



Enseñanza de la modulación AM utilizando osciloscopio y analizador de espectros de última generación

Teaching of AM modulation using a state-of-the-art oscilloscope and spectrum analyzer

Víctor Manuel Cruz Ornetta, Jorge Paul Ubillús Gonzales, Julio César Gonzalez Prado,
Milton Marcelo Peña Calero

RECIBIDO: 25 de septiembre de 2024

ACEPTADO: 24 de noviembre de 2024

RESUMEN

Algunos documentos tratan sobre la utilización del análisis espectral de la modulación AM pero no se encuentra un análisis conjunto en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Por ello, el objetivo del presente estudio fue mostrar las bondades del uso de osciloscopios y analizadores de espectros de última generación para la enseñanza la modulación AM con portadora presente (DSB-FC) en los dominios del tiempo y la frecuencia. Para ello, se utilizó un analizador de espectros, un generador de radiofrecuencias y un osciloscopio y se trabajó con diferentes frecuencias y porcentajes de modulación. Con el osciloscopio se midió el voltaje eficaz (VRMS) y el voltaje pico a pico de la portadora pura (V_{cpp}) y para la portadora modulada. Con estos datos se calculó la potencia de portadora P_c , la potencia total P_T , y los valores. Con el analizador de espectros se midieron la potencia de portadora, potencia total (potencia de canal) y las potencias de las bandas laterales inferior y superior en dBm, μW y mV, se calcularon los valores teóricos. Finalmente, para los dos tipos de mediciones se calcularon los errores porcentuales correspondientes. Los resultados mostraron errores porcentuales generalmente muy bajos, con el osciloscopio el error máximo fue 14.38 %, mientras con el analizador el máximo error fue 8.99 %. En conclusión, la enseñanza x-learning de la DSB-FC, mediante experiencias de laboratorio utilizando analizadores de espectros y osciloscopios modernos, proporciona un aprendizaje experiencial de muy buena calidad.

Palabras clave: modulación AM, AM portadora presente, porcentaje de modulación, profundidad de modulación, índice de modulación AM.

Cómo citar

J. Ubillús Gonzales, V. Cruz Ornetta, J. Gonzalez Prado, y M. Peña Calero, «La Enseñanza de la Modulación AM utilizando Osciloscopio y Analizador de Espectros de Última 77Generación», *Perfiles de Ingeniería*. vol. 21, n.º 22, pp. 77–98, dic. 2024.

ABSTRACT

There are some documents that deal with the use of spectral analysis of AM modulation but a joint analysis in the time and frequency domain is not found. This is why the aim of the present study was to show the benefits of using state-of-the-art oscilloscopes and spectrum analyzers for teaching carrier-present AM modulation (DSB-FC) in the time and frequency domains. For this, a spectrum analyzer, a radio frequency generator and an oscilloscope were used and we worked with different frequencies and modulation percentages. With the oscilloscope, the effective voltage (VRMS) and the peak-to-peak voltage of the pure carrier (V_{cpp}) and for the modulated carrier were measured, from these data the carrier power P_c and the total power P_T were calculated, then the values. With the spectrum analyzer, the carrier power, total power (channel power) and the powers of the lower and upper sidebands were measured in dBm, μW and mV, and the theoretical values were calculated. Finally, the corresponding percentage errors were calculated for the two types of measurements. The results showed generally very low percentage errors, with the oscilloscope the maximum error was 14.38%, while with the analyzer the maximum error was 8.99%. In conclusion, DSB-FC x-learning teaching through laboratory experiences using modern spectrum analyzers and oscilloscopes provides very good quality experiential learning.

Keywords: AM modulation, AM carrier present, modulation percentage, modulation depth, modulation index.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

El aprendizaje experiencial, comúnmente conocido como X-learning, es aquel proceso mediante el cual el alumno aprende y desarrolla capacidades a través de la experiencia en el mundo real. Estas experiencias deben estar bien estructuradas en función de los objetivos formativos que se quieran alcanzar y del perfil del alumno.

Se ha demostrado mediante numerosos estudios que el aprendizaje es más eficaz y creativo cuando se lleva a cabo a través de la experiencia y el descubrimiento. Por lo tanto, es necesario que los cursos del área de telecomunicaciones se ajusten lo mejor posible al X-learning, de tal manera que los alumnos desarrollen habilidades y competencias esenciales para su desempeño en la vida profesional [1].

Por eso, el objetivo del presente estudio fue mostrar las bondades del uso de osciloscopios y analizadores de espectros de última generación para la enseñanza la modulación AM con portadora presente (DSB-FC) en los dominios del tiempo y la frecuencia. En este estudio se pudo mostrar, por un lado, la gran cantidad de parámetros de esta modulación que pueden ser medidos y la exactitud de los mismos, lo que garantiza un aprendizaje óptimo; por otro lado, las ventajas de estas mediciones respecto de otros métodos.

1.1 Base teórica

La modulación AM con portadora presente y doble banda lateral es la modulación básica en el conocimiento de todo especialista en telecomunicaciones. La modulación AM es base para entender algunos tipos de modulación digital como la modulación por desviación de amplitud (ASK) y la modulación de amplitud en cuadratura (QAM), que es una de las más importantes en los sistemas de comunicaciones digitales modernos y que combina la modulación ASK con la modulación de desviación de fase (PSK) [2].

Por ello, es importante que el estudiante de Ingeniería Electrónica, Ingeniería de Telecomunicaciones o ramas afines tengan un conocimiento sólido sobre esta modulación y sus características principales, lo que le servirá de base cuando estudie los otros tipos de modulación especialmente las modulaciones digitales. Por eso, el objetivo de este estudio es comprobar de manera analítica mediante mediciones con osciloscopio y analizador de espectros los diferentes parámetros característicos de la modulación AM con portadora presente.

La modulación de amplitud (AM) es una técnica de modulación que se realiza mediante la variación de la amplitud de la señal transmitida en relación con la información que se envía.

Este es un caso de modulación en el que tanto las señales de transmisión como las señales de datos son analógicas.

Un modulador AM es un dispositivo con dos señales de entrada, una señal portadora de amplitud y frecuencia constante, y la señal modulante que contiene la información. El parámetro de la señal portadora que es modificado por la señal moduladora es la amplitud.

Las expresiones matemáticas de la modulación AM con portadora presente son desarrollados en los libros texto de ingeniería de telecomunicaciones [3, 4, 5, 6, 7, 2, 8, 9, 10], información en línea [11, 12, 13] y manuales de laboratorio [14].

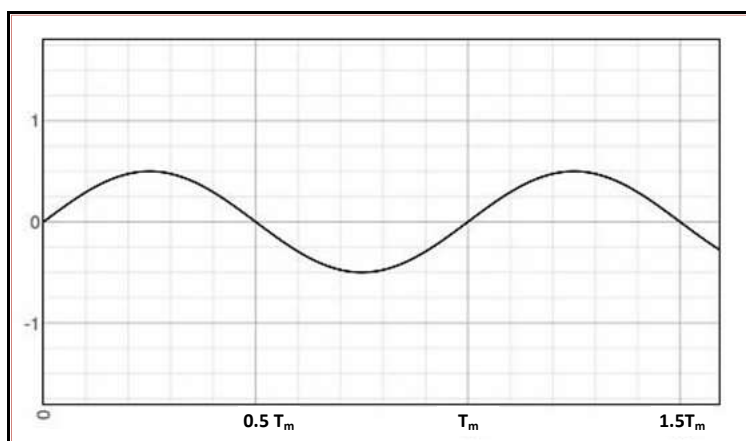
Para la señal modulante se tiene.

$$v_m(t) = V_m \cos(2\pi f_m t) \dots \dots (2)$$

Siendo V_m el valor pico de la señal modulante y f_m su frecuencia. En la figura 1, se muestra una señal modulante con $V_m=1$ V

Figura 1

Señal modulante



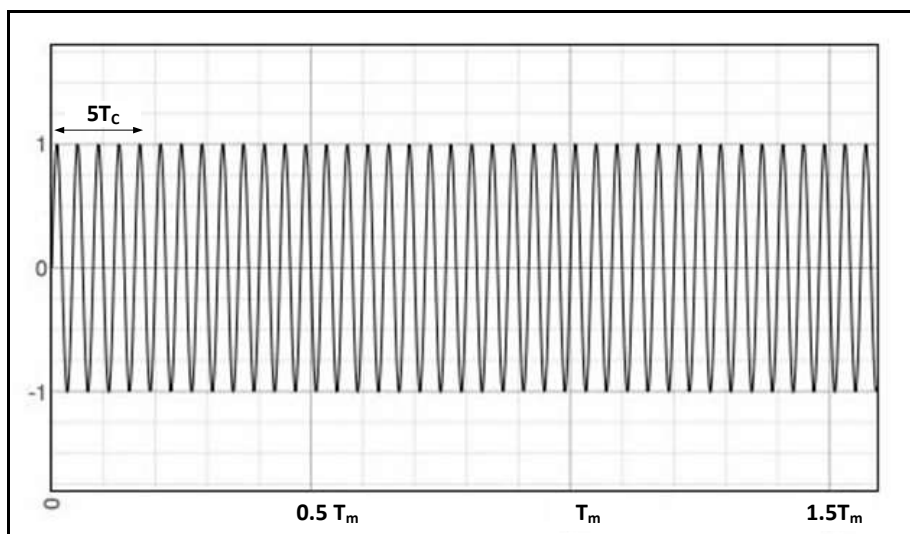
Análogamente, en la figura 2, se presenta la portadora cuya expresión matemática está dada por:

$$v_c(t) = V_c \cos(2\pi f_c t) \dots \dots (1)$$

Donde V_c es el valor pico de la señal portadora y f_c es la frecuencia de la señal portadora.

