

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Desarrollo de proyectos de
Electrónica Analógica para
fomentar el aprendizaje activo en
grados de ingeniería



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Leyre Escribano Simón

María José Erro Betrán y Santiago Tainta Ausejo

Pamplona, 6 de septiembre de 2023

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis tutores, María José y Santi, por su orientación, paciencia y ayuda a lo largo de todo el proyecto. Además de todo lo aprendido, han conseguido hacerme disfrutar de la Electrónica Analógica como nunca antes.

Quiero agradecer también a todas las personas que han formado parte de mi vida durante estos años. A mis compañeras y compañeros, a los que están y a los que se fueron, por las horas de biblioteca y el consuelo mutuo en las épocas de exámenes, por el apoyo recibido con apuntes y explicaciones cuando alguna asignatura se torcía y por todas las horas compartidas fuera de la UPNA, que han sido sin duda lo mejor de esta etapa. A mis amigas de siempre, por aguantar los “hoy no puedo quedar, que tengo estudiar” y por nuestro décimo aniversario, que es solo el principio de todo lo que nos queda. Y a Julia, por haber hecho durante estos años en Pamplona un hogar lejos de casa.

Por último, quiero dedicar un agradecimiento especial a mi familia. A mi hermano, por ser siempre un ejemplo de constancia y ambición, a pesar de ser el pequeño, y por creer en mí más que yo misma. Y a mis padres, por todo. Por haber sufrido casi o más que yo durante estos años, por haber celebrado conmigo los buenos resultados y haberme ayudado a remontar en los malos y por haberme dado la oportunidad de hacer las cosas bien después de haber fallado. Este título es igual mío que de ellos.

RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Grado se expone una propuesta para incluir el aprendizaje basado en proyectos (PBL-Project Based Learning) en una asignatura Electrónica Analógica. Para ello, se realiza primero un estudio sobre la situación actual en la docencia de la Electrónica Analógica, seleccionando un conjunto de universidades nacionales e internacionales y comparando su propuesta educativa, valorando especialmente la importancia prestada a las prácticas.

Posteriormente, se exponen tres proyectos diseñados con el objetivo de poder ser empleados para impartir una asignatura avanzada de Electrónica Analógica. Estas propuestas consisten en un oscilador, un afinador electrónico y una transmisión infrarroja. De cada uno de ellos se detalla su diseño, análisis teórico, simulación en LTSpice y realización en el laboratorio.

PALABRAS CLAVE

Electrónica Analógica, Aprendizaje Basado en Proyectos

ABSTRACT

In this Bachelor's Final Degree Project, a proposal is presented to include Project Based Learning (PBL) in Analogue Electronics courses. To achieve this, a study on the current situation in national and international universities was first conducted, comparing their educational approaches to Analogue Electronics and assessing the emphasis placed on practical exercises.

Subsequently, three projects are introduced, designed with the aim of being used in an advanced Analogue Electronics course. These proposals consist of an oscillator, an electronic tuner, and an infrared transmission. Each project details its design, theoretical analysis, LTSpice simulation, and laboratory implementation.

KEYWORDS

Analogue Electronics, Project Based Learning

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.3. METODOLOGÍA	2
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	2
CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA EN LAS UNIVERSIDADES	4
2.1. UNIVERSIDADES NACIONALES	4
2.2. UNIVERSIDADES INTERNACIONALES.....	9
2.2.1. Instituto Tecnológico de Massachusetts	9
2.2.2. Caltech	10
2.2.3. Universidad de Cambridge.....	10
2.3. CONCLUSIÓN	11
CAPÍTULO 3. PROPUESTA PEDAGÓGICA EN LOS PROYECTOS	12
3.1. INTRODUCCIÓN.....	12
3.2. PROPUESTA 1: OSCILADOR	12
3.3. PROPUESTA 2: AFINADOR ELECTRÓNICO	13
3.4. PROPUESTA 3: TRANSMISIÓN INFRARROJA.....	13
3.5. CONCLUSIÓN	14
CAPÍTULO 4. PROPUESTA 1: OSCILADOR	15
4.1. DESCRIPCIÓN	15
4.2. OBJETIVOS.....	15
4.3. ESQUEMÁTICO	15
4.4. ANÁLISIS	16
4.5. SIMULACIÓN	20
4.6. RESULTADOS	23
CAPÍTULO 5. PROPUESTA 2: AFINADOR ELECTRÓNICO	26
5.1. DESCRIPCIÓN	26
5.2. OBJETIVOS.....	26
5.3. ESQUEMÁTICO	26
5.3.1. Captación de la señal sonora.....	27
5.3.2. Filtrado de la frecuencia de referencia	27

