

# **DISEÑO DE INTERFAZ GRÁFICA PARA EVALUACIÓN DE ESQUEMAS DE MODULACIÓN**

## *GRAPHIC INTERFACE DESIGN FOR THE EVALUATION OF MODULATION SCHEMES*

***Miguel Ángel Estudillo Valdez***

Instituto Politécnico Nacional, México  
*mestudillo@citedi.mx*

***Keylor Andres Mena Venegas***

Instituto Politécnico Nacional, México  
*kmena@citedi.mx*

***J. Apolinar Reynoso Hernández***

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México  
*apolinar@cicese.mx*

***José Cruz Núñez Pérez***

Instituto Politécnico Nacional, México  
*jnunez@ipn.mx*

**Recepción:** 28/octubre/2020

**Aceptación:** 27/noviembre/2020

### **Resumen**

Este artículo presenta el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para la evaluación de los esquemas de modulación AM, FM, PM, BLU, DBL, PSK, BPSK, QPSK, QAM y DSSS. Estas técnicas se desarrollan mediante scripts de Matlab y desde la plataforma de Simulink. La contribución principal de este trabajo de investigación radica en la facilidad con que los esquemas de modulación pueden ser evaluados y comparados utilizando diferentes tipos de datos como mensajes. El objetivo es analizar los tiempos de modulación dependiendo del tipo de mensaje, así como comparar la cantidad de símbolos requeridos para el caso de las modulaciones BPSK, QPSK y QAM. En la introducción de datos se predefinen diez diferentes tipos de mensaje en la ventana de selección a las cuales se les puede modificar ciertos parámetros básicos como amplitud y frecuencia. La interfaz cuenta con menús desplegables por lo que es sencillo introducir los parámetros y esquemas a evaluar.

**Palabras Clave:** Interface gráfica, Matlab, Modulación analógica, Modulación digital, Parámetros, Portadora.

## **Abstract**

*This article presents the development of a graphical user interface for evaluating AM, FM, PM, SSB, DBL, PSK, BPSK, QPSK, QAM, and DSSS modulation schemes. These techniques are developed using Matlab scripts from the Simulink platform. The main contribution of this research lies in the ability that modulation schemes can be evaluated and compared using different data types as messages. The objective is to analyze the modulation times depending on message type, as well as to compare the number of symbols required for the BPSK, QPSK, and QAM modulations. In the data entry, ten different types of messages are predefined in the selection window where certain basic parameters such as amplitude and frequency can be modified. The graphical user interface has displayed menus so it is easy to introduce the parameters and schemes to be evaluated.*

**Keywords:** Analog modulation, Carrier, Digital modulation, Graphical interface, Matlab, Parameters.

## **1. Introducción**

En los sistemas de telecomunicaciones actuales es común encontrar diversos esquemas y métodos para la transmisión de datos de información, ya sea de manera binaria o analógica. Cabe mencionar que, desde los tiempos de su creación, los esquemas de modulación han ido aumentando su complejidad a fin de mejorar la calidad de transmisión, su distancia de alcance o su inmunidad al ruido externo. Desde el año de 1897 cuando Guillermo Marconi y Aleksander Popov de manera independiente realizaron las primeras transmisiones y recepciones exitosas de la historia se han ido creando nuevos métodos de transmisión inalámbrica. Cada uno de estos métodos presenta sus ventajas si es aplicado en las condiciones y con el mensaje adecuado. Por lo que a épocas actuales existen variantes como en el caso de AM cuyas adaptaciones han culminado en la Modulación de Banda Lateral Única (BLU), Modulación en Doble Banda Lateral (DBL) y la Modulación de Amplitud en

Cuadratura (QAM). Esta última es una mezcla entre AM y PM debido a que su metodología implementa variación tanto en amplitud como en fase.

Diversos autores han discutido y diseñado herramientas que ayuden a evaluar el comportamiento de ciertos esquemas de modulación, destacando en primera instancia que Matlab cuenta con herramientas incorporadas como el toolbox communications las cuales hacen más sencilla la tarea de analizar esquemas de modulación. Por otro lado, existen trabajos tanto en el campo de la fibra óptica utilizando una interfaz gráfica en LabVIEW [Campos, 2006] como en el campo de las radiofrecuencias en donde se incluyen análisis de las modulaciones y señales sinusoidales, así como también las pérdidas del espacio libre [Kang, 2020]. Además, se han propuesto interfaces gráficas en donde se genera una señal caótica como portadora y posteriormente es mezclada con el mensaje deseado [Ogras, 2013]. En [Sengur, 2005] se desarrollaron interfaces que detectan el tipo de modulación. Adicionalmente en [Marriwala, 2016] se diseñaron herramientas gráficas para analizar esquemas híbridos de modulación que ayudan en el cálculo y generación de la relación de señal a ruido. Cabe destacar que todas estas aportaciones hacen énfasis en el análisis de los esquemas de manera general, o toman en cuenta solo dos de las modulaciones analógicas típicamente utilizadas, AM y FM, sin involucrar casos específicos de mensajes codificados.

De acuerdo con los autores no se ha reportado en la literatura un sistema con características similares. Este trabajo de investigación no solamente permite elegir el esquema de modulación, también se puede manipular la señal del mensaje que puede ser onda sinusoidal, triangular, cuadrada, diente de sierra, todas variables en amplitud y frecuencia. Además, el sistema incluye la posibilidad de incluir imagen a blanco y negro, a color, archivo de texto, voz, audio y video.

La motivación de esta investigación se basa en la necesidad de hacer una recopilación de los métodos modernos de modulación y poner en práctica estos esquemas de modulación analógicos y digitales. Además, se requiere una herramienta que permita analizar a detalle sus ventajas y desventajas, tales como sus tiempos de ejecución, facilidad para extraer el mensaje, metodología para mezclar la portadora con la moduladora y su complejidad computacional.

## 2. Métodos

Existe una gran variedad de técnicas de modulación tales como FM, AM, PM, DSB, SSB, QAM que sirven para transmitir un mensaje mediante la manipulación de una señal de radiofrecuencia (RF) en cuestión con la ayuda de circuitos analógicos y arreglos de ellos. Cabe mencionar que estas técnicas de modulación analógica son la base para posteriores análisis en modulación digital. A continuación, se hará un breve repaso de estas técnicas:

- **Modulación de Frecuencia (FM).** En este tipo de transmisión se transmiten mensajes mediante la manipulación de la frecuencia de la señal, este tipo de transmisión es más eficiente en cuanto a la interferencia respecto de la AM, la ecuación 1 representa este comportamiento.

$$y(t) = A_c \cdot \cos[\omega_c t + m \cdot \sin(\omega_m) \cdot t] \quad (1)$$

En donde  $y(t)$  representa la señal con Modulación en Fase,  $A_c$  equivale a la amplitud de la señal,  $\omega_c$  corresponde a la frecuencia angular de la señal portadora,  $t$  representa al tiempo y  $m$  representa la señal modulante.