Figura 2

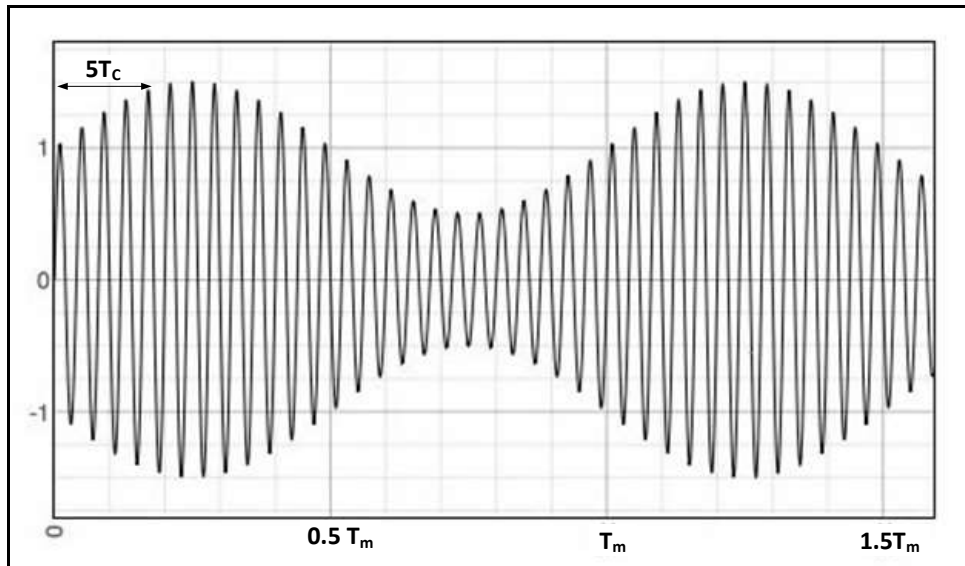
Señal portadora



La señal portadora modulada tendrá una amplitud que será igual al valor pico de la señal portadora más el valor instantáneo de la señal modulante. En la figura 3, se muestra la señal portadora modulada en amplitud con portadora presente.

Figura 3

Señal portadora modulada en amplitud



$$v(t) = (V_c + V_m \cos(2\pi f_m t)) \cos(2\pi f_c t) \dots \dots \dots (3)$$

$$v(t) = V_c \left[1 + \frac{V_m}{V_c} \cos(2\pi f_m t) \right] \cos(2\pi f_c t)$$

Por un lado, $m = \frac{V_m}{V_c}$, se denomina profundidad de modulación; y, por otro lado, $M\% = \frac{V_m}{V_p} \cdot 100$ se denomina porcentaje de modulación. M puede variar de 0 a 100% sin que exista distorsión; pero si permite que el porcentaje de modulación se incremente más allá del 100 %, se producirá distorsión por sobremodulación, lo cual da lugar a la presencia de señales de frecuencias no deseadas.

$$v(t) = V_c (1 + m \cos(2\pi f_m t)) \cos(2\pi f_c t) \dots \dots \dots (4)$$

Luego el valor de pico de la señal modulada es:

$$V_{pp}(t) = V_c (1 + m) \dots \dots \dots (5)$$

$$v(t) = (V_c + V_c m \cos(2\pi f_m t)) \cos(2\pi f_c t)$$

$$v(t) = V_c \cos(2\pi f_c t) + V_c m \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_c t) \dots \dots \dots (6)$$

Recordando la relación trigonométrica:

$$\cos\alpha \cdot \cos\beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

Aplicamos esta identidad a la ecuación (5):

$$v(t) = V_C \cos(2\pi f_C t) + \frac{mV_C}{2} \cos[2\pi(f_C - f_m)t] + \frac{mV_C}{2} \cos 2\pi[(f_C + f_m)t] \dots \dots (7)$$

donde el primer término es la portadora, el segundo es la banda lateral inferior y el tercero es la banda lateral superior.

Por tratarse de señales armónicas, la potencia media total:

$$P_T(t) = \frac{V_C^2}{2R} + \frac{mV_C^2}{4R} + \frac{mV_C^2}{4R} \dots \dots (8)$$

$$P_T(t) = P_C + \frac{m^2}{4} P_C + \frac{m^2}{4} P_C \dots \dots (9)$$

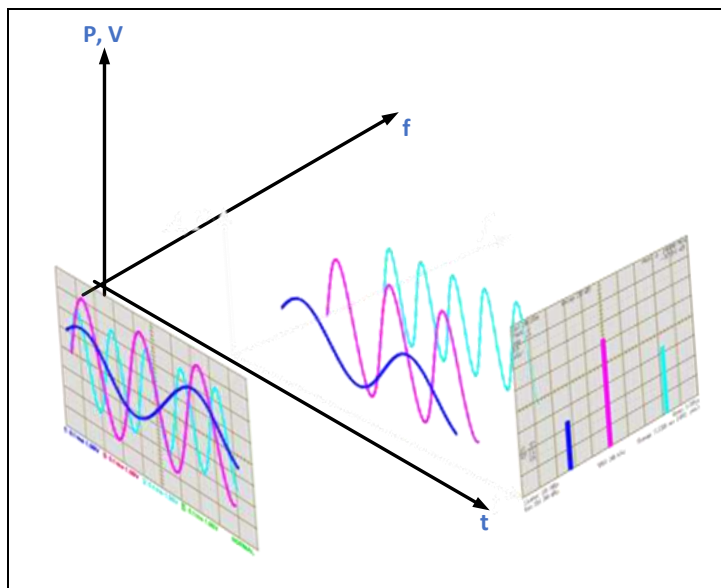
$$P_T(t) = P_C + P_{BLI} + P_{BLS} \dots \dots (10)$$

$$P_T(t) = P_C \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) + \dots \dots (11)$$

En la figura 4, se muestra de manera comparada las presentaciones de una señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

Figura 4

Presentación comparada de señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia



Nota: Basado en Wolff [15]

1.2 Antecedentes

Shuiying [16] diseñó un sistema de demostración de amplitud modulada basada en JAVA, el cual analiza la señal AM con portadora presente en el dominio del tiempo. Esto muestra la señal modulante y la portadora, luego la señal modulada en el dominio del tiempo.

A su vez, Zhang [17] muestra cómo la utilización del Matlab es útil en la enseñanza de los sistemas de comunicaciones incluyendo los sistemas de modulación de AM con portadora presente. Matlab es una herramienta muy potente pero solo es un simulador.

Siglent [18], por su parte, muestra la utilización de un generador de forma de onda más un osciloscopio con la facilidad de análisis de espectros mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) para medir el índice de modulación AM. En este documento, se plantea una alternativa económica para medir de manera indirecta el índice de modulación, pero podría aplicarse para evaluar otros parámetros de la señal modulada en AM con portadora presente. Sin embargo, presenta algunas limitaciones como la frecuencia que solo llega a 120 MHz y otras con las que normalmente no cuenta un osciloscopio, pero sí un analizador de espectros.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Para poder implementar este estudio se utilizó el analizador de espectros Rohde Schwarz R&S®FSH4/8/13/20, el osciloscopio Tektronix TBS 1000C y el generador de radiofrecuencias Rigol DSG3065B-IQ.

