



# Diseño de un Modulador/Demodulador OOK con portadora y tasa de transmisión configurable para el estándar de baja frecuencia de dispositivos RFID

*Ing. Arnaldo del Risco Sánchez, Dr. Juan Carlos Cruz Hurtado*

## **RESUMEN / ABSTRACT**

Se presenta el diseño de un modulador/demodulador para dispositivos RFID, en el estándar de baja frecuencia, para valores comprendidos entre los 125 y 147 kHz, empleando la modulación de amplitud OOK. La modulación y demodulación es completamente realizada por *software* y es implementada en el *firmware* de un microcontrolador PIC18F4550. Como consecuencia de su diseño *software*, es posible configurar la frecuencia de la señal portadora y su tasa de transmisión, a través de registros dispuestos para cumplir tal objetivo. La relación que se establece entre la frecuencia portadora y la tasa de transmisión es un número natural, lo cual lo diferencia de los dispositivos comerciales disponibles, cuya relación es en potencias de dos. Para la simulación de los elementos teóricos propuestos, se utilizan los programas *ISIS 7* y *MATLAB 9*. Para la programación de los microcontroladores es empleado el compilador *c18* y el entorno de diseño *MPLAB*, ambos del fabricante *Microchip*.

Palabras claves: OOK, RFID, lector, etiqueta, portadora, tasa de transmisión.

*This paper presents the design of a RFID modulator/demodulator, in the low frequency standard for values between 125 and 147 kHz, using the amplitude modulation OOK. The modulation and demodulation is completely performed by software and is implemented in the firmware of PIC18F4550 microcontroller. Because its design by software, is possible setting the carrier frequency and the baud rate across configuration registers. The relationship established between the carrier frequency and baud rate is a natural number which differentiates it from the commercially available devices, whose relationship is in powers of two. The software *ISIS 7* and *MATLAB 9* are used for simulation. For programming the microcontrollers are used *c18* compiler and the IDE *MPLAB*.*

*Key words: OOK, RFID, reader, tag, carrier, baud rate.*

*Design of a Modulator/Demodulator OOK whit configurable carrier and baud rate for low frequency standard in RFID devices*

## INTRODUCCION

Un sistema de Identificación por Radio Frecuencia (RFID por su acrónimo en inglés), se compone de un lector (*reader*), una etiqueta (*tag*) y en algunos casos un programa de computadora procesador de datos (*middleware*); se trata de una tecnología que ha ido sustituyendo gradualmente otros sistemas de identificación, como por ejemplo, los basados en códigos de barras [1]. Como su nombre indica, un sistema RFID basa su funcionamiento en la identificación empleando ondas de radio frecuencia; las cuales son enviadas por el lector y a este estímulo responde la etiqueta, retornando una respuesta que identifica al objeto, persona o animal que la posee. Existen distintos tipos de etiquetas, las cuales se pueden clasificar según la fuente de energía que utilice para su alimentación. Las etiquetas pasivas emplean para energizar sus circuitos, el campo eléctrico que se genera a partir del campo magnético engendrado por lector. Las etiquetas activas poseen una fuente propia de alimentación, usualmente baterías y las etiquetas semipasivas poseen una fuente de alimentación propia, pero emplean el campo magnético del lector, al igual que las etiquetas pasivas, para dar respuesta al mismo [2].

Uno de los elementos claves en un sistema RFID, es la comunicación entre el lector y la etiqueta. Para lograr la comunicación se emplean modulaciones digitales, como ASK (*Amplitude Shift Keying*, por sus siglas en inglés), FSK (*Frequency Shift Keying*, por sus siglas en inglés), PSK (*Phase Shift Keying*, por sus siglas en inglés) y Modulación por Carga (*Load Modulation*) empleada en las etiquetas pasivas y semipasivas. La modulación ASK es una técnica de modulación digital, en la cual la información se encuentra modulada en amplitud [3]. La ecuación 1 muestra la definición de una función “f” la cual representa la señal modulada ASK, “g” es la onda moduladora y como portadora un seno de frecuencia “w”.

$$f(t) = \begin{cases} A \text{sen}(wt) , g(nT) = '1' \\ B \text{sen}(wt) , g(nT) = '0' \end{cases} \quad (1)$$

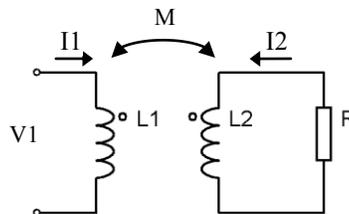
La modulación FSK es una modulación digital, donde los datos se encuentran modulados en frecuencia [3]. La ecuación 2 muestra la función “f” la cual representa una señal modulada FSK. La señal “g” es la moduladora y, como portadora se utiliza una senoide de frecuencia “w”, por lo que los valores “w1” y “w2” son valores de desplazamiento de frecuencia.