- **Modulación de Amplitud (AM).** Consiste en un método que manipula la potencia de la señal para transmitir mensajes, esto se consigue mezclando una señal portadora con otra señal que corresponde a la del mensaje, sus frecuencias comúnmente utilizadas van desde los 500 hasta los 1700 kHz. La demodulación en este tipo de transmisión es muy sencilla por lo que el receptor suele ser barato y brinda una comunicación más que aceptable. Matemáticamente se establece que la señal portadora consumirá dos terceras partes de la potencia total y el tercio restante será para las dos bandas laterales, esta afirmación será demostrada más adelante, cada una de estas bandas es representada mediante  $m = \frac{V_m}{V_p}$ . En donde  $m$  equivale a la máxima amplitud de la banda lateral,  $V_m$  representa el voltaje de la señal modulada y  $V_p$  equivale al voltaje de la portadora. Debido a que la potencia es equivalente al cuadrado del voltaje, la potencia total es representada por la suma de las potencias de las dos bandas laterales más la señal portadora, dicho comportamiento es representado mediante la ecuación 2.

$$P \equiv V_p^2 + \left(\frac{mV_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{mV_p}{2}\right)^2 \equiv V_p^2 + \frac{m^2V_p^2}{4} + \frac{m^2V_p^2}{4} \quad (2)$$

En donde  $P$  representa la potencia de la señal modulada, posteriormente se procede a representar los voltajes como potencias mediante la ecuación 3.

$$P = P_p + \frac{m^2}{4}P_p + \frac{m^2}{4}P_p = P_p + \frac{m^2}{2}P_p = \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)P_p \quad (3)$$

Cuando la modulación sea del 100% ( $m=1$ ) y despejando se obtiene la ecuación 4.

$$P = \left(1 + \frac{1}{2}\right)P_p = \frac{3}{2}P_p \quad (4)$$

Posteriormente se despeja la potencia de la portadora y se obtiene la ecuación 5, que

$$P_p = \frac{2}{3}P \quad (5)$$

La ecuación 5, demuestra que la señal portadora consumirá dos terceras partes de la potencia total y el tercio restante será para las dos bandas laterales.

- **Modulación de Fase (PM).** Esta técnica se basa en la variación de la fase de la señal portadora. No es muy común de utilizar ya que requiere de sistemas de recepción más complejos que los anteriores, además de que es más complicado medir el valor de la fase y saber si se encuentra entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  [Langella, 2007]. Matemáticamente la modulación por fase viene dada por la ecuación 6.

$$y(t) = A_c \cdot \text{sen}(\omega_c \cdot t + m(t) + \varphi_c) \quad (6)$$

En donde  $y(t)$  representa a la señal con Modulación en Fase,  $A_c$  equivale a la amplitud de la señal,  $\omega_c$  corresponde a la frecuencia angular de la señal portadora,  $t$  representa al tiempo,  $m(t)$  representa la señal modulante y  $\varphi_c$  equivale al desfase.

- **Modulación en Doble Banda Lateral (DBL).** Matemáticamente puede definirse como una convolución entre dos funciones, una del mensaje y la

otra de la portadora. En donde, la portadora es dos veces la señal del mensaje, por lo que puede establecerse que es un caso especial de AM, matemáticamente la señal modulada en doble banda lateral queda representada mediante la ecuación 7.

$$V_{DSB} = x(t) \cdot A_p \cdot \cos(2\pi f_0 t) \quad (7)$$

$V_{DSB}$  equivale a la señal modulada,  $x(t)$  es el mensaje,  $A_p$  representa la amplitud de la portadora,  $f_0$  es la frecuencia de carga y  $t$  el tiempo.

- **Modulación de Banda Lateral Única (BLU).** Similar a la anterior BLU es un método de Banda Lateral Única (SSB por sus siglas en inglés, Single Side Band) y es también el resultado de una mejora al sistema de AM con la ventaja de que este sistema requiere de un cuarto de la potencia necesaria para transmitir un mensaje, normalmente de voz, otra de sus ventajas es que tiene la capacidad de transmitir con un ancho de banda mucho más estrecho, por lo que es posible transmitir en una sola banda más de una transmisión por vez [Mankovskyy, 2017], este comportamiento es representado mediante la ecuación 8.

$$V_{BLU} = x(t) \cdot A_p \cdot \cos(2\pi f_0 t) \pm \hat{x}(t) \cdot A_p \cdot \sin(2\pi f_0 t) \quad (8)$$

En donde  $V_{DSB}$  equivale a la señal modulada,  $\hat{x}$  equivale a una transformada, específicamente la transformada de Hilbert, esta transformada sirve para aplicar un cambio de fase de  $-90^\circ$ .

- **Modulación de amplitud en Cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés, Quadrature Amplitude Modulation).** Se modulan tanto la fase como la amplitud, y se basa en que dos señales con características similares en cuanto a su ancho de banda se pueden mezclar bajo ciertas circunstancias, para posteriormente ser separadas. De este modo es posible transmitir dos señales por un mismo canal [Dhanasekar, 2019], matemáticamente está representada por la ecuación 9.

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \cos(2\pi f_0 t - 90^\circ) \quad (9)$$

O lo que es equivalente si se utiliza el seno en lugar del coseno, este cambio es representado mediante la ecuación 10.

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (10)$$

En donde  $s(t)$  representa a la señal modulada,  $I(t)$  y  $Q(t)$  están desfasadas 90 grados respecto de la otra, dicho de otra forma, una señal es seno y otra coseno.

Además, es importante mencionar la constelación con la que puede operar el esquema QAM, que dependiendo de este dato el sistema tendrá la capacidad de transmitir mayor cantidad de bits por símbolo. En la figura 1a se muestra la configuración para la constelación de 4-QAM en donde se utiliza solo una amplitud para representar todos los puntos con cuatro distintas fases lo que resulta en cuatro posibles combinaciones. En la figura 1b se muestra 8-QAM en donde se utilizan dos amplitudes y cuatro fases para representar todos los puntos con un total de 8 distintas combinaciones. En la figura 1c se ilustra 16-QAM en donde se utilizan tres amplitudes y doce fases para representar todos los puntos con un total de 16 distintas combinaciones y cada símbolo envía 4 bits de manera simultánea.