5.3.3. Visualización del grado de afinación	28
5.4. ANÁLISIS	28
5.4.1. Captación de la señal sonora	28
5.4.2. Filtrado de la frecuencia de referencia	32
5.4.3. Visualización del grado de afinación	36
5.5. SIMULACIÓN	38
5.5.1. Captación de la señal sonora	38
5.5.2. Filtrado de la frecuencia de referencia	39
5.6. RESULTADOS	41
5.6.1. Captación de la señal sonora	41
5.6.2. Filtrado de la frecuencia de referencia	43
5.6.3. Visualización del grado de afinación	44
CAPÍTULO 6. PROPUESTA 3: TRANSMISIÓN INFRARROJA.....	47
6.1. DESCRIPCIÓN	47
6.2. OBJETIVOS.....	47
6.3. ESQUEMÁTICO	47
6.3.1. Generador de onda cuadrada	48
6.3.2. Circuito modulador	48
6.3.3. Circuito transmisor	49
6.3.4. Circuito receptor	49
6.3.5. Filtro paso banda.....	49
6.4. ANÁLISIS	50
6.4.1. Generador de onda cuadrada	50
6.4.2. Circuito modulador	52
6.4.3. Circuito transmisor	55
6.4.4. Circuito receptor	56
6.4.5. Filtro paso banda.....	57
6.5. SIMULACIÓN	60
6.5.1. Generador de onda cuadrada	60
6.5.2. Circuito modulador	61
6.5.3. Circuito transmisor	63
6.5.4. Filtro paso banda.....	65
6.6. RESULTADOS	66
6.6.1. Generador de onda cuadrada	66

6.6.2. Circuito modulador	67
6.6.3. Circuito transmisor	68
6.6.4. Circuito receptor	69
6.6.5. Filtro paso banda.....	70
CAPÍTULO 7. COCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	72
7.1. CONCLUSIONES	72
7.2. LÍNEAS FUTURAS	73
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXO. TABLA RESUMEN SOBRE LA SITUACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA EN LAS UNIVERSIDADES NACIONALES.....	76

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

En el dinámico mundo de la **educación en ingeniería**, es esencial adoptar **métodos pedagógicos** que no solo transmitan conocimientos teóricos, sino que también preparen a los estudiantes para los desafíos prácticos que encontrarán en su vida profesional. La **electrónica analógica** es un **pilar fundamental** en el campo de la **ingeniería electrónica**. En ella se engloban principios y métodos cruciales para un gran número de aplicaciones, desde la sencilla amplificación de señales, hasta sistemas más complejos en el procesamiento de señales. Para entender y dominar estos conceptos, se requiere mucho más que la realización de clases magistrales y ejercicios teóricos. En este contexto, emerge el **Aprendizaje Basado en Proyectos (PBL- Project Based Learning)** como una estrategia pedagógica que fomenta la participación activa de los estudiantes en el proceso de aprendizaje.