$$f(t) = \begin{cases} A \text{sen}((w + w_1)t) , g(nT) = '1' \\ A \text{sen}((w + w_2)t) , g(nT) = '0' \end{cases} \quad (2)$$

La modulación PSK es una técnica de modulación digital, en donde la información está modulada en fase [3]. La ecuación 3 representa la función “f” siendo esta una señal modulada PSK. Donde “g” es la onda moduladora y como señal portadora se utiliza una senoide de frecuencia “w”.

$$f(t) = \begin{cases} A \text{sen}(wt) , g(nT) = '1' \\ -A \text{sen}(wt) , g(nT) = '0' \end{cases} \quad (3)$$

La Modulación por Carga se basa en la perturbación que genera la etiqueta, al campo magnético generado por el lector; este fenómeno es modelado a partir de un circuito acoplado magnéticamente, mostrado en la Figura 1.



**Figura 1. Circuito Acoplado Magnéticamente, donde  $L_1$  y  $L_2$  constituyen el lector y la etiqueta respectivamente.**

La expresión que define el comportamiento del circuito acoplado magnéticamente (Figura 1), es mostrada en la ecuación 4. En ella se plantea la relación que existe entre la tensión en la bobina transmisora ( $V_1$ ) y la corriente que circula por el circuito receptor. Nótese que si R es un abierto, implica que no hay circulación de corriente por  $L_2$ , mientras que para un valor de R aparece una corriente  $I_2$ . Precisamente en esta relación se basa la modulación por carga, al cambiar los valores de la resistencia R,

varía la corriente que circula por esta y como consecuencia cambia la tensión en el inductor  $L_1$  [4]. Este efecto es utilizado por la etiqueta pasiva o semipasiva para enviar los datos al lector. Los valores de  $R$  son ajustados en función del índice de modulación necesario.

$$\begin{aligned} V_1 &= j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \\ 0 &= (j\omega L_2 + R) I_2 + j\omega M I_1 \end{aligned} \quad (4)$$

## MODULADOR OOK

La modulación OOK, *On Off Keying*, es un caso especial de la modulación ASK. El circuito modulador en OOK se comporta como un interruptor. Esto significa que, un nivel lógico genera una onda de frecuencia “ $w$ ” y en caso contrario no oscila. La ecuación 5 muestra la función “ $f$ ” que se corresponde con una señal modulada OOK, “ $g$ ” es la señal moduladora, “ $a$ ” y “ $b$ ” (‘0’ ó ‘1’ lógico) son los posibles estados que puede tomar “ $g$ ” y “ $w_0$ ” es la frecuencia de la señal portadora. En la Figura 2 se muestra una señal modulada en OOK, con frecuencia portadora de 125 kHz y tasa de transmisión de 7.8125 kb/s. La abscisa en la gráfica de la Figura 2 representa la variable tiempo en unidades de segundos, mientras que la ordenada, nombrada como “ $f$ ” se corresponde con la señal modulada en OOK cuya amplitud está dada en Volt.

$$f(t) = \begin{cases} A \sin(w_0 t) & , g(nT) = a \\ 0 & , g(nT) = b \end{cases} \quad (5)$$