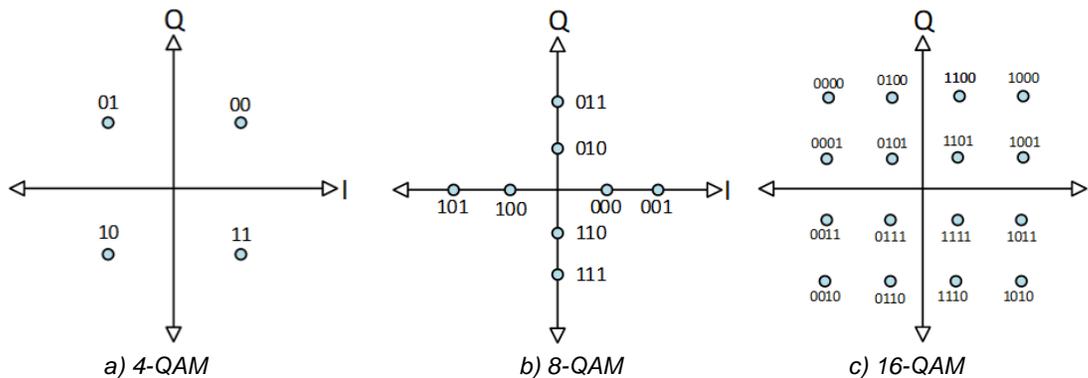


Figura 1 Diagrama de constelación típica utilizada.

Tomando como referencia la figura 1, el esquema de 64-QAM utiliza ocho escalas en el eje de las ordenadas y otras ocho escalas en el eje de las abscisas, lo que resulta en una posible combinación de 64 símbolos. De la misma manera el esquema de 256-QAM utiliza 16 escalas en el eje de las ordenadas y 16 escalas en el eje de las abscisas para un total de 256 símbolos posibles.

Hasta el momento se han mencionado solo los métodos más relevantes de modulación que hay, haciendo mención en que son métodos analógicos. Lo relevante es que son el origen de los métodos digitales, pasando de estados continuos a estados discretos usando componentes digitales. Estas técnicas son derivadas o mezclas de los métodos mencionados anteriormente, los métodos de modulación digital más utilizados serán descritos a continuación:

- **Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK).** Por sus siglas en inglés Phase Shift Keying. Existen métodos que garantizan una transmisión segura de información a través del espectro radioeléctrico tales como las técnicas de modulación por desplazamiento de fase. Esta técnica presenta varias metodologías, sin embargo, todas estas metodologías tienen en común una clave adjunta al canal de la comunicación, es decir una señal ruido que se mezcla con el mensaje.

Por otro lado, la acción de enmascarar la señal de mensaje con la portadora requiere que la portadora sea de ancho espectro lo que significa que el ancho de banda mínimo para la comunicación de este sistema es en ocasiones mayor en varias magnitudes de orden de la necesaria, ya que solo una fracción es necesaria para el mensaje y la porción mayor para la portadora [Peng, 2010].

La relación en decibels entre el ancho de banda extendida y la señal original es llamada ganancia de procesamiento, cuyos valores usualmente utilizados van desde los 10 hasta los 60 dB. La manera de operar este tipo de técnica radica en “envolver” la señal del mensaje con una señal portadora de mucho mayor ancho de banda, con lo cual al propagarse por el espacio físico la señal en cuestión es una combinación del mensaje con una porción de ruido, el ruido evita que cualquier usuario hostil malintencionado sea capaz de descifrar la señal transmitida. Por otro lado, al recibir la señal es necesario retirar esa porción de ruido previamente agregada (en el punto de recepción se debe conocer el código de ruido para poder sustraerlo). Cabe mencionar que este tipo de señales son implementadas de manera digital, por lo que se implementa un diagrama de constelación para conseguir fases concisas que

posteriormente serán transformadas a código binario. La modulación es representada por la ecuación 11.

$$S_{PSK} = A_p \cos(2\pi f t + \theta) \quad (11)$$

En donde  $A_p$  equivale a la amplitud,  $2\pi f$  es la frecuencia angular,  $t$  equivale al tiempo y  $\theta$  es la fase. Cabe mencionar que la fase es un número limitado que en los sistemas puede tomar, en este caso el número de fases que el sistema puede tomar es dependiendo del tipo de modulación PSK, existen de 8, 16 o superiores.

- **Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK).** Por sus siglas en inglés Binary Phase Shift Keying. Este método es una de las variantes de la transmisión RF y en particular es también conocido como llave de fase en reversa y consiste en un diagrama de constelación en forma de círculo, sobre el cual se representan dos puntos colocados a  $180^\circ$  el uno del otro. Debido a la configuración de los símbolos es que este sistema tiene una mejor visualización de la señal-mensaje respecto del ruido, por su orientación opuesta de  $180^\circ$  [Omijeh, 2016].

La modulación BPSK de una señal es determinada por la ecuación 12.

$$S_n(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos\left(2\pi f_c t + \pi(1-n)\frac{\pi}{4}\right) \quad (12)$$

En donde  $n$  puede tomar el valor de 0 o 1,  $f_c$  es la frecuencia de onda portadora,  $T_b$  equivale a la duración y  $E_b$  es la energía de la señal. La onda portadora quedaría entonces representada con la ecuación 13.

$$\varphi(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad (13)$$

Donde  $\varphi(t)$  representa a la onda portadora y  $f_c$  representa la frecuencia de onda.

- **Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK).** Por sus siglas en inglés Quadrature Phase Shift Keying. Es también una de las variantes de la transmisión RF por desplazamiento de fase. Esta consiste en

un diagrama de constelación en forma de círculo sobre el cual se representan cuatro puntos equidistantes entre sí, a estos puntos se les conocerá como símbolos con capacidad de codificar dos bits cada uno [Mohamed, 2014]. La asignación del valor de los bits se hace mediante el código Gray con lo cual se reducen considerablemente los bits erróneos. En comparación del BPSK y el QPSK, este último es capaz de transmitir el doble de información manteniendo un mismo ancho de banda o de otra forma, puede transmitir la misma información con la mitad del ancho de banda. Esta característica es muy atractiva para los ingenieros diseñadores y que como contrapeso al gasto generado por los componentes necesarios es aceptable. Para obtener las fases del diagrama de constelaciones se utiliza la ecuación 14.

$$S_n(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + (2n - 1)\frac{\pi}{4}\right), \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

En donde  $n$  puede tomar el valor de 0, 1, 2, 3 o 4,  $f_c$  es la frecuencia de la onda portadora,  $T$  es el periodo y  $E$  es la energía de la señal. Para obtener las ondas portadoras es suficiente con aplicar trigonometría y se obtiene la ecuación 15.