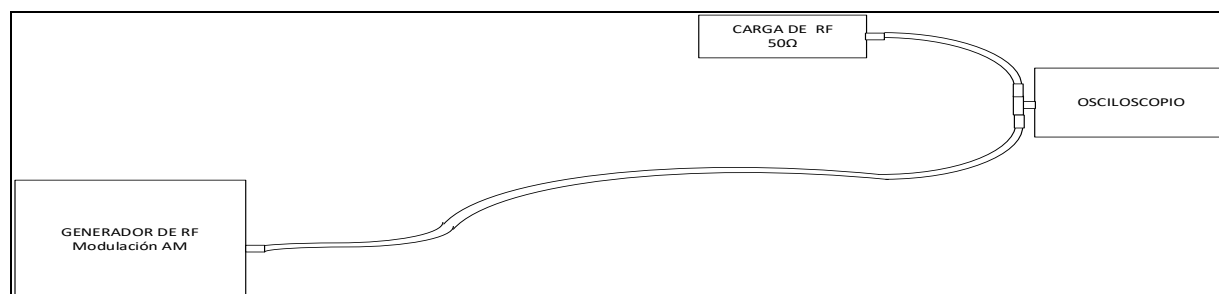
El analizador de espectros Rohde Schwarz R&S®FSH4/8/13/20 es un analizador de última generación que trabaja en el rango de frecuencias de 100 kHz a 8 GHz, con señal de entrada máxima de 20 dBm [19]. El generador de radiofrecuencias Rigol DSG3065B-IQ es un generador de radiofrecuencias moderno que opera en el rango de frecuencias de 9 kHz a 6.5GHz con un nivel de señal de salida que va de -130dBm a + 25dBm [20]. El osciloscopio Tektronix TBS 1000C trabaja en la banda de frecuencias de DC a 100 MHz con un voltaje de entrada máximo de 300 V_{RMS} [21].

2.2. Métodos

La figura 5 muestra el diagrama de conexionado de los equipos para comprobar los parámetros de la modulación AM en el dominio del tiempo.

Figura 5

Esquema del conexionado para las mediciones de señal AM en el dominio del tiempo



Las mediciones realizadas con el osciloscopio con unidades de voltios se realizaron con señal modulada en amplitud con portadora presente siendo la portadora de 10, 20 y 30 MHz, 0 dBm y la señal modulante de 10 kHz y porcentaje de modulación (M) 20%, 40 % y 60 %. Los parámetros que se pudieron medir fueron el voltaje eficaz V_{RMS} y el voltaje pico a pico de la

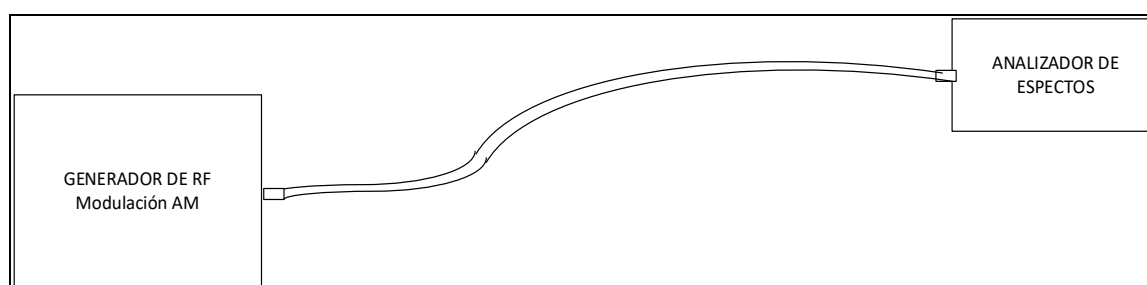
portadora (onda con modulación $m=0$) V_{cpp} y para la portadora modulada con porcentaje de modulación M del 20 %, 40 % y 60 %. A partir de estos valores medidos se calcularon los valores de la potencia de portadora P_c y la potencia total P_T , la cual incluye la potencia de portadora y la potencia de bandas laterales para la señal modulada. Luego se calcularon los valores teóricos de los diferentes parámetros medidos y de la potencia total. Finalmente, se calcularon los errores porcentuales para las mediciones de voltaje eficaz y voltaje pico a pico, y los errores para la potencia de portadora y la potencia total que compara los valores obtenidos de la medición del voltaje eficaz con los valores obtenidos teóricamente.

En base a los valores medidos se elaboraron las tablas para los valores medidos, calculados y para los errores porcentuales.

La figura 6 muestra el diagrama de conexión de los equipos para comprobar los parámetros de la modulación AM en el dominio de la frecuencia.

Figura 6

Esquema del conexionado para las mediciones de señal AM en el dominio de la frecuencia



Las mediciones realizadas con el analizador de espectro se llevaron a cabo con señal modulada en amplitud con portadora presente. La frecuencia de la portadora fue de 10, 20 y 30 MHz, 0 dBm y la señal modulante de 10 kHz y porcentaje de modulación (M) 20 %, 40 % y 60 %. Se midieron la potencia de portadora, potencia total (potencia de canal) y las potencias de las bandas laterales inferior y superior en dBm , μW y mV . Luego se calcularon los valores teóricos de los diferentes parámetros medidos. Finalmente, se calcularon los errores porcentuales para las mediciones para la potencia de portadora, potencia de bandas laterales y la potencia total en términos de la potencia y el voltaje.

En base a los valores medidos, se elaboraron las tablas para los valores medidos y calculados y las tablas para los errores porcentuales de potencia y de voltaje.

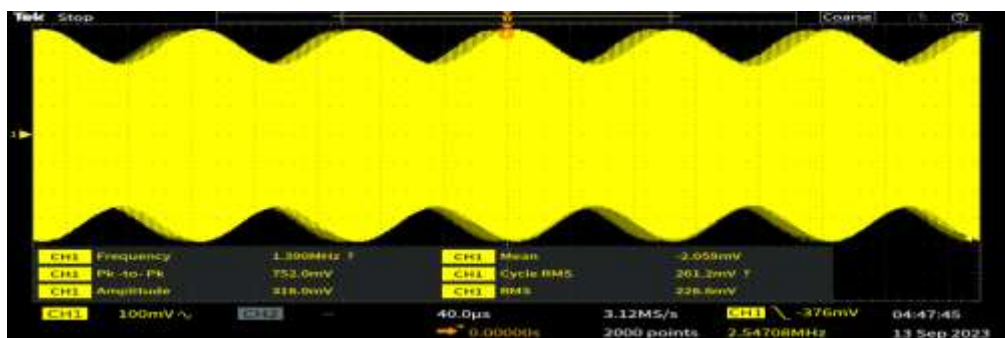
3. Resultados

3.1. Mediciones con osciloscopio

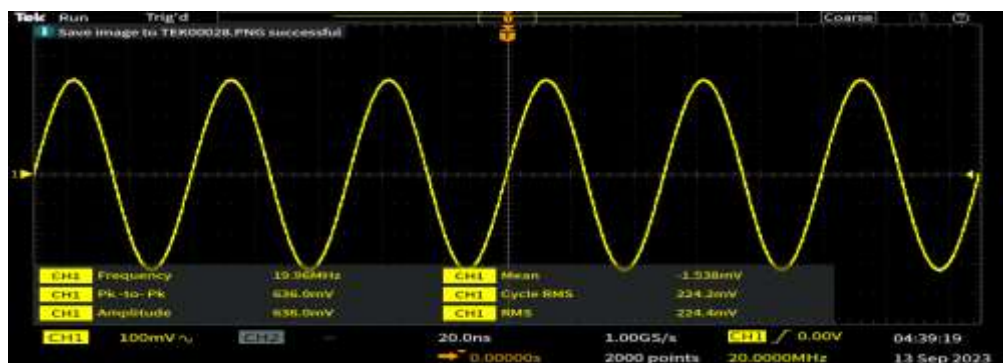
En las figuras 7 al 12, se muestran las mediciones realizadas con osciloscopio de la señal modulada con las portadoras de 10, 20 y 30 MHz y señal modulante de 10 kHz y profundidades de modulación $m=0.2$, $m=0.4$, $m=0.6$, $m=0.8$ y $m=1$.