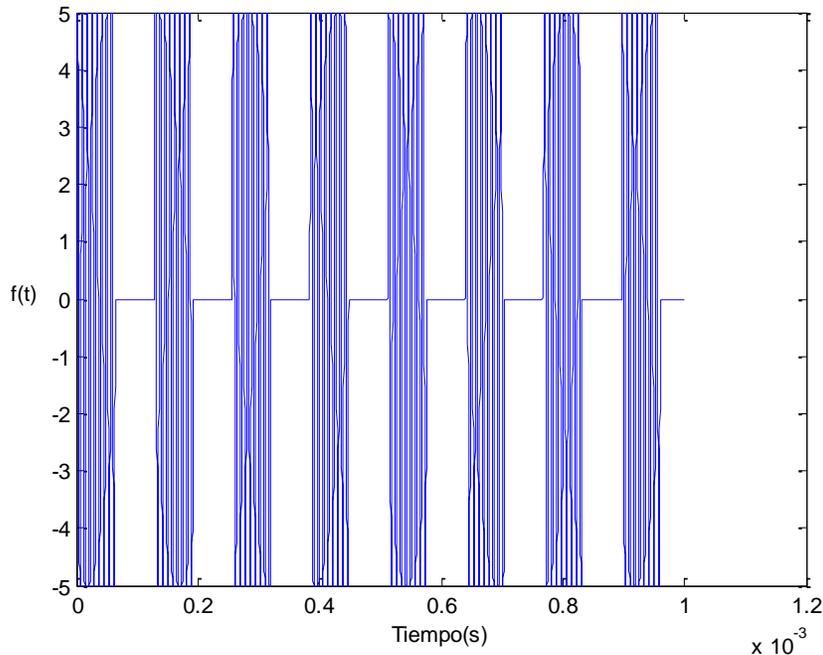


Figura 2. Modulación OOK

Para implementar el circuito modulador OOK es empleado un microcontrolador PIC18F4550, del fabricante *Microchip*, este modulador tiene como característica principal su diseño completamente por *firmware*, sin utilizar ningún circuito modulador externo. El componente modulador OOK es parte de un sistema que maneja otras técnicas de modulación digital, el cual se encarga de realizar la modulación y demodulación de datos y la comunicación con una PC. La computadora almacena el *middleware* que gestiona los datos de las etiquetas. Algunos de los registros de configuración más importantes asociado al componente modulador

OOK son la frecuencia portadora (*carrier*) y la tasa de transmisión (*baud\_rate*). Poseer la capacidad de cambiar la frecuencia portadora y la tasa de transmisión, es de vital importancia si se pretende establecer comunicación con etiquetas RFID disponibles en el mercado. Dichas etiquetas poseen protocolos de comunicación variados, por lo que no se establece un valor de frecuencia común entre distintos fabricantes. En el caso de la tasa de transmisión en muchos dispositivos comerciales es configurable y toma valores cuyos períodos son múltiplos, en potencias de dos, del período de la señal portadora.

Para un modulador OOK con portadora y tasa de transmisión variables, las componentes de frecuencia de la señal modulada varían en función de los valores que se configuren, estas componentes de frecuencia se pueden determinar al realizar un análisis espectral de esta señal. Para ello se considera una portadora de frecuencia “ $w_0$ ” y como señal moduladora un tren de pulsos de frecuencia “ $w_d$ ”, el cual es el peor caso para el espectro de frecuencias de la señal modulada.

La señal modulada se expresa como

$$f(t) = g(t) \sin(w_0 t) \quad (6)$$

Donde “ $f$ ” es la señal modulada y “ $g$ ” la moduladora.

Aplicando la transformada de Fourier [5]

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \sin(w_0 t) e^{-jw t} dt \quad (7)$$

Donde según la fórmula de Euler [9]

$$F(w) = \frac{1}{2j} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{jw_0 t} e^{-jw t} dt - \frac{1}{2j} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-jw_0 t} e^{-jw t} dt \quad (8)$$

Finalmente en el dominio de la frecuencia la señal modulada viene dada por

$$F(w) = \frac{G(w - w_0) - G(w + w_0)}{2j} \quad (9)$$

De la ecuación 9 se observa que es necesario hallar el espectro de la señal moduladora, para completar el análisis espectral de la señal modulada. Se debe considerar que al ser “ $g$ ” un tren de pulsos binarios, su espectro es discreto. Las componentes de frecuencias se determinan empleando las series trigonométricas de Fourier [10].

$$g(t) \sim \frac{a_0}{2} + a_n \cos(nw_d t) + b_n \text{sen}(nw_d t) \quad (10)$$

Donde la componente de directa es

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) dt = \frac{A}{2} \quad (11)$$

Y los armónicos

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \cos(nw_d t) dt = \frac{2A}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \cos(n \frac{2\pi}{T} t) dt = 0 \quad (12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \text{sen}(nw_d t) dt = \frac{2A}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \text{sen}(n \frac{2\pi}{T} t) dt = \frac{A}{n\pi} (1 - \cos(n\pi)) \quad (13)$$

Finalmente la señal moduladora posee una componente de directa e infinitas componentes sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros e impares de la frecuencia “ $w_d$ ”.

$$g(t) \sim \frac{A}{2} + \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2A}{n\pi} \text{sen}(nw_d t), \quad n \text{ impar} \quad (14)$$

De las ecuaciones 9 y 14 se observa que el espectro de la señal modulada OOK, se corresponde con el espectro de la onda moduladora desplazada, en función de la frecuencia portadora hacia la izquierda y la derecha. Esto implica que mediante los registros de configuración del componente modulador OOK, el espectro de la señal modulada sufre cambios que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar la interfaz analógica y la antena (bobina) transmisora. En la Figura 3 se muestra el espectro de frecuencia de una señal modulada OOK, con frecuencia portadora de 125 kHz, tasa de transmisión de 7.8125 kb/s (equivalente a 3,90625 kHz) y amplitud de 5 V. La gráfica representada en la Figura 3 tiene como variable independiente la frecuencia, en unidades de radianes por segundos, y como variable dependiente la amplitud en Volt.