$$S_n(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \cos\left((2n - 1)\frac{\pi}{4}\right) + \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \operatorname{sen}(2\pi f_c t) \operatorname{sen}\left((2n - 1)\frac{\pi}{4}\right) \quad (15)$$

Al aplicar el cociente  $\frac{S_n(t)}{\sqrt{E_s}}$  se obtienen las ondas portadoras, ecuación 16.

$$\begin{aligned} S_n(t) &= \frac{\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \cos\left((2n - 1)\frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{E_s}} + \frac{\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \operatorname{sen}(2\pi f_c t) \operatorname{sen}\left((2n - 1)\frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{E_s}} \\ &= \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \cos\left((2n - 1)\frac{\pi}{4}\right) + \sqrt{\frac{2}{T_s}} \operatorname{sen}(2\pi f_c t) \operatorname{sen}\left((2n - 1)\frac{\pi}{4}\right) \quad (16) \end{aligned}$$

Pero debido a que la expresión  $(2n - 1)\frac{\pi}{4}$  representa la fase que la señal podría tomar dependiendo de los valores discretos solo haría falta considerar el modelo representado por la ecuación 17.

$$S_n(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2}{T_s}} \text{sen}(2\pi f_c t) \quad (17)$$

Las ondas portadoras quedarían entonces representadas con la ecuación 18.

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) ; \varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \text{sen}(2\pi f_c t) \quad (18)$$

- **Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS).** Por sus siglas en inglés Direct Sequence Spread Spectrum. Esta trabaja con métodos como el de Pseudo-Ruido. Básicamente genera una señal digital de ruido, a la cual le agrega la señal del mensaje, la señal resultante es una señal similar a la del ruido agregado. La ventaja es que, en la señal transmitida, de mayor ancho de banda, pero menor densidad espectral, va contenido un mensaje que solo el receptor sabrá que existe debido a la similitud de la señal con la de un ruido ordinario.

En este tipo de técnicas la secuencia [S] que se agregará a la señal-mensaje se repite periódicamente. Este periodo es conocido por el receptor y se requiere que sea el más largo posible, el periodo de esta secuencia tiene un periodo de  $2[S] - 1$ . En donde la ganancia de procesamiento se define como el factor de expansión del ancho de banda y es la relación entre la señal extendida y el ancho de banda original de la señal [Deshmukh, 2016]. Referente a la potencia de transmisión en esta técnica ambas señales pueden viajar “dentro” del mismo ancho de banda con muy poca o inclusive sin ninguna interferencia. La ecuación 19 representa la señal de amplio espectro.

$$DSSS_s = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} [m(t) \times p(t)] \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (19)$$

En donde  $m(t)$  representa la secuencia de datos,  $T_s$  es la duración de la información,  $p(t)$  Representa la secuencia expandida,  $f_c$  equivale a la frecuencia de carga y  $\theta$  representa al ángulo de fase de carga. Este tipo de comunicación posee la gran ventaja que es inmune o resistente en mayor medida a la interferencia. Además de

que un solo canal puede ser utilizado por varios usuarios, para transmitir al espacio estas señales, unos chips son colocados en el modulador y demodulador de manera que estos bits de ruido son agregados cuidadosamente siguiendo patrones que conoce tanto el transmisor como el receptor [Deshmukh, 2016].

En este trabajo se emplea la herramienta GUIDE de Matlab. La figura 2 muestra el boceto para diseñar la interfaz gráfica de usuario.

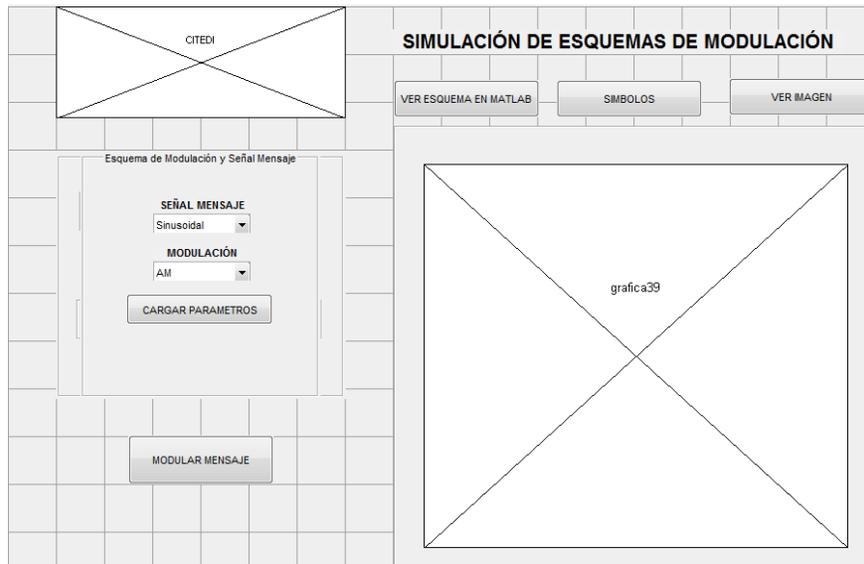


Figura 2 Boceto en Matlab-GUIDE para la creación de la interfaz gráfica.

En la sección de “esquema de simulación y mensaje” se agregan el tipo de señal de mensaje y el esquema de modulación a utilizar. El botón de “Cargar parámetros” cambia el entorno para mostrar al usuario la ventana de los parámetros de las señales, y encima del cuadro de grafico existen tres botones, 1) el botón de “ver esquema en Matlab” cambia la vista entre Matlab y Simulink, 2) el botón de “símbolos” aparece junto con otro gráfico para mostrar los símbolos utilizados según la combinación de bits, como es el caso de BPSK, QPSK, QAM, 3) el botón de “ver imagen” muestra al usuario la imagen que se está procesando, esto suponiendo que el mensaje a modular sea una imagen (en blanco y negro o a color). Después se crea la cabecera de la interfaz en donde se describen las posiciones y relaciones que se muestran al usuario cuando se abre la interfaz gráfica. En la figura 3 se muestra uno de los bloques utilizados para llamar la modulación elegida.

En este caso se trata del bloque correspondiente a la AM, dentro del bloque lo primero que se realiza es traer hacia adelante los bloques correspondientes a la modulación en amplitud (graficas, botones, figuras). De esta manera, las líneas consecuentes implementan las ecuaciones que describen el esquema AM, y al finalizar el proceso se grafican los resultados en los “plots” correspondientes.