Figura 7

Medición en el dominio del tiempo de señal portadora de 20 MHz

**Figura 8**

Medición en el dominio del tiempo de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 20 %

**Figura 9**

Medición en el dominio del tiempo de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 40 %

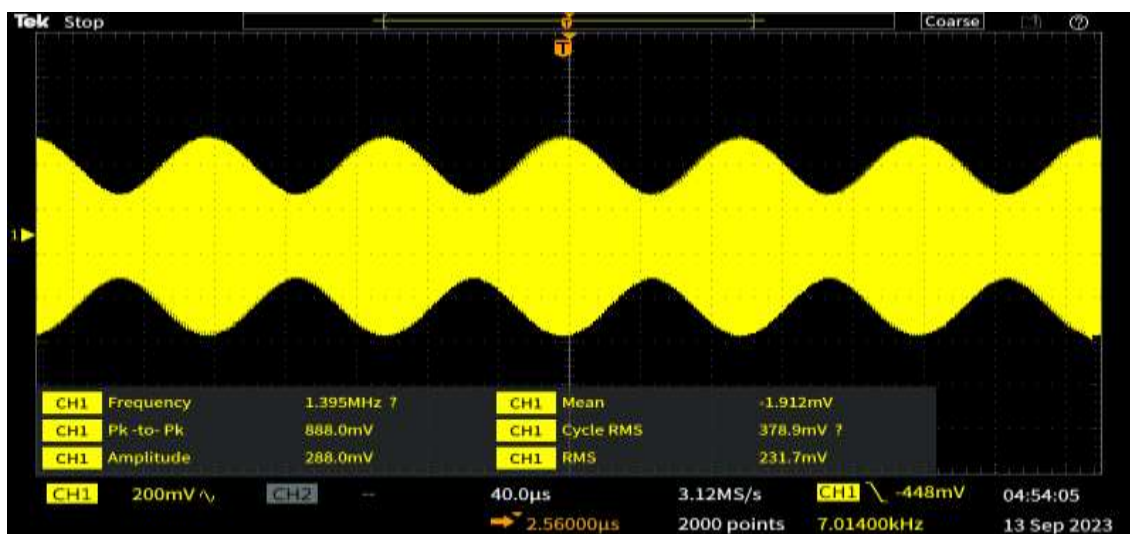
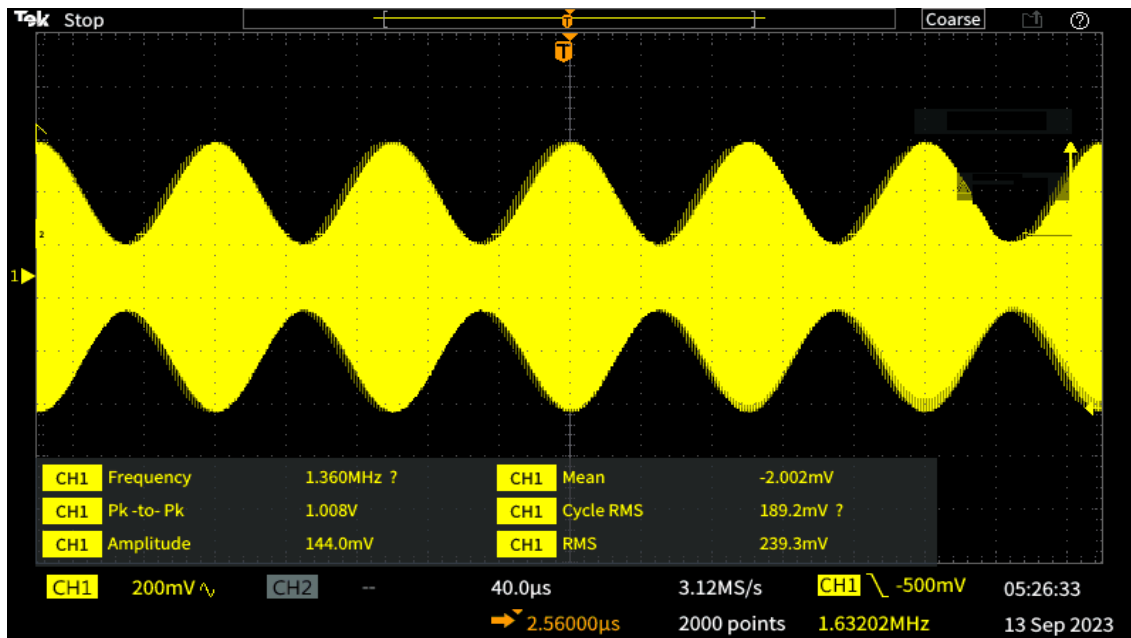


Figura 10

Medición en el dominio del tiempo de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 60 %

**Figura 11**

Medición en el dominio del tiempo de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 80 %

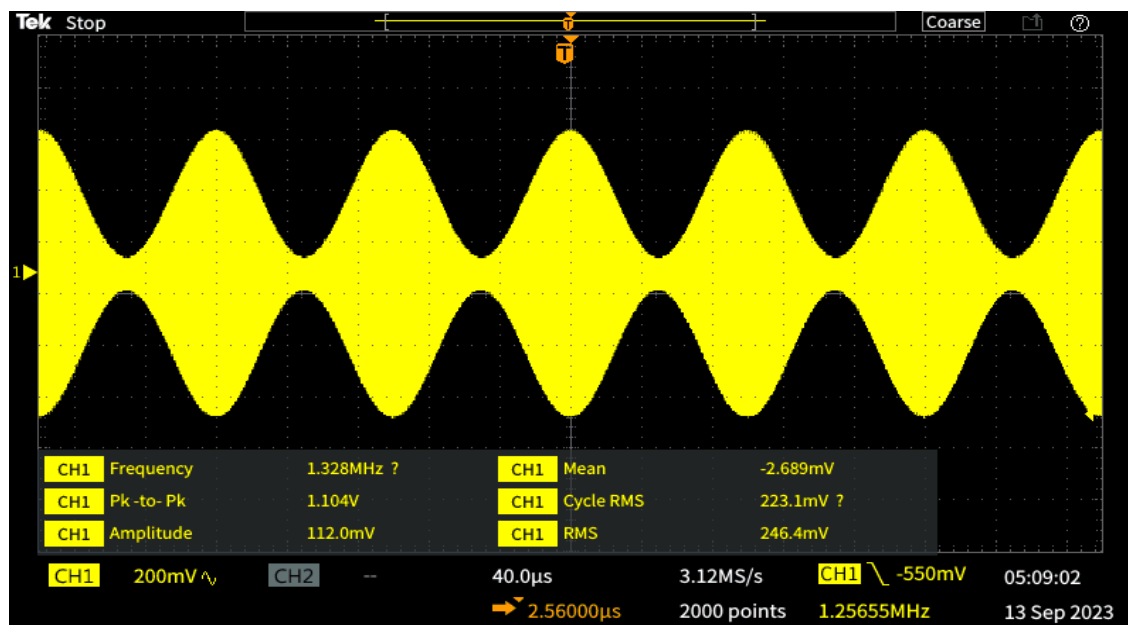
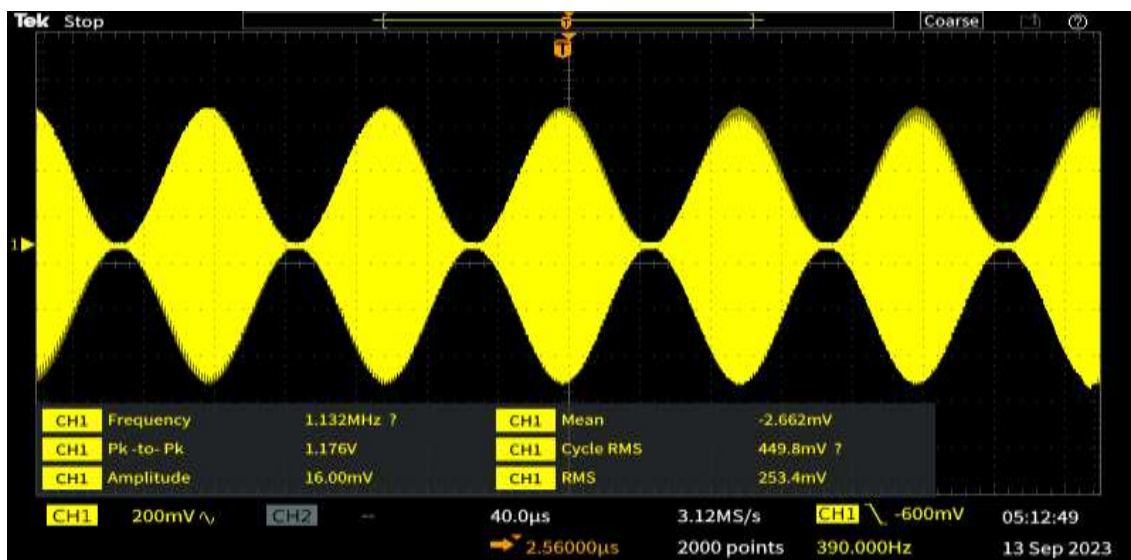


Figura 12

Medición en el dominio del tiempo de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 100 %



En la tabla 1, se muestra de manera resumida las mediciones realizadas en el circuito de la figura 4.