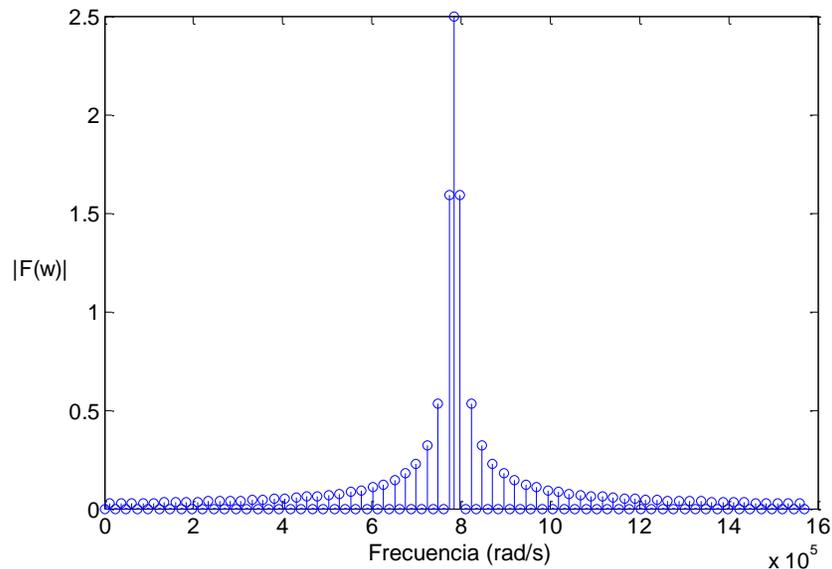


Figura 3. Espectro de Frecuencia de una señal modulada OOK

El espectro de la Figura 3 se corresponde con una señal portadora sinusoidal y una moduladora cuadrada. Se debe tener en cuenta que la salida modulada del microcontrolador es cuadrada, es decir la señal portadora es una onda cuadrada, lo cual implica que el espectro de la señal modulada tiene componentes en frecuencias, que son múltiplos enteros de la frecuencia portadora. La característica anterior se debe tener en cuenta a la hora de diseñar la interfaz analógica.

## DEMODULADOR OOK

Al ser la modulación OOK un caso particular de la modulación ASK, el circuito demodulador para una señal ASK puede ser utilizado para recuperar los datos modulados en OOK. Un circuito empleado para cumplir este objetivo es el detector de envoltura, mostrado en la Figura 4, donde  $V_{in}$  representa la tensión de entrada y  $V_o$  la tensión de salida. Este circuito se compone de un diodo que elimina la componente negativa de la señal modulada y un filtro pasa bajos que permite pasar solo las variaciones lentas de la señal, obteniéndose a su salida la envoltura que no es más que la señal moduladora [6].

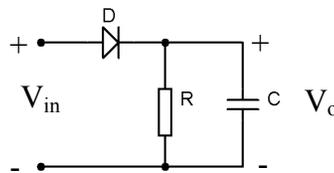


Figura 4. Detector de Envoltura

El Demodulador OOK implementado no emplea para recuperar los datos ningún circuito demodulador externo. Esta tarea es ejecutada en el *firmware* del microcontrolador. Se basa en las características de la señal modulada OOK, mostrada en la Figura 2. Si se configura la modulación OOK de tal manera que un uno lógico se asocia con oscilación y un cero lógico con un nivel de directa o "0" Volt, empleando un período de muestreo que coincida con la tasa de transmisión, se puede verificar la presencia o no de señal recuperando de esta forma los datos. Una característica de este demodulador es la necesidad de la sincronización con la señal modulada. El sincronismo se adquiere verificando el primer flanco de subida y a partir de medio período de la señal moduladora comenzar a muestrear, con una frecuencia igual a la tasa de transmisión. Esta forma de demodulación permite la re-sincronización durante cualquier instante de la comunicación, evitando retardos causados por la base de tiempo.

## INTERFAZ ANALÓGICA PARA LA MODULACIÓN

La interfaz analógica para el modulador OOK, se compone de un filtro y un amplificador de potencia. El filtrado tiene como objetivo convertir la señal cuadrada en una onda sinusoidal, teniendo en cuenta además que la portadora y la tasa de transmisión son variables y sus valores oscilan entre 125 y 147 kHz. Para la frecuencia de 125 kHz y una tasa de transmisión de 31.25 kb/s, lo cual se considera el peor caso pues es la mayor tasa de transferencia recomendable, se escoge una banda de paso de 32 kHz, con el objetivo de limitar el ancho de banda al primer armónico, quedando la frecuencia de paso mínima 93 kHz. Si se configura el modulador para una frecuencia de la portadora de 147 kHz y una tasa de transmisión de 36,75 kb/s, lo cual se corresponde con el peor caso para esta portadora, la frecuencia de paso máxima es de 184 kHz. La Figura 5 muestra la señal modulada en OOK filtrada para una frecuencia portadora de 125 kHz y tasa de transmisión de 31.25 kb/s. La gráfica mostrada en la Figura 5 tiene como abscisa el tiempo, en segundos, y como ordenada la amplitud de la señal modulada en Volt.