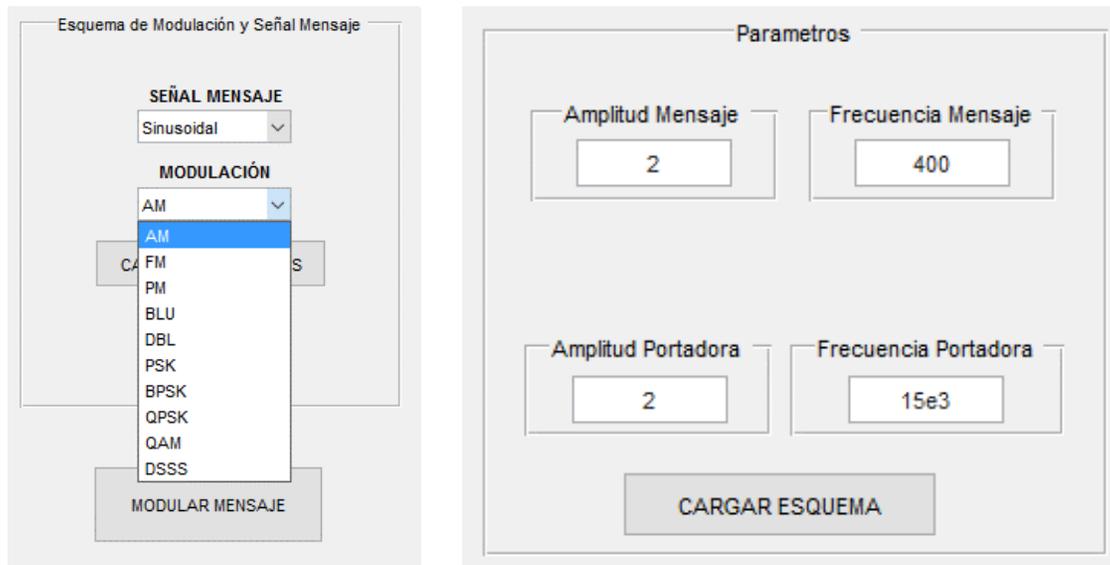
```
switch F_MODULACION
case 1
set(handles.PANEL_MAT,'visible','on');
set(handles.PANEL_SIM,'visible','off');
set(handles.MATLAB,'visible','off');
set(handles.SIMULINK,'visible','on');
t = 0:1e-6:6e-3;
Am = str2double(get(handles.A_M,'String'));
AM = [1,1.5];
fm = str2double(get(handles.F_M,'String'));
Sm=Am*sin(2*pi*fm*t+(15*sin(2*pi*125*t)));
axes(handles.grafical);
plot(t,Sm),grid minor;
xlabel('Tiempo');ylabel('Amplitud');title(['Moduladora (MATLAB)']);
Ap = str2double(get(handles.A_P,'String'));
fp = str2double(get(handles.F_P,'String'));
Sp = Ap*sin(2*pi*fp*t);
axes(handles.grafica2);
plot(t,Sp),grid minor;
xlabel('Tiempo');ylabel('Amplitud');title('Señal Portadora');
SM = Sp+(Sm.*Sp);
axes(handles.grafica3);
plot(t,SM),grid minor;
xlabel('Tiempo');ylabel('Amplitud');title('Modulación AM');
% ESQUEMA EN SIMULINK
assignin('base','A_M',[1,Am])
assignin('base','A_P',[1,Ap])
assignin('base','F_M',[1,fm])
assignin('base','F_P',[1,fp])
sim('AMI_SLK');
% Señal Mensaje
axes(handles.grafica4); % Se especifica el axes del GUI
plot(t,moduladora),grid minor;
xlabel('Tiempo');ylabel('Amplitud');title('Moduladora (SIMULINK)');
% Señal Portadora
axes(handles.grafica5);
plot(t,portadora),grid minor;
xlabel('Tiempo');ylabel('Amplitud');title('Señal Portadora');
axes(handles.grafica6);
plot(t,AM),grid minor;
xlabel('Tiempo');ylabel('Amplitud');title('Modulación AM');
```

Figura 3 Bloque típico de la interfaz utilizada para llamar la modulación respectiva.

### 3. Resultados

En esta sección se presentarán algunos de los resultados obtenidos por la interfaz gráfica al modular diversos tipos de mensajes, debido a que la cantidad de capturas resultaría redundante y dado que el espacio es limitado se ha optado por mostrar solo las más significativas para que el lector comprenda las funcionalidades de esta herramienta didáctica. Para procesar un nuevo mensaje es necesario pulsar el botón “**cargar esquema**” y el panel actual cambia de formato, véase la figura 4a. Para configurar los parámetros de las señales es necesario pulsar el botón “**cargar parámetros**” en donde el panel cambiará de formato como muestra la figura 4b.

Para comenzar la modulación es necesario pulsar el botón “**modular mensaje**” y esperar a que las gráficas aparezcan en pantalla. Una vez que termina el proceso de modulación es posible visualizar las gráficas generadas por el entorno de Simulink pulsando el botón “**ver esquema en simulink**”.

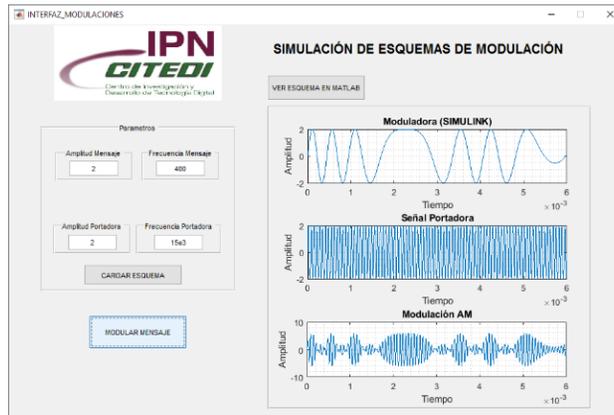


a) Esquema de modulación.

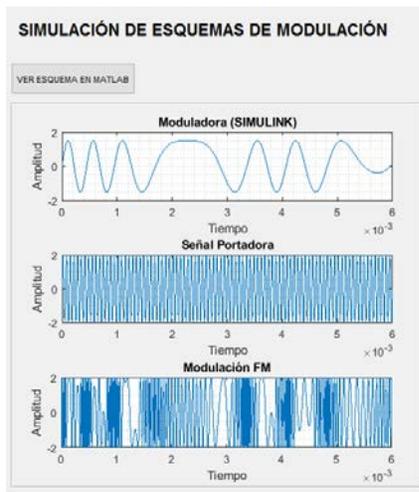
b) Parámetros.

Figura 4 Panel de selección.