Tabla 1

Voltajes medidos de la señal portadora y de las señales moduladas

f_c (MHz) M		10	20	30	Observaciones
0%	V_{RMS} (V)	0.228	0.224	0.230	Medido
	V_{cpp} (V)	0.636	0.636	0.652	Medido
	P_c (mW)	1.040	1.007	1.055	Calculado de las mediciones
20%	V_{RMS} (V)	0.227	0.227	0.232	
	V_{pp} (V)	0.752	0.752	0.784	
	$P_T(mW)=P_c(1+m^2/2)$	1.031	1.027	1.076	Calculado de las mediciones
40%	V_{RMS} (V)	0.232	0.232	0.237	
	V_{pp} (V)	0.888	0.888	0.904	
	$P_T(mW)=P_c(1+m^2/2)$	1.077	1.074	1.121	Calculado de las mediciones
60%	V_{RMS} (V)	0.238	0.239	0.244	
	V_{pp} (V)	0.992	1.008	1.032	
	$P_T(mW)=P_c(1+m^2/2)$	1.137	1.142	1.191	Calculado de las mediciones
80%	V_{RMS} (V)	0.246	0.246	0.251	
	V_{pp} (V)	1.056	1.104	1.120	
	$P_T(mW)=P_c(1+m^2/2)$	1.209	1.214	1.264	Calculado de las mediciones
100%	V_{RMS} (V)	0.254	0.253	0.259	
	V_{pp} (V)	1.152	1.176	1.216	
	$P_T(mW)=P_c(1+m^2/2)$	1.286	1.284	1.341	Calculado de las mediciones

En la tabla 2, se muestran de manera resumida los cálculos teóricos realizados para las mediciones del circuito de la figura 4 de acuerdo con las ecuaciones (1) al (5).

Tabla 2

Voltajes teóricos de las señales portadoras y moduladas

$f_c(\text{MHz})$ M		10	20	30
0.0	$V_{\text{RMS}} = [P_c(W) \times Z_0]^{0.5}$	0.2236	0.2236	0.2236
	$V_{\text{cpp}}(V) = 2 \times 20.5 \times V_{\text{RMS}}$	0.6325	0.6325	0.6325
	$P_c(\text{mW})$	1.0000	1.0000	1.0000
0.2	$V_{\text{RMS}} = [P_T(W) \times Z_0]^{0.5}$	0.2258	0.2258	0.2258
	$V_{\text{cpp}}(V) = V_{\text{cpp}}(1 + m)$	0.7589	0.7589	0.7589
	$P_T(\text{mW}) = P_c(1 + m^2/2)$	1.0200	1.0200	1.0200
0.4	$V_{\text{RMS}} = [P_T(W) \times Z_0]^{0.5}$	0.2324	0.2324	0.2324
	$V_{\text{cpp}}(V) = V_{\text{cpp}}(1 + m)$	0.8854	0.8854	0.8854
	$P_T(\text{mW}) = P_c(1 + m^2/2)$	1.0800	1.0800	1.0800
0.6	$V_{\text{RMS}} = [P_T(W) \times Z_0]^{0.5}$	0.2429	0.2429	0.2429
	$V_{\text{cpp}}(V) = V_{\text{cpp}}(1 + m)$	1.0119	1.0119	1.0119
	$P_T(\text{mW}) = P_c(1 + m^2/2)$	1.1800	1.1800	1.1800
0.8	$V_{\text{RMS}} = [P_T(W) \times Z_0]^{0.5}$	0.2569	0.2569	0.2569
	$V_{\text{cpp}}(V) = V_{\text{cpp}}(1 + m)$	1.1384	1.1384	1.1384
	$P_T(\text{mW}) = P_c(1 + m^2/2)$	1.3200	1.3200	1.3200
1	$V_{\text{RMS}} = [P_T(W) \times Z_0]^{0.5}$	0.2739	0.2739	0.2739
	$V_{\text{cpp}}(V) = V_{\text{cpp}}(1 + m)$	1.2649	1.2649	1.2649
	$P_T(\text{mW}) = P_c(1 + m^2/2)$	1.5000	1.5000	1.5000

En la tabla 3, se muestran los errores calculados por comparación entre los valores teóricos y los valores medidos

Tabla 3*Tabla de errores porcentuales (%) de los voltajes de las ondas portadoras y moduladas*

$f_c(\text{MHz})$ M		10	20	30
0.0	$V_{RMS} (V)$	1.9647	0.3547	2.7250
	$V_{cpp} (V)$	0.5604	0.5604	3.0903
	$P_c (mW)$	3.9680	0.7107	5.5242
0.2	$V_{RMS} (V)$	0.5173	0.3402	2.7313
	$V_{pp} (V)$	0.9153	0.9153	3.3011
	$P_T (mW) = P_c(1 + m^2/2)$	1.0373	0.6815	5.5373
0.4	$V_{RMS} (V)$	0.1201	0.2922	1.9025
	$V_{pp} (V)$	0.2894	0.2894	2.0964
	$P_T (mW) = P_c(1 + m^2/2)$	0.2400	0.5835	3.8412
0.6	$V_{RMS} (V)$	1.8523	1.6053	0.4532
	$V_{pp} (V)$	1.9694	0.3883	1.9835
	$P_T (mW) = P_c(1 + m^2/2)$	3.6702	3.1847	0.9085
0.8	$V_{RMS} (V)$	4.2836	4.0889	2.1427
	$V_{pp} (V)$	7.2399	3.0235	1.6180
	$P_T (mW) = P_c(1 + m^2/2)$	8.3836	8.0107	4.2395
1	$V_{RMS} (V)$	7.3984	7.4714	5.4631
	$V_{pp} (V)$	8.9264	7.0290	3.8668
	$P_T (mW) = P_c(1 + m^2/2)$	14.2494	14.3846	10.6277

Mediciones con analizador de espectros

En las figuras 13 al 19, se muestran las mediciones realizadas con analizador de espectros de la señal modulada con la portadora de 10 MHz y señal modulante de 10 kHz y profundidad de $m=20\%$, $m=40\%$ y $m=60\%$ con unidades de dBm , μW y mV .

Figura 13

Medición en el dominio de la frecuencia de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 20%, medición en dBm



Figura 14

Medición en el dominio de la frecuencia de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 40%, medición en dBm

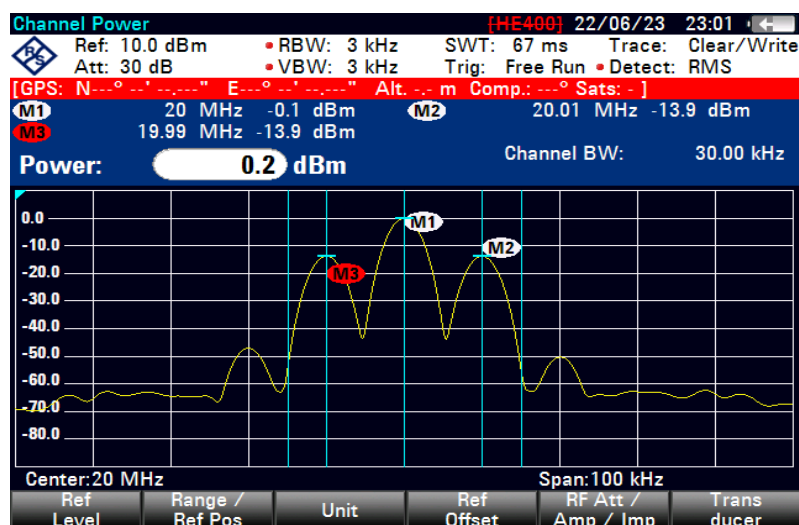


Figura 15

Medición en el dominio de la frecuencia de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 60%, medición en dBm

**Figura 16**

Medición en el dominio de la frecuencia de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 100%, medición en dBm