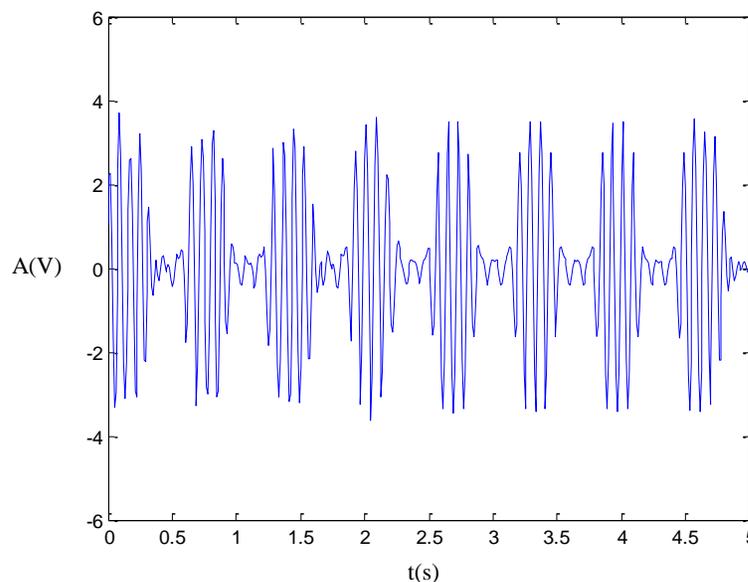


Figura 5. Señal modulada OOK con portadora de 125 kHz y tasa de transmisión de 31.25 kb/s

El amplificador de potencia se encarga de entregar la corriente necesaria a la bobina transmisora. El circuito de filtrado y amplificación es mostrado en la Figura 6. La bobina  $L_1$ , el capacitor  $C_1$  y el resistor  $R_3$  se encargan de filtrar la señal donde la tensión en  $R_3$  es el valor filtrado. La frecuencia central para el modulador OOK es de 136 kHz, determinado mediante la semisuma entre la frecuencia portadora máxima y mínima, su ancho de banda es de 80 kHz, obtenido a partir de la banda de paso para el peor caso de la tasa de transmisión.

La frecuencia central es hallada a partir de la ecuación de resonancia del tanque LC serie, donde

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (15)$$

Si se cuenta con una bobina de 1.4 mH el valor de capacidad necesario es de aproximadamente un 1nF.

El ancho de banda [7] es encontrado a partir de la selectividad del tanque LC serie, donde

$$\Delta w = \frac{R_3}{L} \quad (16)$$

Si el ancho de banda necesario es de 80 kHz, entonces el valor de R3 es de 700Ω.

Luego de filtrada la señal modulada se amplifica su tensión empleando un amplificador operacional en configuración no inversora y ganancia igual a 3, para lo cual R<sub>1</sub> tiene un valor de 2 kΩ y R<sub>2</sub> de 1 kΩ. En la etapa siguiente se emplea un par complementario compuesto por un BD139 y un BD138. El objetivo de los transistores es entregar la corriente necesaria a la antena transmisora, la cual no puede proveer la etapa amplificadora de voltaje. Los capacitores C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub> son para filtrar ruido mientras que C<sub>2</sub> y C<sub>3</sub> eliminan la componente de directa.

