



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
IEE2413 – ELECTRÓNICA

Proyecto - Amplitud Modulada - 2025-1

1. Objetivos

- Desarrollar habilidades propias del proceso de diseño en Ingeniería Eléctrica.
- Aplicar los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo del curso de Electrónica.
- Introducir una aplicación real y clásica de la electrónica analógica.
- Desarrollar habilidades de síntesis en la elaboración y presentación de un artículo de investigación.

2. Descripción

El proyecto final del curso tiene relación con la transmisión de información usando **Amplitud Modulada (AM)**. Esta es una de las formas más sencillas de transmitir información que siguen vigentes hasta el día de hoy. Por esta razón, todos los grupos deberán utilizar sus conocimientos de electrónica adquiridos durante el semestre para realizar las siguientes partes del proyecto:

- **Investigación** respecto a las bases teóricas y aplicaciones de la **Transmisión y Recepción AM**.
- **Diseño y Simulación** de un **Modulador AM** basado en Electrónica Analógica.
- **Diseño y Simulación** de un **Demodulador AM** basado en Electrónica Analógica.

Cada una de estas partes se explicará con detalle en las siguientes secciones. Procuren leer atentamente el enunciado completo para comprender efectivamente qué deben realizar en cada parte del proyecto. Además, recuerden citar todas las fuentes que utilizaron a lo largo del desarrollo de sus trabajos.

Los grupos que no presenten simulaciones tendrán nota mínima (1,0) en su nota de proyecto y, en consecuencia, reprobarán el curso.

3. Investigación Previa

Los temas mínimos a investigar, que se espera sean presentados en su trabajo y expliquen, son los siguientes:

- FFT como herramienta de visualización del contenido de frecuencias de una señal.
- Qué es y cómo funciona la transmisión y recepción con Amplitud Modulada (AM):
 - Fundamentos de la modulación y demodulación AM.
 - Índice de modulación y cómo influye su valor sobre la señal modulada. Explique cuando ocurre sobremodulación.

- Diagramas de bloques para el transmisor y el receptor.
- Modulación AM de un tono puro, su respectivo análisis matemático y correspondiente espectro de frecuencias.
- Ejemplos de Circuitos Electrónicos Moduladores y Demoduladores AM, sin olvidar la radio de galena.
- Espectro de frecuencias asociado a la modulación AM.
- Aplicaciones tecnológicas actuales que utilicen AM (mínimo 3).
- Radiodifusión AM utilizada en Chile y el espectro audible.

El objetivo de esta sección es que les ayude a entender el proceso de transmisión de información por Amplitud Modulada. Lo relevante es que sean precisos y concisos al traspasar a su presentación lo que investigaron.

4. Modulador AM

Como observará al realizar su investigación inicial, un modulador AM puede hacerse de múltiples formas, unas muy sencillas y otras muy complejas. En el caso del proyecto emplearemos elementos que vimos en el curso y que de forma simple pueden modular un mensaje en amplitud.

El circuito básico se presenta a continuación:

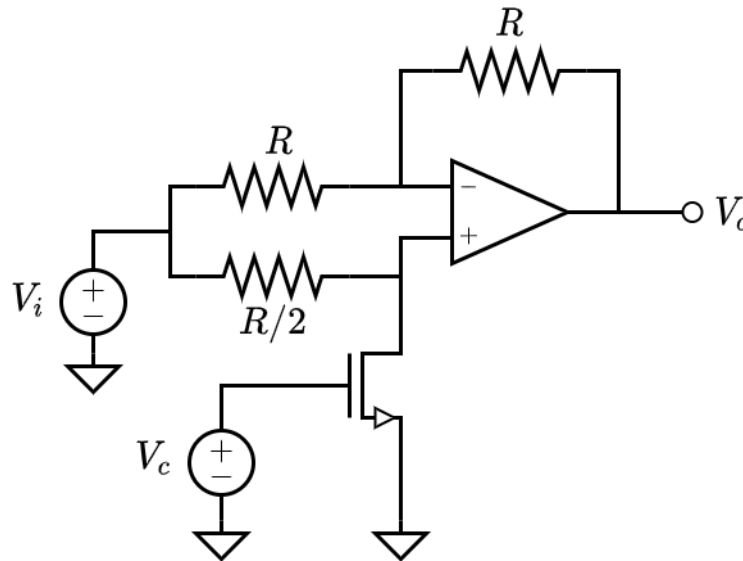


Figura 1: Circuito modulador AM

Éste circuito está compuesto por un MOSFET operado como switch controlado por un pulso cuadrado con igual tiempo de encendido y apagado denominado V_c , y un Op-Amp con resistencias varias. La señal V_i corresponde al mensaje que pretendemos modular, que puede ser una senoide o un audio complejo.