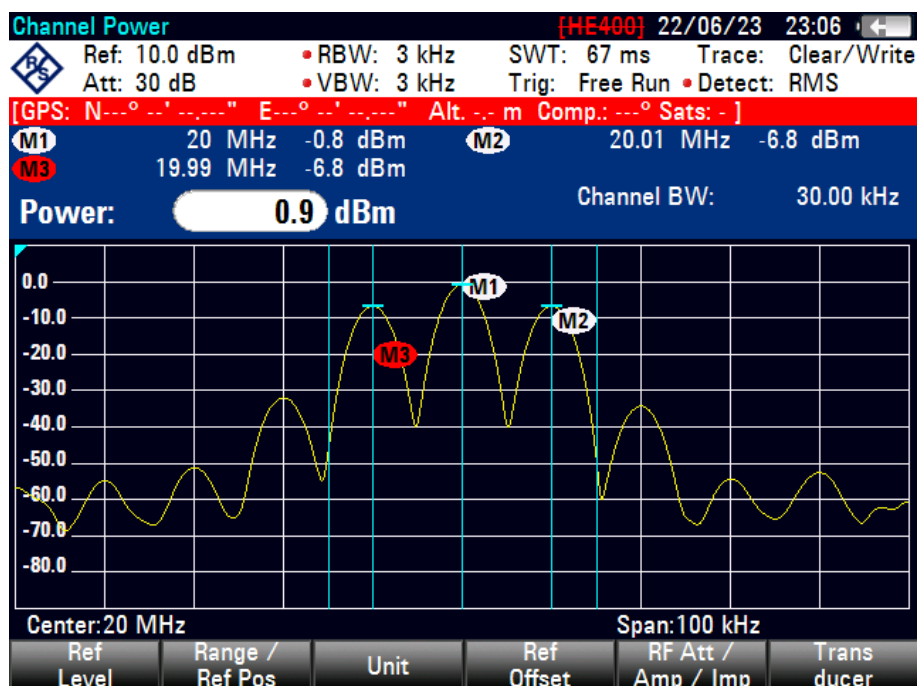
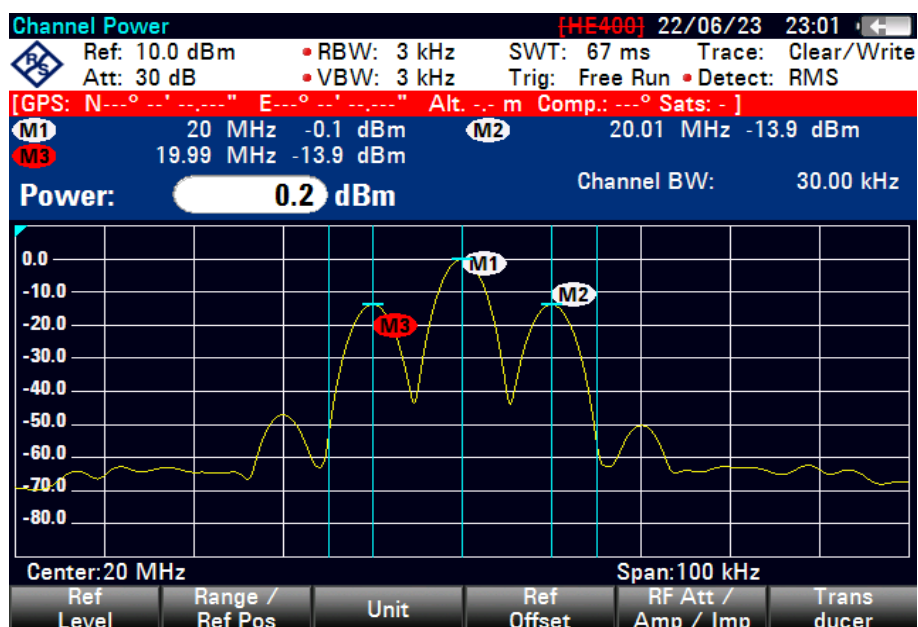


Figura 17

Medición en el dominio de la frecuencia de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 40%, medición en dBm

**Figura 18**

Medición en el dominio de la frecuencia de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 40%, medición en μW

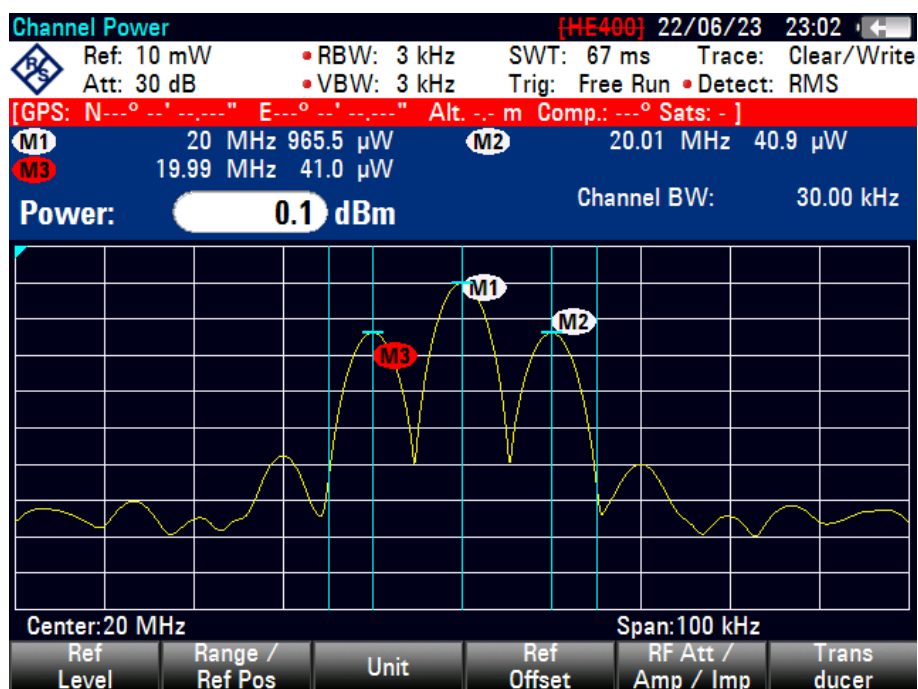
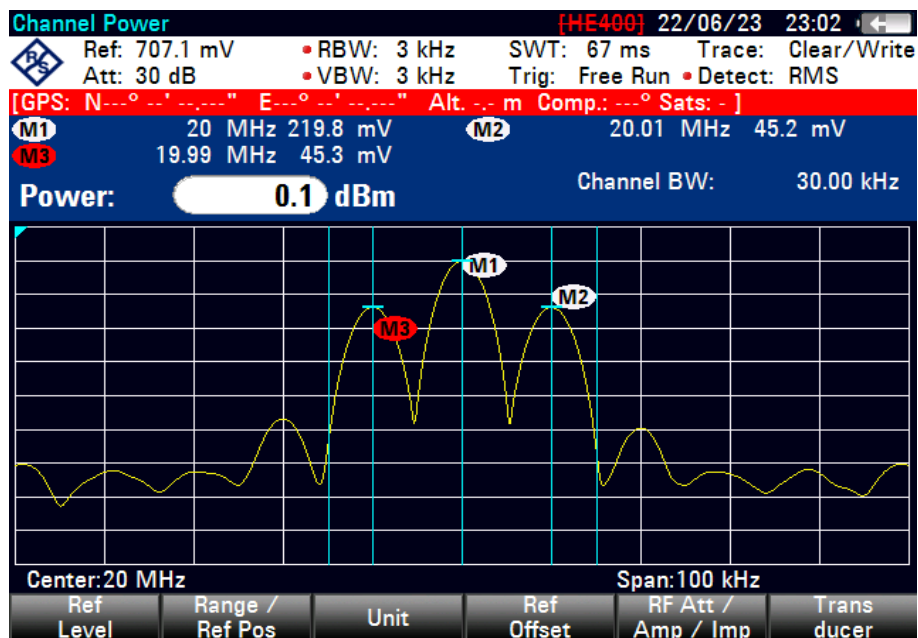


Figura 19

Medición en el dominio de la frecuencia de señal portadora de 20 MHz modulada en AM con portadora presente con porcentaje de modulación de 40%, medición en mV



En la tabla 4, se muestran los resultados de las mediciones de la potencia de portadora, de las bandas laterales y de la potencia total (potencia de canal) realizadas con el analizador de espectros.

Tabla 4

Potencia medida de la portadora y bandas laterales y potencia de canal

f(MHz)	M	Potencia	10			20			30		
			dBm	μ W	mV	dBm	μ W	mV	dBm	μ W	mV
20 %	P _C		-0.4	905	212.5	-0.1	986	222.1	0.0	994	222.9
	P _{BLI}		-20.7	8.3	20.5	-19.8	10.5	22.9	-19.9	10.3	22.7
	P _{BLS}		-20.7	8.4	20.6	-19.8	10.5	22.9	-19.9	10.3	22.7
	P _T		-0.4			0.0			0		
40 %	P _C		-0.5	893	211.2	-0.1	965	219.8	-0.1	975	220.8
	P _{BLI}		-14.6	35.3	41.2	-13.9	41.0	45.2	-13.9	40.4	44.9
	P _{BLS}		-14.6	35.6	41.3	-13.9	41.0	45.2	-13.9	40.4	45.1
	P _T		-0.2			0.2			0.2		
60%	P _C		-0.6	865	208	-0.3	932.5	215.9	-0.3	943.0	217.4

	P _{BLI}	-11.1	78.3	62.6	-10.5	88.0	66.4	-10.6	87.5	66.2
	P _{BLS}	-11.0	79.0	62.8	-10.5	88.0	66.4	-10.5	88.0	66.4
	P _T	0.0			0.4			0.4		
80%	P _C	-0.9	818	202.2	-0.5	880	209.9	-0.5	893	211.1
	P _{BLI}	-8.8	132.2	81.5	-8.4	145.5	85.3	-8.4	145.0	85.2
	P _{BLS}	-8.8	133.3	81.8	-8.4	145.5	85.3	-8.3	146.0	85.6
	P _T	0.3			0.6			0.7		
100%	P _C	-1.1	768	195.8	-0.8	826.8	203.4	-0.7	843.7	205.5
	P _{BLI}	-7.2	191.5	98.1	-6.8	209.0	102.2	-6.8	210.0	102.4
	P _{BLS}	-7.1	193.4	98.4	-6.8	209	102.2	-6.8	211.1	102.8
	P _T	0.6			0.9			1.0		

En la tabla 5, se muestran los resultados de los cálculos teóricos de la potencia de portadora, de las bandas laterales y de la potencia total realizados de acuerdo con las fórmulas presentadas en las ecuaciones (8) al (11).