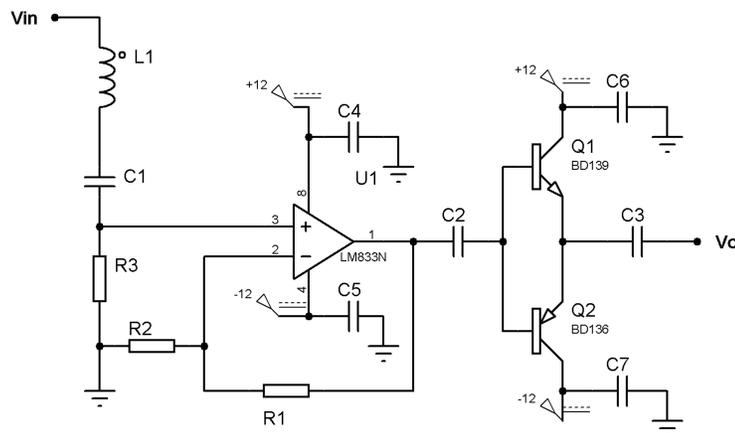


Figura 6. Circuito Amplificador de Potencia con filtro

## INTERFAZ ANALÓGICA PARA LA DEMODULACIÓN

La interfaz analógica para la demodulación tiene como objetivo amplificar la señal de baja amplitud proveniente de la antena y convertir la onda sinusoidal en una señal cuadrada. Dicha interfaz está compuesta por un preamplificador y un convertidor de onda. En la Figura 7 se muestra el circuito preamplificador seguido del convertidor de onda. El preamplificador se compone de un amplificador operacional en configuración no inversora con una ganancia de 101, donde R<sub>4</sub> tiene un valor de 100 kΩ y R<sub>5</sub> 1kΩ. A la salida del preamplificador se coloca un filtro activo con una ganancia también de 101. Finalmente el convertidor de onda convierte la onda sinusoidal en una onda cuadrada. Éste convertidor se compone de un transistor BC548 polarizado de tal forma que una señal de entrada mayor de 0.5 V provoca a su salida una señal cuadrada de igual frecuencia. Los valores de las resistencias R<sub>9</sub>, R<sub>10</sub> y R<sub>11</sub> son 50 kΩ, 3 kΩ y 500 Ω respectivamente, los cuales garantizan que el transistor opere entre corte y saturación logrando la forma de onda cuadrada, cuya amplitud máxima no supera los 5 V.

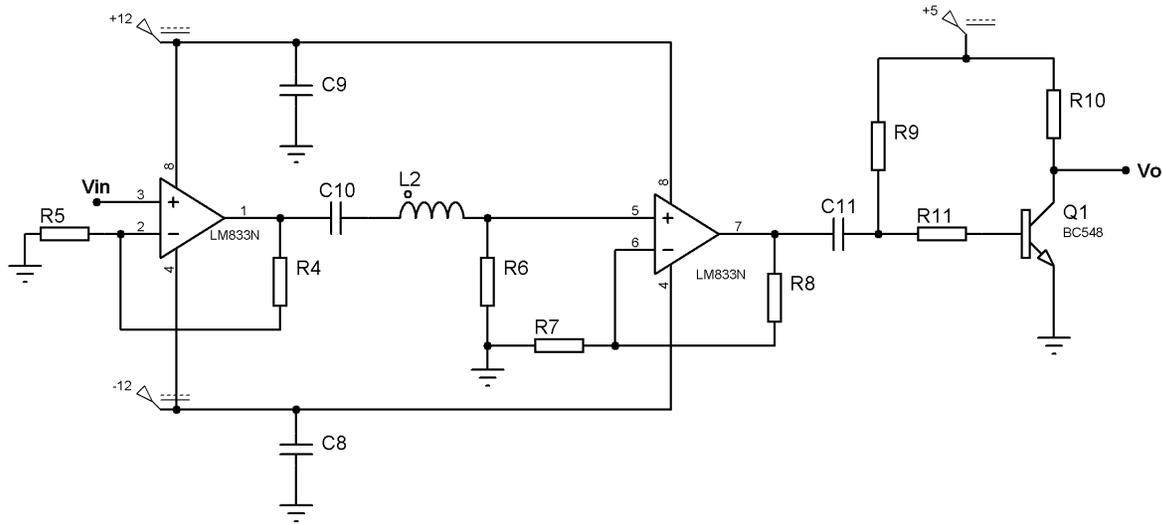


Figura 7. Preamplificador y convertidor de onda

## COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL

Para la comprobación experimental se empleó un microcontrolador PIC18F4550 del fabricante *Microchip*, que posee una CPU RISC de 8bits y arquitectura *Harvard* con 32 kB de memoria de programa basada en tecnología flash. Presenta 2 kB de memoria de datos SRAM y 256 bytes de memoria no volátil EEPROM [8]. El procesador es configurado para una frecuencia de reloj de 48 MHz con lo cual realiza un total de 12 MIPS. El recurso que se empleó para la modulación OOK es el Modulador por Ancho de Pulsos (PWM) y para la demodulación emplea la Interrupción Externa 0 (INT0) y un Temporizador. En la Figura 8 se muestra el conexionado del microcontrolador, donde los capacitores  $C_{13}$  y  $C_{14}$  son recomendados por el fabricante para la correcta operación del circuito oscilador, para un cristal de 4 MHz los valores de  $C_{13}$  y  $C_{14}$  son 27 pF. La interfaz analógica se corresponde con la Figura 6 para la modulación y la Figura 7 para la demodulación.