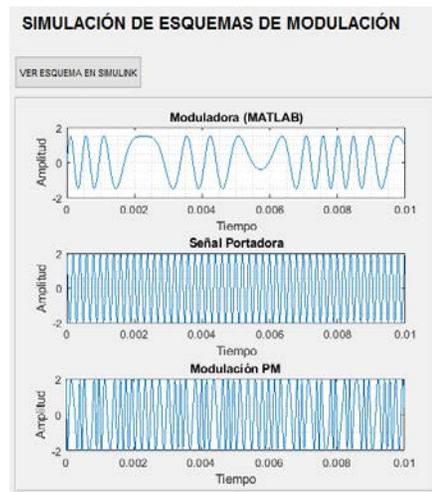
Cabe destacar que además de la señal sinusoidal es posible también modular una cuadrada, diente de sierra, voz, audio; imagen en escala de grises, a color; archivo de video, texto y datos digitales. En la figura 5 se muestran los resultados de las modulaciones AM, FM, PM, DBL y BLU, respectivamente, para una señal sinusoidal. Por otra parte, en la figura 6 se muestran los resultados de las modulaciones PSK, FM, PM, DBL y BLU. En la figura 7 se muestran los resultados de las modulaciones y símbolos para BPSK y QPSK, respectivamente, usando una señal cuadrada. En la figura 8a se aprecia la fotografía en escala de grises utilizada para 8-QAM. Mientras que en la figura 8b se aprecian las señales portadoras y de mensaje. La figura 9 muestra los símbolos de 8-QAM para una imagen en escala de grises. Si el mensaje a modular es un archivo de audio o video, en la ventana de los parámetros de las señales aparecerá un botón para seleccionar un archivo del ordenador, esta ventana se muestra en la figura 10.



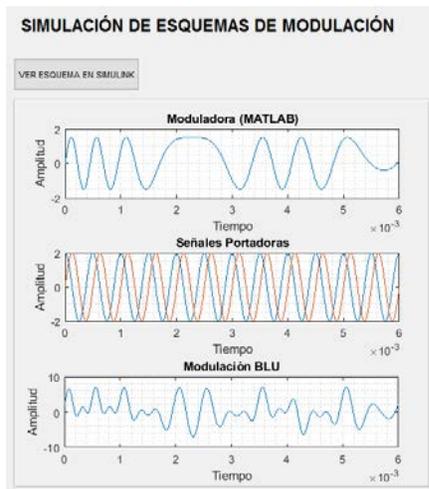
a) AM



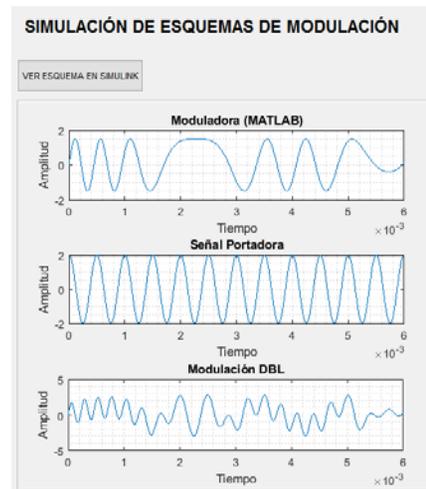
b) FM



c) PM

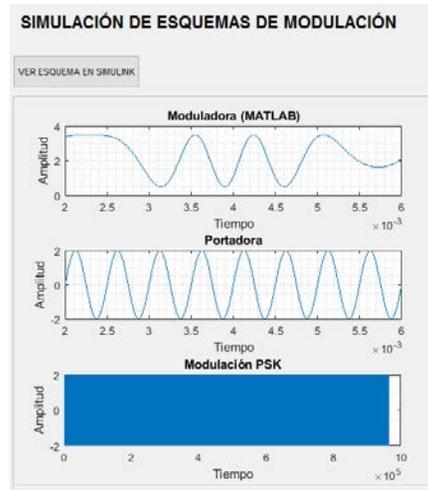


d) BLU

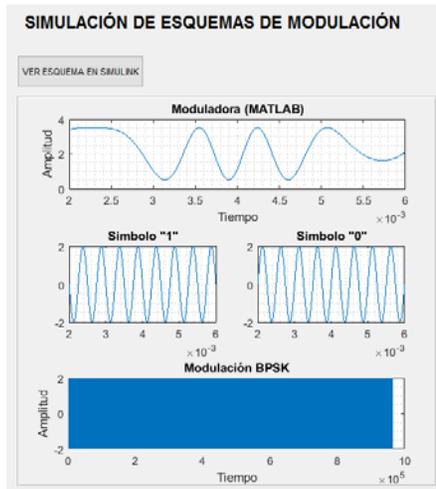


e) DBL

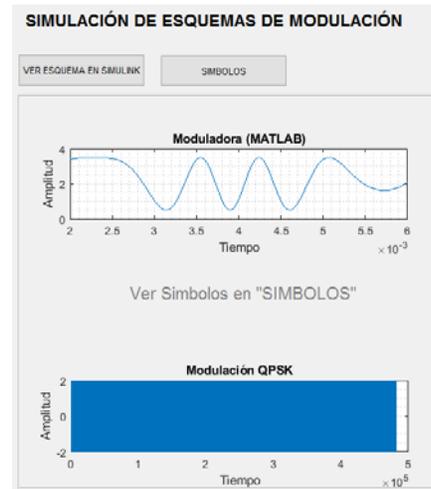
Figura 5 Ventana principal con distinto tipo de modulación para una señal sinusoidal variable en frecuencia y amplitud.