A continuación y teniendo en cuenta su investigación previa:

1. Haga un análisis teórico de la operación transiente del circuito considerando todos los elementos como ideales y explique cómo es que este circuito puede generar una señal AM. Apóyese con los conceptos, ecuaciones y figuras que estime pertinentes y distinga los casos cuando el switch está abierto y cuando está cerrado.

En términos cualitativos, ¿cómo debiera ser la relación entre las frecuencias del pulso de control y la señal de entrada?

Para esta sección sea claro en explicitar la función que cumple la señal de entrada y el pulso de control dentro del proceso de modulación.

2. ¿Cómo se diferencia esta forma de modulación AM con la teórica investigada en la sección anterior?

Con lo anterior, ya puede tener una idea más o menos gruesa sobre cómo funciona este modulador por lo que podemos pasar a hacer pruebas con él modulando señales con frecuencias portadoras específicas.

1. Defina un valor R del orden de $k\Omega$, e implemente el modulador en LTSpice usando elementos ideales dentro de lo posible. En el caso del transistor puede usar el modelo 2N7002 (revise su datasheet de ser necesario), pues es difícil modelar transistores ideales en LTSpice.
2. Haga una simulación transiente del circuito, considerando que éste modula un tono puro de 5 [kHz] y 2 $[V_{pk-pk}]$ **con la frecuencia portadora asociada a su grupo** según la siguiente tabla que tabula las frecuencias portadoras, su periodo equivalente y el tiempo que debe estar encendido el pulso de control para generar un duty-cycle de 50% sobre el periodo total de switching. Considere que el pulso de control provee al transistor 0 V y 5 V.

Grupo	Portadora [kHz]	Periodo [μ s]	DCy-50 [μ s]
1	760	1.32	0.66
2	1000	1.00	0.50
3	570	1.75	0.88
4	1140	0.88	0.44
5	1330	0.75	0.38
6	540	1.85	0.93
7	880	1.14	0.57
8	690	1.45	0.72
9	600	1.67	0.83
10	1030	0.97	0.48
11	930	1.08	0.54
12	1180	0.85	0.42
13	1420	0.70	0.35
14	960	1.04	0.52
15	1560	0.64	0.32
16	1490	0.67	0.34
17	1300	0.77	0.38
18	1600	0.62	0.31

Tabla 1: Frecuencias portadoras por grupo.

3. Registre la señal de entrada, el pulso cuadrado y el voltaje de salida del modulador. ¿Se condice la salida obtenida con sus expectativas previas?

4. Haga una FFT a las señales anteriores y registre su resultado.
 - ¿Qué puede decir de las componentes de frecuencia que componen cada una de las señales?
 - Busque en la FFT de la salida del modulador la frecuencia portadora y observe esa región con detalle, ¿puede observar el espectro de frecuencias clásico AM?
 - Comparando el espectro ideal de la modulación de un tono puro, ¿qué problema observa en la FFT de la salida del circuito modulador?
5. Diseñe un pequeño circuito con un OpAmp ideal y elementos pasivos (capacitor(es) y resistencia(s)) que al ser conectado a la salida del modulador ayude a mejorar el espectro de AM acercándolo al teórico. Luego haga una simulación transiente presentando la salida del modulador y del circuito diseñado y, usando la herramienta FFT, muestre que a la salida del bloque añadido el contenido de frecuencias de la modulación mejora. Ahora, ¿se condice la salida obtenida con sus expectativas? ¿qué está sucediendo?
6. Vía simulación, manipule la amplitud y componente DC del mensaje de forma que se produzca la salida adecuada. ¿Cuál es la amplitud máxima de señal permitida, para que la salida sea correctamente una modulación AM?