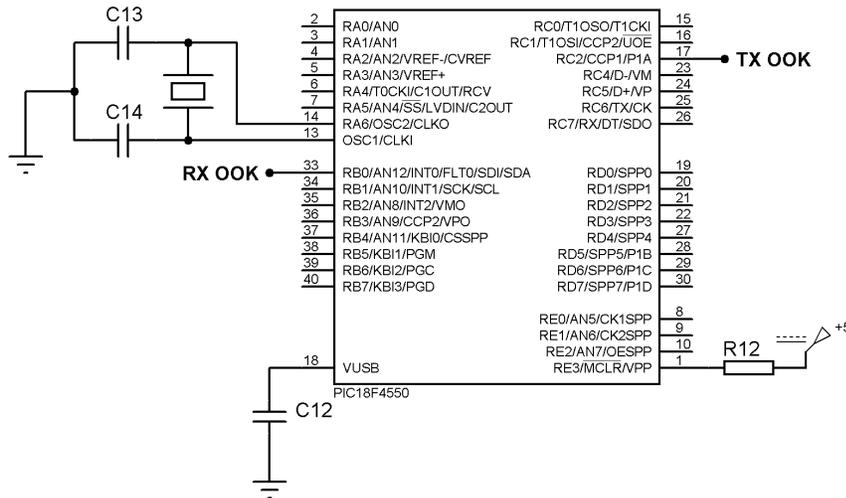
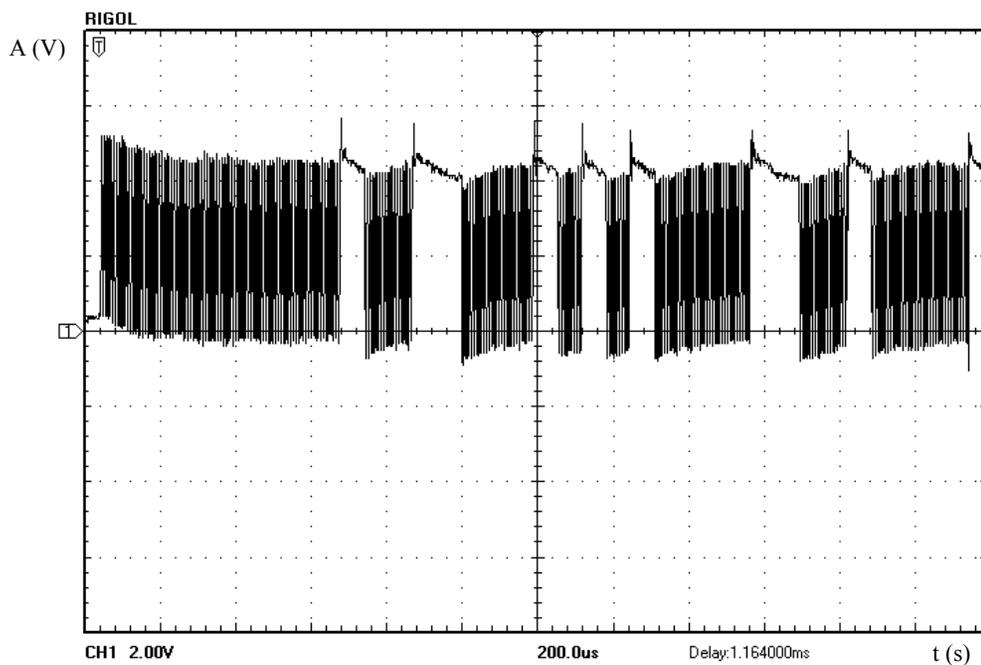


Figura 8. Conexión del Microcontrolador

Se configuró el modulador OOK para una frecuencia portadora de 125 kHz y una tasa de transmisión de 7,8125 Kb/s. La bobina empleada para la transmisión es un inductor tipo solenoide con núcleo de aire de 16 cm de diámetro y un cable 8 AWG con una inductancia de 7  $\mu$ H; esta bobina se monta en paralelo con un capacitor de 230 nF. Para la recepción se utiliza un inductor tipo

espiral con núcleo de aire de 15.5 cm de diámetro máximo y 15 cm mínimo empleando un cable 30 AWG, la bobina posee una inductancia de 740  $\mu$ H y se configura en paralelo con un capacitor de 2 nF. La transmisión se realiza cada 100 ms enviándose una trama que se compone de un preámbulo de 8 bits, un identificador de lector 32 bits, un identificador de etiqueta de 32 bits, dirección de 16 bits, 30 bytes de datos y 16 bits de CRC CCITT16. Bajo estas condiciones se logró una comunicación a una distancia de 3 m alimentando al transmisor y receptor con una fuente de 5 V. Luego se repite el experimento para una tasa de transmisión de 15,625 kb/s obteniéndose resultados similares. En la Figura 9 se muestra la señal modulada OOK a la salida del microcontrolador y en la Figura 10 se observa la modulación OOK en la bobina transmisora. Ambas tienen como variable independiente el tiempo en segundos, representado por “t” y la amplitud en Volt, representada por “A”. En la Figura 10 se puede comprobar la conversión a una onda sinusoidal la señal modulada en OOK proveniente del microcontrolador. Las Figuras 9 y 10 fueron adquiridas empleando un osciloscopio RIGOL DS5202CA, para una configuración del modulador OOK con una frecuencia portadora de 125 kHz y tasa de transmisión de 15,625 kb/s.