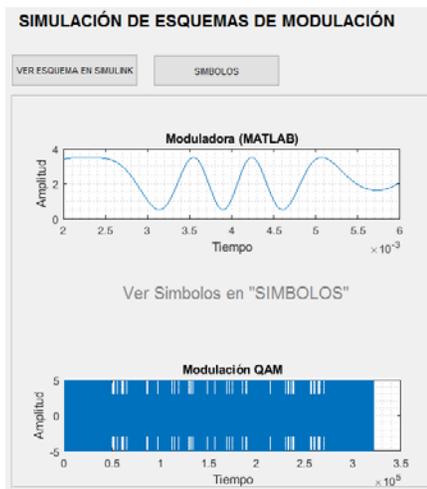
a) PSK



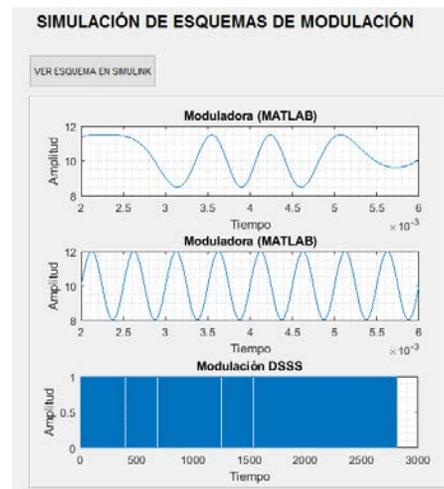
b) BPSK



c) QPSK

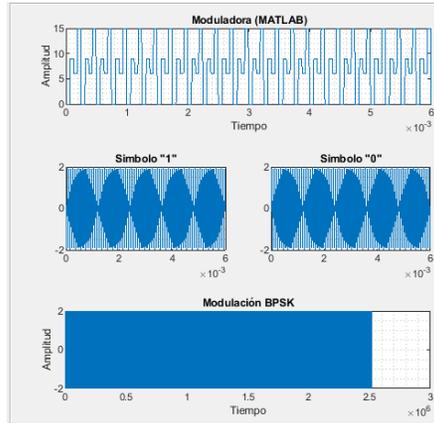


d) QAM

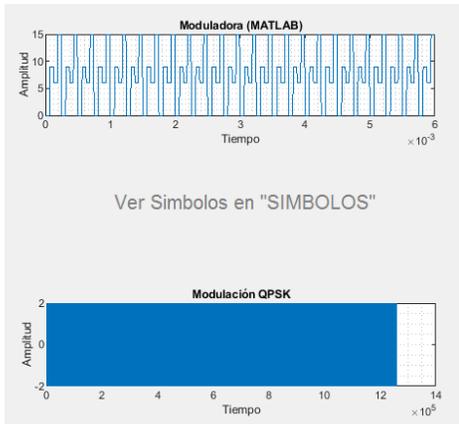


e) DSSS

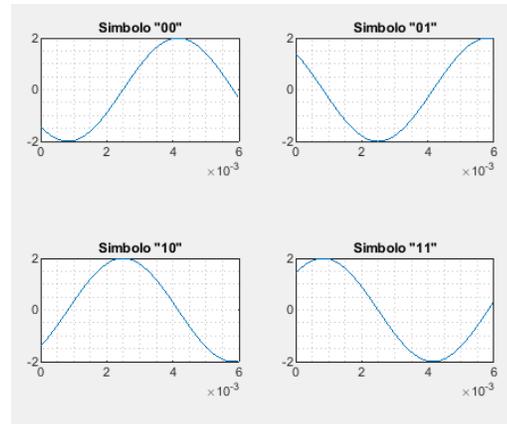
Figura 6 Ventana principal con diferente modulación para una señal sinusoidal variable en frecuencia y amplitud.



a) Modulación BPSK



b) Modulación QPSK

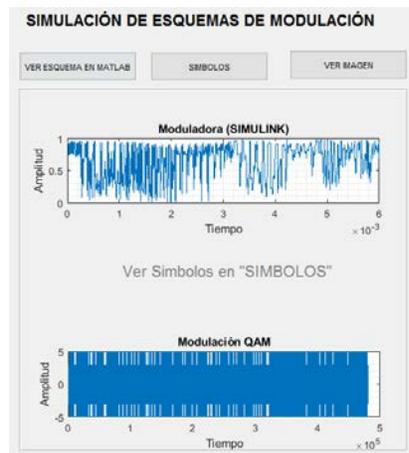


c) Símbolos correspondientes a la modulación QPSK

Figura 7 Modulación digital utilizando una señal cuadrada.



a) QAM



b) Señales para 8-QAM de una imagen

Figura 1 Imagen seleccionada para la modulación.

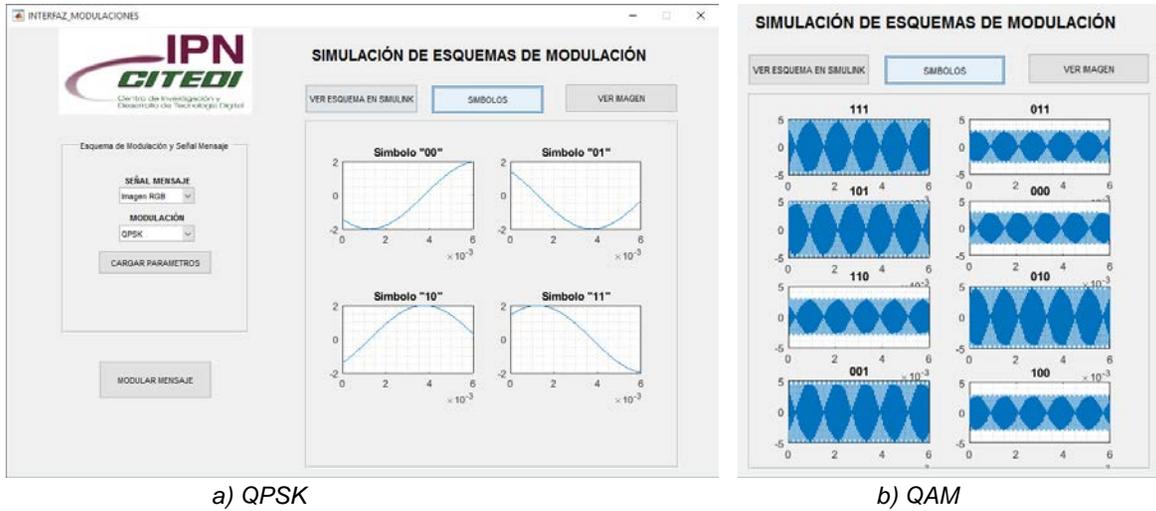


Figura 2 Símbolos binarios del esquema.

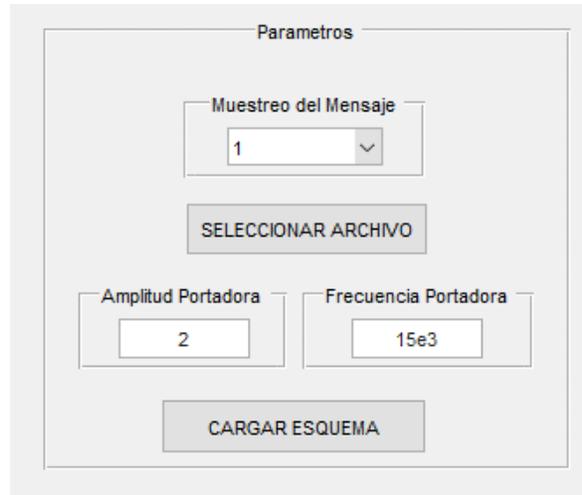


Figura 3 Botón para introducir un archivo de audio o video.