Aunque usted no lo crea, si armara este circuito en la realidad, conectara una antena pequeña y lo hiciera funcionar, es altamente probable que si usted trata de sintonizar la frecuencia asociada a su grupo cerca de su circuito, escuche el tono puro. **¿Qué radio AM chilena le fue asignada y sería interferida por su circuito?**

5. Demodulador AM

A partir de su investigación previa, pudo constatar que la modulación AM básicamente fuerza la envolvente de la portadora a tener la forma del mensaje. Es de este modo que podemos recuperar la señal usando un detector de envolvente como la radio de galena que probablemente usaban sus abuelos y/o padres como afición a la radio cuando ésta no era masiva.

Con nuestros conocimientos actuales de electrónica, es posible fabricar y ajustar un circuito detector de envolvente (tecnicismo de la radio de galena) y recuperar el mensaje transmitido.

A continuación se le pide diseñar un demodulador por detector de envolvente para el circuito modulador que diseñó en la sección anterior, usando la siguiente referencia [Link](#).

Tenga en cuenta las siguientes especificaciones para su diseño:

- La salida de su demodulador final debe estar centrada en 0, y tener una amplitud máxima de $1 V_{pk-pk}$.
- Puede usar el diodo simple 1N4148 de Spice para la implementación, pero recuerde que éste tiene una caída de voltaje en conducción.
- Puede agregar etapas de acondicionamiento de señal extras al detector de envolvente para cumplir con las especificaciones, y en esto está autorizado a usar OpAmps, transistores, elementos pasivos y acoples DC/AC a discreción e ideales **dentro de lo posible**.

Explique la operación de su circuito demodulador y sus etapas y documente sus decisiones de diseño. Del mismo modo, registre gráficos relevantes que ilustren la correcta demodulación al transmitir desde el modulador.

6. Integración del sistema

Para evaluar el desempeño de su modulador integrado con el demodulador, deberá a continuación poner a prueba sus circuitos transmitiendo una señal real con información.

Utilizando los circuitos modulador y demodulador ya diseñados y simulados, escoja una canción que le guste unánimemente al grupo, y extraiga un fragmento de no más de 15 segundos en formato .wav para poner a prueba su sistema de transmisión AM. Haga los ajustes e incorporaciones necesarias en su circuito para que pueda manipular adecuadamente la señal de audio, usando elementos ideales de LTSpice y verifique que puede escuchar el audio demodulado.

Nota: LTSpice le permite utilizar este archivo de audio como señal de entrada y, además, generar un archivo de audio para la señal procesada; sin embargo, el procesamiento toma tiempo. Investigue cómo importar y exportar archivos .wav y considere el uso del software **Audacity**.

7. Evaluación

La evaluación del proyecto se realizará mediante una presentación al equipo docente (vía Zoom/Teams) y la evaluación de pares.

- La presentación debe sintetizar el trabajo en un tiempo limitado (15 minutos) y contará con preguntas (10 minutos) del equipo docente para verificar el aprendizaje de todos los integrantes del grupo.
- La evaluación de pares pretende asegurar una distribución adecuada del trabajo. **Para prevenir free riders, quienes tengan una nota menor a 4.0 en la evaluación de pares automáticamente tendrán nota mínima en el proyecto, reprobando así también el curso.**

IMPORTANTE: Deberán también entregar sus archivos de LTSpice con las simulaciones pedidas. Los grupos que no cumplan con esto serán penalizados en su nota.

Del modo anterior, la nota final del proyecto será calculada como:

- 50 % Presentación
- 30 % Preguntas
- 20 % Evaluación de Pares

$$N_{Py} = 0.5 \cdot N_{Pres} + 0.3 \cdot N_{Preg} + 0.2 \cdot N_{Ev-Pares} \quad (1)$$

Lo anterior, siempre y cuando, la nota de presentación, preguntas y evaluación de pares sean simultáneamente ≥ 3.95 . De no cumplir con lo anterior, la nota final del proyecto será:

$$N_{Py} = MIN(3.9, 0.5 \cdot N_{Pres} + 0.3 \cdot N_{Preg} + 0.2 \cdot N_{Ev-Pares}) \quad (2)$$

WARNING - Si bien el proyecto no tiene nota por interrogación grupal o individual, conceptos básicos sobre el sistema de transmisión diseñado pueden considerarse como contenidos para el examen.