**Figura 9. Salida Modulada del Microcontrolador**

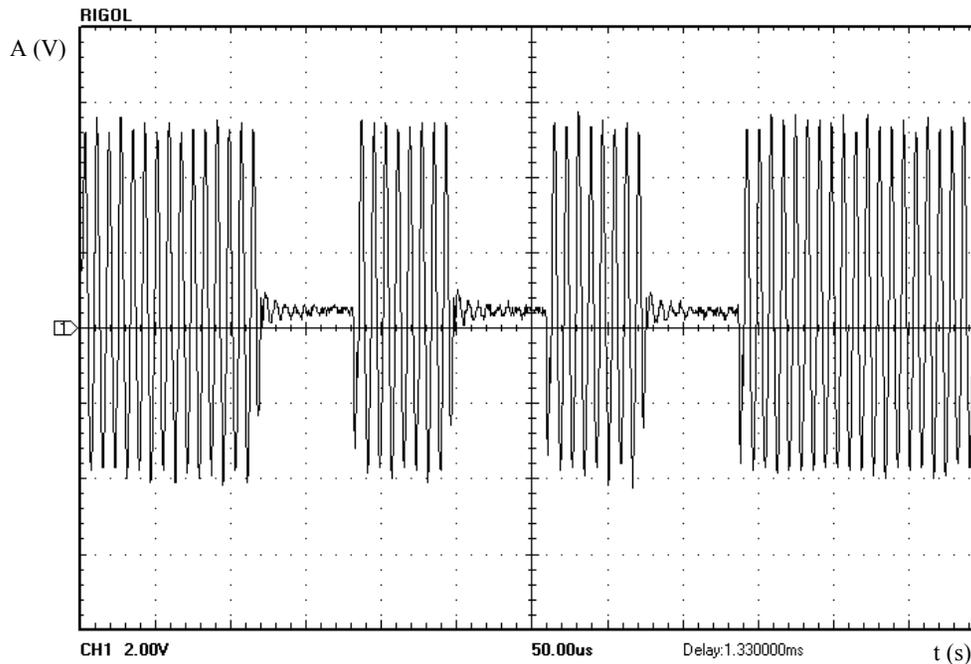


Figura 10. Señal Modulada en la Bobina Transmisora

## CONCLUSIONES

Se implementó un circuito modulador ASK para dispositivos RFID, basado en microcontrolador con componentes discretas para su diseño.

Se comprobó en la práctica el funcionamiento de la interfaz analógica para la modulación, al convertir la señal cuadrada en sinusoidal, coincidiendo con el análisis espectral realizado.

Constituye una ventaja implementar la modulación y demodulación OOK basada en *firmware* sin emplear un circuito demodulador externo, evitando incrementar la cantidad de componentes en el diseño.

Se comprobó la posibilidad de utilizar el modulador OOK en sistemas RFID activos de alto alcance, para el estándar de baja frecuencia.

Se logró que la relación establecida entre la frecuencia portadora y la tasa de transmisión no esté limitada a una potencia de dos.

Constituye una ventaja el poder escribir, con éste diseño, etiquetas pasivas disponibles en el mercado.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

1. **GOTOR, E.:** *Estado del Arte en Tecnologías RFID*. Universidad Politécnica de Madrid. España 2009.
2. **RFID: Tecnologías, Aplicaciones y Perspectivas**. Ed. LIBERA. España 2010.
3. **LUQUE, J.:** *Modulación de Señales Digitales*. Universidad Politécnica de Sevilla, Departamento de Tecnología Electrónica. España 1995.
4. **FINKENZELLER, K.:** *RFID Handbook*. Ed. John Wiley & Sons. Reino Unido 2010.

5. **KARRIS, S.:** *Signals and Systems*. Ed. Orchard Publications. California, Estados Unidos 2003.
6. **MANUEL GONZÁLEZ, S.:** "Análisis de pasividad y estabilidad de un circuito detector de envolvente mediante el enfoque en variable de estado", en *Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, Vol 65, Méjico, 2007.
7. **TSE, M.:** *Impedance Matching*. 2003.
8. **Inc., M.T.,** *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet*. Estados Unidos 2007.
9. **CÉSPEDES, M. A.:** *Transformada de Laplace con Aplicaciones*. Ed. Pueblo y Educación. La Habana, Cuba 1989.
10. **CASTILLO, A.:** *Series*. Ed. Pueblo y Educación. La Habana, Cuba 1986.

## AUTORES

**Arnaldo del Risco Sánchez**, Ingeniero en Automática, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Centro de Estudios Matemáticos (CEMAT), Habana, Cuba, [adrisco@cemat.cujae.edu.cu](mailto:adrisco@cemat.cujae.edu.cu).

**Juan Carlos Cruz Hurtado**, Dr. Ing. en Controles Automáticos, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME), La Habana, Cuba, [juan.cruz@electronica.cujae.edu.cu](mailto:juan.cruz@electronica.cujae.edu.cu).