La figura 11 permite apreciar que el tipo de modulación hace la diferencia en cuanto a la reducción en los tiempos de procesamiento de las señales. Aún más cuando se trata de volúmenes grandes de información. En la figura 11a se muestra la modulación de un fragmento de un clip de video mediante el esquema PSK el cual tomó un tiempo de procesamiento de 2 minutos 37 segundos con un muestreo del 25 % de la señal original. Mientras que en figura 11b el esquema QAM el vector de iteraciones es de tan solo 17 segundos, transmitiendo inclusive con un muestreo del 5% de la señal original.

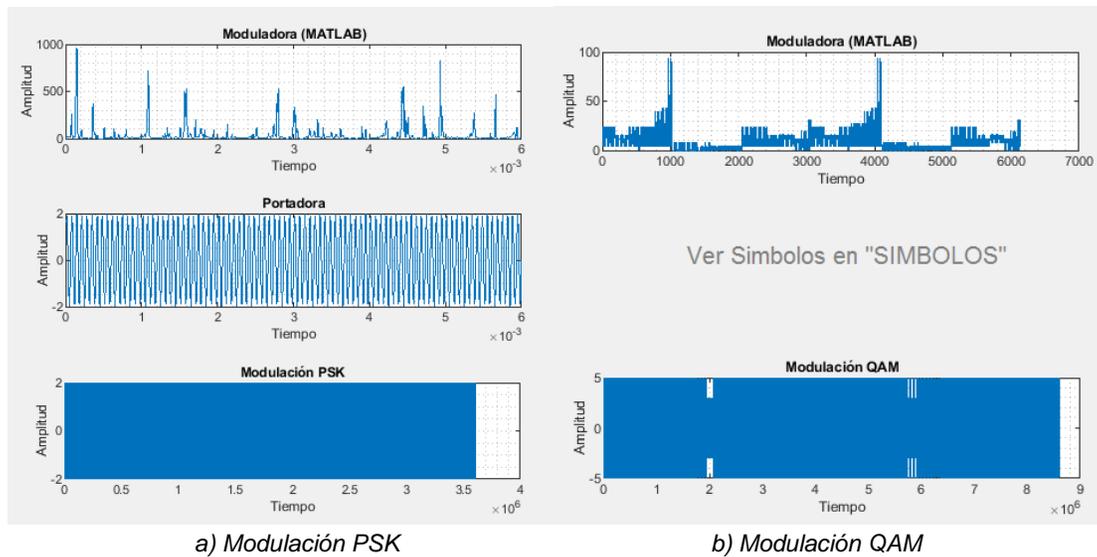


Figura 4 Comparación modulación PSK y QAM para un fragmento de clip de video.

## 4. Discusión

El producto de esta investigación resultó en una herramienta didáctica que permite analizar y evaluar las técnicas de modulación, usando un ambiente de diseño flexible al usuario. Además, permite configurar los datos que serán modulados siendo estos del tipo señales, imágenes, texto, audio y video.

Este trabajo servirá de fundamento para la implementación de metodologías nuevas relacionadas a la modulación caótica con diversos tipos de archivos y diferentes metodologías de encriptación.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se consiguió analizar diversos esquemas de modulación utilizando diversas señales como mensaje, cabe mencionar que estas señales en múltiples casos fueron previamente tratadas dado que inicialmente se trataba de un audio, un texto, imagen, entre otras, para lo cual la metodología seguida consistió en transformar estos archivos en datos binarios o decimales dependiendo si se trataba de un método analógico o digital.

Si bien los ambientes de Matlab, el de script y el método de bloques tienen ambas sus ventajas es necesario prestar atención y desarrollar una metodología de trabajo adecuada especialmente cuando se trabaja con señales extensas o mezclas de

estas, dado que los ciclos de tiempo de ambos ambientes se manejan un poco diferente y por lo tanto las frecuencias establecidas para la operación de las señales se podrían ver afectadas durante la sincronización de resultados. Además, se debe considerar trabajar rigurosamente en la optimización del código fuente encargado de procesar la señal mensaje, ya que bajo ciertas circunstancias este puede llegar a sobrepasar los tiempos aceptables de trabajo.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Campos, G., Sabogal G., Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica, *Umbral Científico*, vol. 2006, no. 9, pp. 76-84, 2006.
- [2] Deshmukh, S., Bhosle, U., Performance Evaluation of Spread Spectrum System Using Different Modulation Schemes, *International Conference on Computational Modeling and Security*, vol. 2016, no. 85 pp. 176-182, 2016.
- [3] Dhanasekar, S., Bruntha, P., Madhuvappan, C., Sagayam, K., An Improved Area Efficient 16-QAM Transceiver Design using Vedic Multiplier for Wireless Applications, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 8, no. 3, pp. 4419-4425, 2019.
- [4] Kang, A., Bhatia, S., Kaur, N., Singh, K., Performance evaluation of various hybrid modulation techniques transmitted by EDFA in radio-over-fibre communication, *Journal of Information and Telecommunication*, pp. 2475-1847, 2020.
- [5] Kleimola, J., Lazzarini, V., Valimaki, V., Timoney, J., Feedback Amplitude Modulation Synthesis, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 434378, pp. 1-18, 2011.
- [6] Langella, R., Testa, A., Amplitude and Phase Modulation Effects of Waveform Distortion in Power Systems, *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, vol. 13, no. 1, pp.25-32, 2007.
- [7] Mankovskyy, S., Nykolyshyn, M., Mankovska, E., Digital Method of SSB Modulation, *Computational Problems of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 92-96, 2017.

- [8] Marriwala, N., Sahu, O., Vohra, A., Design of a hybrid reconfigurable Software Defined Radio transceiver based on frequency shift keying using multiple encoding schemes, *Egyptian Informatics Journal*, vol. 17, no 1, pp. 89-98, 2016.
- [9] Mohamed, A., Hamid, S., A Novel Sample Based Quadrature Phase Shift Keying Demodulator, *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1-7, 2014.
- [10] Ogras, H., Turk, M., Utilizing Simulink and MATLAB Graphical User Interface in Modelling and Simulation of Chaos-Based Digital Modulation Techniques, *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, vol. 50, no. 1, pp. 19-33, 2013.
- [11] Omijeh, B., Oteheri, T., Binary Phase Shift Keying Digital Modulation Technique for Noiseless and Noisy Transmission, *Science Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 5, no. 3, pp. 24-30, 2016.
- [12] Peng, G., Derong, C., He, Z., Huang, Z., Modulation Index Estimation of Frequency and Phase Modulated Signals, *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, Vol. 2010, no. 3, pp. 773-778, 2010.
- [13] Sengur, A., Guldemir, H., An educational interface for automatic recognition of analog modulated signals, *Journal of applied sciences*, vol. 5 no. 3. pp. 513-516, 2005.