El **Aprendizaje Basado en Proyectos** [1] es una metodología centrada en la experiencia. Su principal objetivo es que los estudiantes tengan la oportunidad de adentrarse en **situaciones reales** y sean capaces de afrontar **problemas tangibles**. Mediante este enfoque se fomenta la integración de teoría y práctica, estimulando la **creatividad**, el **pensamiento crítico** y las habilidades de **trabajo en equipo**. Esta metodología lleva siendo estudiada en la **arquitectura** y la **ingeniería** desde la **segunda mitad del siglo XIX**. No obstante, a pesar de sus múltiples ventajas, todavía existe una cierta resistencia a que sea introducida en las universidades. Con este proyecto, se pretende explorar el potencial y las ventajas de este método de enseñanza, evaluando la situación actual y proponiendo proyectos que puedan motivar al aprendizaje del alumnado.

1.2. OBJETIVOS

Con este Trabajo de Fin de Grado se pretenden cumplir dos objetivos principales:

1. Evaluar la **situación actual** del **aprendizaje** en **electrónica analógica** en **diferentes universidades**.
2. Desarrollar tres **proyectos modelo** que ayuden a la **introducción del aprendizaje basado en proyectos** en una asignatura de electrónica analógica avanzada en ingeniería.

En primer lugar, para cumplir el primer objetivo, se estudiará la **metodología** que siguen **distintas universidades** para impartir conocimientos sobre **electrónica analógica**. En este estudio se compararán universidades tanto **nacionales** como **internacionales** y se centrará en la importancia que cada una de ellas da a las **sesiones prácticas** respecto a las **teóricas**.

En segundo lugar, se idearán y llevarán a cabo ciertos **proyectos modelo** que se podrían introducir en una dinámica de aprendizaje basado en proyectos. Así pues, se **diseñarán** los circuitos de cada proyecto, se **simularán en LTSpice** y, por último, se **montarán en el laboratorio** para observar los resultados.

1.3. METODOLOGÍA

A continuación, se detallan de forma cronológica las fases seguidas en la elaboración del proyecto:

1. **Estudio comparativo de las universidades nacionales:** Búsqueda y análisis de los planes de estudio de las asignaturas relacionadas con electrónica analógica, prestando especial atención al tiempo dedicado a sesiones prácticas en cada una de ellas.
2. **Estudio de las universidades internacionales:** Investigación sobre la metodología llevada a cabo en algunas de las universidades con más prestigio internacional con el objetivo de compararlas con los planes de estudio de las universidades nacionales.
3. **Elaboración de la propuesta pedagógica de proyectos:** Valoración de los conocimientos previos que debe tener el alumno antes de enfrentarse a los proyectos que se van a realizar y temas de la electrónica analógica que se van a tratar en ellos.
4. **Selección de los proyectos a realizar:** Construcción de los objetivos de cada proyecto y diseño de sus circuitos.
5. **Implementación de los proyectos y análisis de resultados:** Análisis teórico de los circuitos, simulación en LTSpice y montaje en el laboratorio para comparar los resultados esperados con los reales.
6. **Redacción del documento:** Donde se recogen los resultados de cada apartado y las conclusiones a las que se ha llegado.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento está estructurado en 7 capítulos. En el **primer capítulo** se exponen los **antecedentes y objetivos** del presente Trabajo de Fin de Grado, así como la **metodología** que se ha seguido para cumplir dichos objetivos.

En el **segundo capítulo** se realizará un estudio sobre la **situación actual de las universidades** en la **enseñanza** de la **electrónica analógica**. Se seleccionará un subconjunto de universidades de ámbito nacional e internacional y se analizarán algunas de las asignaturas de electrónica analógica ofertadas en los cursos de ingeniería.

En el **tercer capítulo** se presenta la **propuesta pedagógica** para realizar los proyectos modelo y se expondrá brevemente el contenido de los mismos. Estas **propuestas** serán **desarrolladas** en los **capítulos 4, 5 y 6**, donde se

presentará su diseño y los resultados obtenidos mediante análisis, simulación y montaje experimental de los circuitos presentados.

