con el objeto de simular. Recuerde que el valor definitivo de dicho capacitor deberá ser encontrado de manera empírica.
4. Determine la función de transferencia del filtro demodulador de la figura 10. Calcule el valor de R_9 , R_{10} y C_4 para que esta etapa tenga una ganancia $|A| = 1$ y una frecuencia de corte en 7 kHz. Calcule los valores de R_{11} , R_{12} , C_5 y C_6 para que la segunda etapa tenga una frecuencia de corte en 10 kHz. Nota: la respuesta combinada de estas dos etapas debe corresponder a un filtro pasa-bajos tipo Butterworth de tercer orden.
5. Mediante una simulación en LTSpice grafique el diagrama de Bode del circuito demodulador de la figura 10.

3.2. Trabajo en el laboratorio

3.2.1. Transmisor PWM

1. En la tarjeta *Basys 3*, implemente el oscilador local de prueba, el modulador PWM con una portadora diente de sierra de frecuencia 25 kHz, y genere una salida PWM. Observe esta señal con el osciloscopio y registre la forma de onda. ¿Qué sucede al variar la frecuencia de la señal de prueba? Comente sus resultados.
2. Conecte el driver del LED infrarrojo a la salida PWM de la tarjeta *Basys 3*, utilizando los valores de los componentes calculados previamente. Utilizando la misma onda sinusoidal del ejercicio anterior para modular, compare la señal en la entrada del driver y en el colector del transistor NPN. Agregue un capacitor pequeño (de unos 20 pF) en paralelo con la resistencia R_B y vea si puede mejorar el tiempo de encendido y apagado del transistor.
3. Escriba un código para la tarjeta MSP430G2553 con el fin de utilizar una de sus entradas de ADC. Utilice el modo '*Repeat single channel*' para el ADC. Como el ADC de la tarjeta es de 10 bits, tendrá que dividir el resultado de la medición por 4 (*shift right* en 2 posiciones) para acomodarla a 8 bits. Finalmente, implemente un esquema de transmisión serial para enviar el valor de 8 bits hacia la FPGA. Se recomienda usar un bitrate alto, por ejemplo 115200 baud, de manera tal de transmitir unas 10.000 muestras por segundo.
4. Use el generador de funciones para aplicar una señal sinusoidal de 1 kHz a la entrada del ADC. Ajuste la amplitud de la señal sinusoidal a la mitad del rango completo del ADC. Registre la forma de onda a la salida de la tarjeta *Basys 3*. ¿Qué sucede al variar la amplitud de la señal de entrada? ¿Qué sucede al variar la frecuencia? Comente sus resultados ⁴.

3.2.2. Receptor PWM

Para el desarrollo de esta sub-sección es necesario que usted tenga el circuito transmisor armado y funcional en un protoboard separado.

1. En un protoboard arme el circuito de la figura 6 con los valores calculados en el trabajo previo. Acerque el circuito transmisor al fototransistor y con el osciloscopio mida su salida. Acerque y aleje el transmisor y anote sus observaciones.
2. Añada a su circuito receptor, el filtro pasa altos con ecualizador de la figura 7 con los valores calculados en el trabajo previo. Utilizando la misma configuración transmisor/receptor usada en el paso anterior mida con el osciloscopio el voltaje a la salida del filtro. Ajuste el valor de C_2 de manera que los pulsos ecualizados a la salida del circuito tengan el menor tiempo de subida/bajada posible y sean lo más cuadrados posibles.

⁴Tenga precaución en los voltajes de entrada del ADC de la tarjeta MSP430G2553

3. Arme el circuito para detectar cruces por cero. Conecte la entrada de este circuito con la salida de la etapa anterior (filtro pasa altos con ecualizador). Utilizando la misma configuración anterior mida con el osciloscopio el voltaje a la entrada y salida del detector de cruces por cero. Repita lo anterior variando la distancia entre el emisor y el receptor. Comente sus resultados.
4. Finalmente arme el circuito demodulador con los valores calculados en el trabajo previo y conéctelo a la salida del detector de cruces por cero. Tome en cuenta que debe desacoplar el valor DC entre estas dos etapas utilizando un capacitor en serie de un valor apropiado. Repita el ejercicio de analizar la salida de esta etapa con el par transmisor/receptor.
5. Varíe la distancia del transmisor y calcule la máxima distancia con la que el enlace sigue en funcionamiento.
6. Utilice el generador de funciones en conjunto con el transmisor en modo de operación con señal externa. Con el transmisor y el receptor a una distancia moderada, calcule el ancho de banda del enlace variando la frecuencia de la señal transmitida.
7. Pruebe variando la forma de la señal modulada, puede utilizar el generador de señales o una fuente de audio. Utilizando ambos canales del osciloscopio compare la forma de onda en la entrada y la salida del sistema completo.
8. Conecte audífonos a la salida de su circuito (realice el acondicionamiento que sea necesario). Transmita una señal de audio y escuche la señal recibida. ¿Existe pérdida de calidad apreciable en la señal de audio al variar la distancia entre transmisor y receptor? Comente. Nota: es posible que tenga que agregar una resistencia serie del orden de 1 kohm con los audifonos para evitar sobrecargar la salida del OpAmp.

3.3. Demostración del Sistema

Para finalizar la experiencia, debe realizar una demostración del sistema completo: muestreo y transmisión de audio externo, modulación y transmisión PWM, recepción, ecualización, detección y demodulación del audio transmitido, siguiendo las siguientes especificaciones.

1. Señal de audio externo
2. Salida de audio por medio de audífonos
3. Distancia de transmisión variable

4. Evaluación

Debe realizar un informe que documente toda la información que se pide explícitamente en la guía, que incluye las secciones “Trabajo previo” y “Trabajo en el laboratorio”. Apóyese con gráficos e imágenes que muestren su trabajo en el laboratorio. Su informe debe estar bien redactado, ordenado y sin faltas de ortografía. Incumplimiento de estos requerimientos básicos puede llevar a que su nota sea penalizada.