Tabla 5

Potencia calculada de la portadora y bandas laterales y potencia de canal

f(MHz) M		10			20			30		
		dBm	μW	mV	dBm	μW	mV	dBm	μW	mV
20 %	P _C	-0.40	912.0	213.54	-0.10	977.24	221.05	0.00	1000.0	223.61
	P _{BLI}	-20.40	9.12	21.35	-20.10	9.77	22.10	-19.90	10.00	22.36
	P _{BLS}	-20.40	9.12	21.35	-20.10	9.77	22.10	-19.90	10.00	22.36
	P _T	-0.31	930.3		-0.01	996.8		0.00	1020.0	
40 %	P _C	-0.5	891.25	211.10	-0.1	977.24	221.05	-0.1	977.24	221.05
	P _{BLI}	-14.48	35.65	42.22	-14.08	39.09	44.21	-13.9	39.09	44.21
	P _{BLS}	-14.48	35.65	42.22	-14.08	39.09	44.21	-13.9	39.09	44.21
	P _T	-0.17	962.6		0.23	1055.4		0.2	1055.4	
60 %	P _C	-0.6	870.96	208.68	-0.3	933.25	216.02	-0.3	933.25	216.02
	P _{BLI}	-11.06	78.39	62.60	-10.76	83.99	64.80	-10.6	83.99	64.80
	P _{BLS}	-11.06	78.39	62.60	-10.76	83.99	64.80	-10.5	83.99	64.80
	P _T	0.12	1027.7		0.42	1101.2		0.4	1101.2	
80 %	P _C	-0.9	812.83	201.60	-0.5	891.25	211.10	-0.5	891.25	211.10
	P _{BLI}	-8.86	130.05	80.64	-8.46	142.60	84.44	-8.4	142.60	84.44
	P _{BLS}	-8.86	130.05	80.64	-8.46	142.60	84.44	-8.3	142.60	84.44
	P _T	0.31	1072.9		0.71	1176.5		0.7	1176.5	
100 %	P _C	-1.1	776.25	197.01	-0.8	831.76	203.93	-0.7	851.14	206.29

	P _{BLI}	-7.12	194.06	98.50	-6.82	207.94	101.97	-6.8	212.78	103.15
	P _{BLS}	-7.12	194.06	98.50	-6.82	207.94	101.97	-6.8	212.78	103.15
	P _T	0.66	1164.7		0.96	1247.7		1	1276.7	

En la tabla 6, se presentan los errores absolutos y porcentuales para las potencias de portadora y bandas laterales resultantes de la comparación entre las mediciones realizadas con el analizador de espectros y los cálculos teóricos.

Tabla 6

Error absoluto y error porcentual para la potencia de la portadora, bandas laterales y potencia de canal

f(MHz)	M	10				20				30			
		Pot. Med. (μW)	Pot. Calc (μW)	Error abs. (μW)	Error porc. (%)	Pot. Med. (μW)	Pot. Calc (μW)	Error abs. (μW)	Error porc. (%)	Pot. Med. (μW)	Pot. Calc (μW)	Error abs. (μW)	Error porc. (%)
20%	P _c	905	912.0	7.011	0.769	986	977.2	8.763	0.897	994	1000.0	6.000	0.600
	P _{BLI}	8.3	9.1	0.820	8.992	10.5	9.8	0.728	7.446	10.3	10.0	0.300	3.000
	P _{BLS}	8.4	9.1	0.720	7.896	10.5	9.8	0.728	7.446	10.3	10.0	0.300	3.000
	P _T	921.7	930.3	8.551	0.919	1007	996.8	10.218	1.025	1014.6	1020.0	5.400	0.529
40%	P _c	893	891.3	1.749	0.196	965	977.2	12.237	1.252	975	977.2	2.237	0.229
	P _{BLI}	35.3	35.7	0.350	0.982	41	39.1	1.911	4.888	40.4	39.1	1.311	3.353
	P _{BLS}	35.6	35.7	0.050	0.140	41	39.1	1.911	4.888	40.4	39.1	1.311	3.353
	P _T	963.9	962.6	1.349	0.140	1047	1055.4	8.416	0.797	1055.8	1055.4	0.384	0.036
60%	P _c	865	871.0	5.964	0.685	932.5	933.3	0.754	0.081	943	933.3	9.746	1.044
	P _{BLI}	78.3	78.4	0.087	0.111	88	84.0	4.007	4.771	87.5	84.0	3.507	4.175
	P _{BLS}	79	78.4	0.613	0.782	88	84.0	4.007	4.771	88	84.0	4.007	4.771
	P _T	1022.3	1027.7	5.437	0.529	1108.5	1101.2	7.260	0.659	1118.5	1101.2	17.260	1.567
80%	P _c	818	812.8	5.169	0.636	880	891.3	11.251	1.262	893	891.3	1.749	0.196
	P _{BLI}	132.2	130.1	2.147	1.651	145.5	142.6	2.900	2.034	145	142.6	2.400	1.683
	P _{BLS}	133.3	130.1	3.247	2.497	145.5	142.6	2.900	2.034	146	142.6	3.400	2.384
	P _T	1083.5	1072.9	10.564	0.985	1171	1176.5	5.451	0.463	1184	1176.5	7.549	0.642
100%	P _c	768	776.3	8.247	1.062	826.8	831.8	4.964	0.597	843.7	851.1	7.438	0.874
	P _{BLI}	191.5	194.1	2.562	1.320	209	207.9	1.059	0.509	210	212.8	2.785	1.309
	P _{BLS}	193.4	194.1	0.662	0.341	209	207.9	1.059	0.509	211.1	212.8	1.685	0.792
	P _T	1152.9	1164.4	11.471	0.985	1244.8	1247.7	2.846	0.228	1264.8	1276.7	11.907	0.933

En la tabla 7, se presentan los errores absolutos y porcentuales resultantes de la comparación entre las mediciones realizadas con el analizador de espectros y los cálculos teóricos.

Tabla 7

Error absoluto y error porcentual para el voltaje de la portadora

f(MHz)	M	10				20				30			
		Volt. Med. (mV)	Volt. Calc. (mV)	Error abs. (mV)	Error porc. (%)	Volt. Med. (mV)	Volt. Calc. (mV)	Error abs. (mV)	Error porc. (%)	Volt. Med. (mV)	Volt. Calc. (mV)	Error abs. (mV)	Error porc. (%)
20%	A _c	212.5	213.54	1.043	0.005	222.1	221.05	1.053	0.005	222.9	223.61	0.707	0.003
	A _{BLI}	20.5	21.35	0.854	0.040	22.9	22.10	0.795	0.036	22.7	22.36	0.339	0.015
	A _{BLS}	20.6	21.35	0.754	0.035	22.9	22.10	0.795	0.036	22.7	22.36	0.339	0.015
40%	A _c	211.2	211.10	0.102	0.000	219.8	221.05	1.247	0.006	220.8	221.05	0.247	0.001
	A _{BLI}	41.2	42.22	1.020	0.024	45.2	44.21	0.991	0.022	44.9	44.21	0.691	0.016
	A _{BLS}	41.3	42.22	0.920	0.022	45.2	44.21	0.991	0.022	45.1	44.21	0.891	0.020
60%	A _c	208	208.68	0.682	0.003	215.9	216.02	0.116	0.001	217.4	216.02	1.384	0.006
	A _{BLI}	62.6	62.60	0.005	0.000	66.4	64.80	1.595	0.025	66.2	64.80	1.395	0.022
	A _{BLS}	62.8	62.60	0.195	0.003	66.4	64.80	1.595	0.025	66.4	64.80	1.595	0.025
80%	A _c	202.2	201.60	0.603	0.003	209.9	211.10	1.198	0.006	211.1	211.10	0.002	0.000
	A _{BLI}	81.5	80.64	0.861	0.011	85.3	84.44	0.861	0.010	85.2	84.44	0.761	0.009
	A _{BLS}	81.8	80.64	1.161	0.014	85.3	84.44	0.861	0.010	85.6	84.44	1.161	0.014
100%	A _c	195.8	197.01	1.209	0.006	203.4	203.93	0.532	0.003	205.5	206.29	0.793	0.004
	A _{BLI}	98.1	98.50	0.404	0.004	102.2	101.97	0.234	0.002	102.4	103.15	0.747	0.007
	A _{BLS}	98.4	98.50	0.104	0.001	102.2	101.97	0.234	0.002	102.8	103.15	0.347	0.003