Finalmente, en el **último capítulo**, se presentarán las **conclusiones** y **líneas futuras** a las que se ha llegado tras la ejecución del proyecto.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA EN LAS UNIVERSIDADES

El Aprendizaje Basado en Proyectos es una modalidad de enseñanza estudiada desde mediados del s. XIX. No obstante, a pesar de haberse demostrado en múltiples ocasiones todas sus ventajas, son pocas las universidades que utilizan esta metodología. En este capítulo, se desea realizar un estudio sobre la **implantación actual** de dicha modalidad dentro de la materia de la **electrónica analógica** en distintas **universidades**.

2.1. UNIVERSIDADES NACIONALES

La realización de este análisis se centrará particularmente en el **porcentaje de horas** que cada universidad dedica en el **laboratorio**. Es decir, la cantidad de tiempo que se invierte en sesiones prácticas en comparación con las teóricas. Este dato se relacionará también con el peso que estas prácticas tienen en **la nota final**. Asimismo, en algunas ocasiones, los alumnos deben realizar un **proyecto** con los conceptos adquiridos en la asignatura. Se estudiará su presencia y, al igual que con las prácticas, su importancia en la calificación final.

El estudio de la situación nacional se centra en 5 universidades:

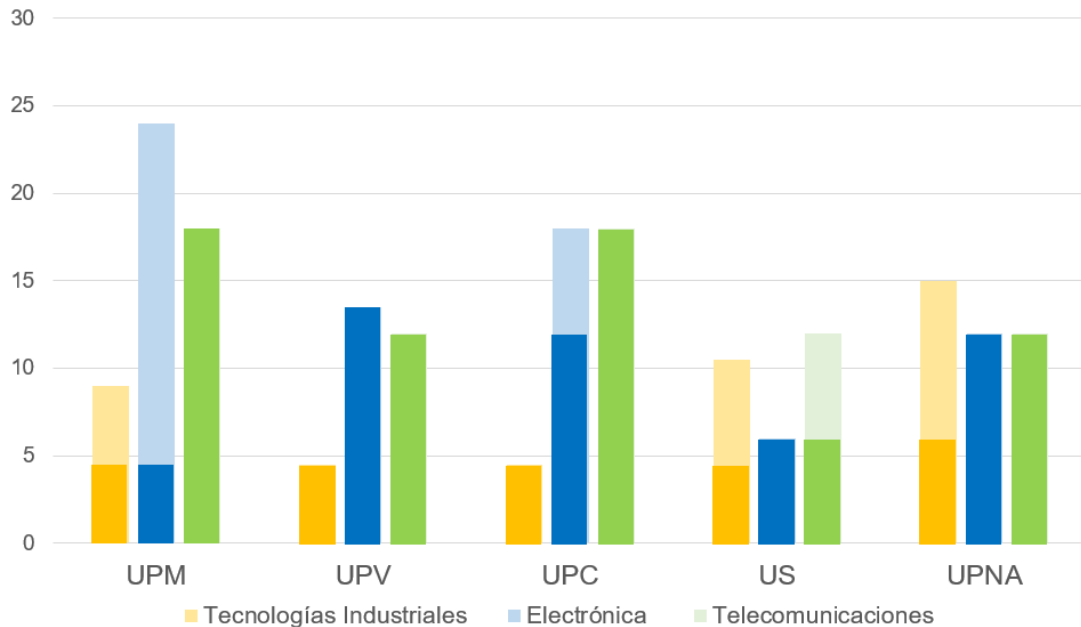
- Universidad Politécnica de Madrid (**UPM**) [2]
- Universidad Politécnica de Valencia (**UPV**) [3]
- Universidad Politécnica de Cataluña (**UPC**) [4]
- Universidad de Sevilla (**US**) [5]
- Universidad Pública de Navarra (**UPNA**) [6]

Además, con el objetivo de compararlas de una forma sencilla, el estudio se llevó a cabo en tres grados universitarios en cada una: **Ingeniería en Tecnologías Industriales**, **Ingeniería en Telecomunicaciones** e **Ingeniería Electrónica**. Todos ellos tienen **240 ECTS**¹ y una duración de **4 años**.