7.1. Presentación y Preguntas

Cada grupo debe preparar una presentación de 15 minutos máximo (con cronómetro) en donde debe mostrar al equipo docente vía zoom/teams el trabajo realizado de forma sintética. Se espera que la presentación incluya:

- Breve Marco Teórico
- Resultados de Simulaciones más relevantes que muestren la operación del Modulador, Demodulador y la Integración del Sistema.
- Conclusiones.

Con posterioridad a la presentación habrá un espacio de 10 minutos en los cuales el equipo docente hará preguntas al grupo para verificar el entendimiento del trabajo realizado. Todos los integrantes deben estar igualmente preparados para responder, so pena de ver afectada su nota en este ítem individualmente.

El equipo docente calificará, a su criterio y por separado, presentación (grupalmente) y preguntas (individualmente). En esto, cabe notar que, de ser necesario, y en caso de notarse alguna situación anómala, podría ocuparse un poco más de tiempo en la evaluación, como así también ser más incisivos con quienes participan menos de la presentación y las preguntas.

7.2. Evaluación de Pares

Cada integrante evaluará a sus compañeros al término del proyecto asignándoles una nota entre 1 y 7. La nota de evaluación de pares de cada estudiante se determinará como el promedio de las notas asignadas por sus compañeros.

Se les pide honestidad y no amiguismo en el proceso, más aún cuando se espera que, dado lo acotado de los tiempos de trabajo, todos participen y aporten equitativamente al trabajo sin cargar la mano al resto. **Para prevenir *free riders*, quienes tengan una nota menor a 4.0 en la evaluación de pares automáticamente tendrán nota mínima en el proyecto, reprobando así también el curso.**

7.3. Informe - Sin Ponderación, pero Obligatorio

Se pedirá un brevísimo informe, no evaluado, para efectos de síntesis del trabajo realizado. En este informe se deberá incluir:

- Circuito Final del Modulador Completo, incluidos los acondicionadores que sean necesarios, y los valores de componentes pasivos que corresponda, con breve explicación de los distintos bloques que lo componen.
- Simulación Transiente y FFT de la salida del modulador completo cuando se modula un tono puro de 5 [kHz], con el carrier asociado a su grupo de trabajo. La FFT debe mostrar el espectro de frecuencias AM de la modulación.
- Circuito Final del Demodulador Completo, incluidos los acondicionadores que sean necesarios, y los valores de componentes pasivos que corresponda, con breve explicación de los distintos bloques que lo componen.
- Simulación Transiente y FFT de la salida del sistema modulador-demodulador integrado completo cuando se modula un tono puro de 5 [kHz], con el carrier asociado a su grupo de trabajo. La FFT debe mostrar la recuperación del tono puro.

7.4. Bonus - Saturan la nota de proyecto en 7 y no sirven para aprobar el proyecto

Como incentivo para quienes quieran trabajar más allá de lo pedido, o bien apunten a una muy buena nota, pueden optar a realizar el bonus descrito a continuación para obtener décimas adicionales, que se sumarán a la nota final del Proyecto **siempre y cuando tengan una nota de proyecto sin bonus igual o superior a 3.95**.

Por un bonus de 5 décimas, deberá implementar en una protoboard o PCB los circuitos modulador y demodulador que diseñaron para luego realizar una demostración real y clara del funcionamiento de sus circuitos. Será responsabilidad de cada grupo preocuparse de conseguir los componentes y materiales necesarios para armar sus circuitos, así como también de realizar las demostraciones apropiadas que prueben su buen funcionamiento.

Las décimas de bonus solamente serán aplicables a su nota si esta es mayor o igual 3.95.

8. Fechas de Entrega

Las presentaciones se realizarán durante la última semana de clases (Semana del Lunes 23/Junio) en horarios consensuados y definidos por el equipo docente vía Strawpoll en el que los grupos podrán registrarse libremente. Se les pide a todos considerar que la evaluación toma cerca de 30 minutos, y que el equipo docente es el que debe escucharlas todas, lo que implica que todos (alumnos, ayudantes y profesor) deben acomodarse para llevar la evaluación del proyecto a buen puerto.

Los informes y simulaciones LTSpice deberán subirse a CANVAS a más tardar el día Jueves 3/Julio a las 18:00 hrs en buzón dedicado.