4. Discusión

Comparando con el estudio realizado por Shuiying [16], nuestro análisis de dichos sistemas con osciloscopio y analizador de espectros es mucho más experiencial y completo, lo que permite encontrar diversos parámetros de las señales tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. En el caso del estudio realizado por Zhang [17], comparativamente a la simulación con Matlab, en nuestro estudio se utiliza un sistema casi real pues el generador de radiofrecuencias tiene las características propias de un transmisor solo que trabaja con baja potencia (Equivaldría a un driver), mientras que el osciloscopio y el analizador utilizados son equipos utilizados en la práctica de la ingeniería de cada día. En el caso de la publicación de Siglent [18], la aproximación a nuestro estudio podría ser mucho más cercana, porque el análisis espectral con FFT también permite encontrar los parámetros de la señal en el dominio de la frecuencia pero tiene limitaciones en la precisión lo que exige de un osciloscopio de gama alta lo cual no necesariamente garantiza la precisión. También la resolución del análisis con FFT es mucho menor. En resumen, la confiabilidad y las prestaciones del análisis con FFT es mucho menor a las obtenidas del análisis por hardware con analizador de espectros.

En los proyectos desarrollados por Shuiying y Zhang, no hay un análisis comparativo con los valores teóricos que permita demostrar el grado de acercamiento de las simulaciones realizadas.

En este estudio, habiendo analizado los errores en el caso de las mediciones con osciloscopio, se obtuvo que los errores porcentuales aumentan con el aumento de la frecuencia y del porcentaje de modulación. Los mayores errores para la potencia total en 30 MHz fue de 14.38 % y para el voltaje en 10 MHz con un valor de 8.93 %. En el caso de las mediciones con analizador de espectros, los mayores errores se dieron para las mediciones de las bandas laterales en 10 MHz y 20 % de porcentaje de modulación con un error de 8.99 % y para el voltaje de las bandas laterales en 10 MHz y 20 % de porcentaje de modulación con un error de 0.04 %.

Las mediciones de parámetros como la P_T realizadas directamente por el analizador de espectros y a partir del voltaje RMS en el caso del osciloscopio difieren en porcentajes hasta del orden del 10 % tomando como referencia la medición del analizador.

Siglent [18] muestra la utilización de un generador de forma de onda más un osciloscopio que incluye análisis de espectros mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) para medir el índice de modulación AM. En dicho documento, se presenta el espectro de una portadora de 1 MHz modulada con una señal de 10 kHz pudiéndose observar la portadora y las dos bandas laterales con sus respectivos niveles en dBmV. En nuestro estudio, las mediciones de la portadora y bandas laterales para obtener el porcentaje de modulación (M) se realizan en μW , lo que permite un cálculo directo de M y el espectro muestra no solo las bandas laterales sino armónicos adicionales que no son significativos pero que demuestran una mayor exactitud de las mediciones.

5. Conclusiones

Este estudio demuestra que los osciloscopios y analizadores modernos tienen muchas prestaciones que permiten generar señales AM y medir prácticamente todas las diversas características de esta modulación en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

La enseñanza en la modalidad de X-learning de la modulación AM con portadora presente mediante experiencias de laboratorio que utilizan analizadores de espectros y osciloscopios modernos proporciona un aprendizaje experiencial de primera calidad que contribuirá a la formación óptima de nuestros futuros ingenieros.

Se sugiere la implementación de experiencias de laboratorio con analizador de espectros, generador de radiofrecuencias y osciloscopio en los cursos de Telecomunicaciones Analógicas o su equivalente. En los cursos de Señales y Sistemas y Procesamiento Digital de Señales o sus equivalentes se podrían utilizar generadores de funciones y osciloscopios con función FFT para implementar laboratorios que complementen la formación teórica de los alumnos o para implementar X-learning.

Referencias bibliográficas

- [1] A. Hajshirmohammadi, Incorporating Experiential Learning in Engineering Courses IEEE, 2017.
- [2] M. Schwartz, Information transmission, modulation, and noise : a unified approach to communication systems, 1980.
- [3] B. P. Lathi y Z. Ding, Modern Digital and Analog Communication Systems, New York: Oxford University Press, Inc., 2010.
- [4] A. B. Carlson, P. B. Crilly y J. C. Rutledge, Sistemas de comunicacion : una introducción a las señales y el ruido en las comunicaciones eléctricas, México: McGraw-Hill, 2007.
- [5] F. R. Dungan, Sistemas electrónicos de telecomunicación, Madrid: Paraninfo, 1996.
- [6] H. Mileaf, Electrónica uno, México D.F: Limusa, 1991.
- [7] J. M. Salmerón, Sistemas de modulación en amplitud y frecuencia: Teoría y diseño, México: Trillas, 1982.
- [8] S. Haykin y M. Moher, Communication Systems, Wiley, 2009.
- [9] G. Smillie, Analogue and Digital Communication Techniques, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [10] G. Das, “Analog communication”, Swayam, [En línea]. Available: https://onlinecourses.nptel.ac.in/noc20_ee69/preview. [Último acceso: 17 10 2023].
- [11] Universidad de Victoria, Canada., “Amplitude Modulation” [En línea]. Available: <https://www.ece.uvic.ca/~peterd/350nc7.pdf>. [Último acceso: 20 12 2023].
- [12] S. Faruque, Radio Frequency Modulation, SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, 2017.
- [13] Bharath Institute of Higher Education and Research, “Amplitude Modulation System” [En línea]. Available: https://www.bharathuniv.ac.in/colleges1/downloads/-courseware_ece/notes/BEC504%20-%20ce%201%20-%20NOTES.pdf.
- [14] New Jersey Institute of Technology, “NJIT - ECE489 Communications Systems - Experiment No.5: Amplitude Modulation” [En línea]. Available: <https://web.njit.edu/~gilhc/ECE489/ece489-V.htm>.
- [15] C. Wolff, “Fundamentos de radar - Analizador de espectro” [En línea]. Available: <https://www.radartutorial.eu/22.messpraxis/mp06.es.html>.
- [16] Z. Shuiying, D. Jingjing, J. Xuebo y Y. Runkai, Demo system of amplitude modulation based on Java, 2011.
- [17] Y. Zhang, The Application Of Matlab To Teaching Communication Systems, ASEE Conferences, 2009.

[18] Siglent, “Measuring the modulation index of an AM signal using an FFT – siglent”, 2019. [En línea]. Available: <https://www.siglenteu.com/application-note/measuring-the-modulation-index-of-an-am-signal-using-an-fft/>. [Último acceso: 20 12 2023].

[19] Rohde & Schwarz, “Manual de usuario de R&S®FSH4/8/13/20”, 2022. [En línea]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/es/manual/manual-de-usuario-de-r-s-fsh4-8-13-20-manuales_78701-29159.html. [Último acceso: 15 10 2023].

[20] Rigol Technologies C O., Ltd., “DSG3000 B Series RF Signal Generator”, 2020. [En línea]. Available: <https://www.rigolna.com/products/rf-signal-generators/dsg3000b/>. [Último acceso: 15 10 2023].

[21] Tektronix, “TBS1000C Series Oscilloscopes User Manual”, 2021. [En línea]. Available: <https://download.tek.com/manual/TBS1000C-Series-Digital-Storage-Oscilloscope-User-Manual-077157100.pdf>. [Último acceso: 15 10 2023].

Trayectoria académica

Víctor Manuel Cruz Ornetta

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

Profesor principal, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, Doctor en Ciencias Ambientales, Ingeniero Electrónico,

Autor corresponsal: victor.cruz@urp.edu.pe

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4353-7751>

Jorge Paul Ubillús Gonzales

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

Profesor, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, Doctor Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales, Ingeniero Electrónico

jorge.ubillus@urp.edu.pe

ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-6156-6663>

Julio González Prado

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

Profesor asociado, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. Maestro en Docencia Superior, Ingeniero Electrónico.

julio.gonzalez@urp.edu.pe

ORCID : [https://orcid.org/0000 0003 0384 7015](https://orcid.org/0000-0003-0384-7015)

Milton Peña Calero

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

Alumno de la carrera de Ingeniería Electrónica, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

202120442@urp.edu.pe

ORCID : <https://orcid.org/0009-0003-0767-7698>