Para realizar esta comparación se recogieron en una tabla (**Anexo**) todos los datos relacionados con las universidades y grados mencionados. En ella se especificaron las **asignaturas** sobre electrónica analógica que se cursaban, el **semestre** en el que se impartían, los **créditos** que tenía cada una, las **horas** que dedicaban a **prácticas y proyectos** y el porcentaje correspondiente a ellos en la **nota final**. Esta información fue tomada de las **páginas oficiales** de cada universidad y fue la correspondiente al curso **2022/23**.

¹ ECTS (European Credit Transfer and Accumulation System) es una medida estándar utilizada en universidades del Espacio Europeo de Educación Superior para calcular la carga de trabajo del estudiante en un programa académico.

En primer lugar, se analizó la **importancia** que cada grado y universidad daba a la **electrónica analógica**. Para ello, se recogieron en una gráfica (Gráfica 2.1) la suma de créditos de todas las asignaturas dedicadas a la electrónica analógica en cada universidad y grado. Además, se comparó también la relación entre optativos y obligatorios que existía en cada una de ellas.



Gráfica 2.1. Número de créditos dedicados a la Electrónica Analógica en cada universidad y grado. Se señalan en oscuro los obligatorios y en claro los optativos.

En lo relativo al **Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**, es importante especificar que no todas las universidades ofrecen la opción de poder cursar la **mención en Electrónica**. Solo la **UPM**, **US** y **UPNA** ofertan esta posibilidad a sus alumnos. Es por ello que, a pesar de que en estas tres universidades la Electrónica Analógica tiene más importancia que en el resto, al menos la mitad de las asignaturas son de **carácter optativo**. De hecho, este grado es el que ofrece mayor **uniformidad** en **créditos obligatorios** dedicados a la Electrónica Analógica de todos los estudiados.

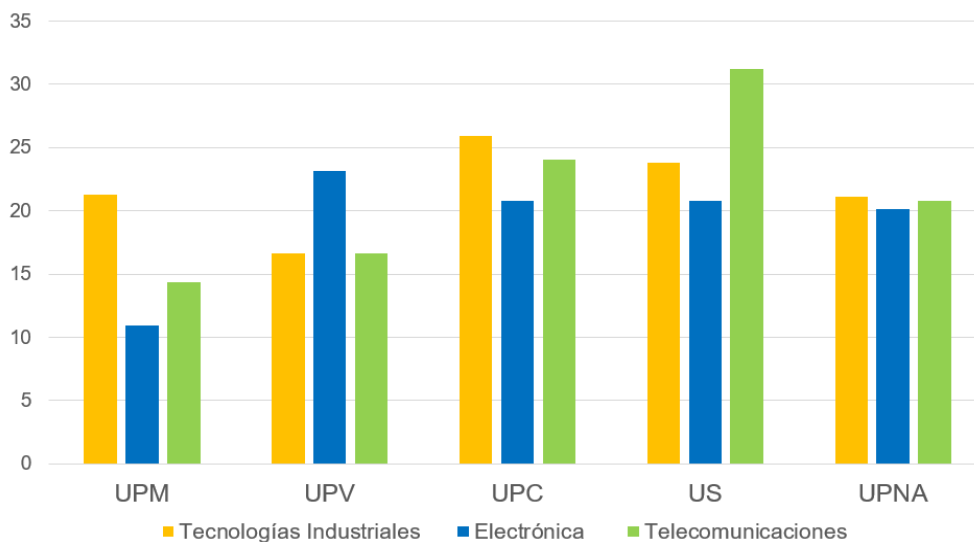
Otro de los factores que resalta en la gráfica es la diferencia de créditos que tiene el **Grado en Electrónica** en la **US** respecto al resto de universidades. Observando su plan de estudios, la mayoría de asignaturas están enfocadas a la **Electrónica Digital**, dejando más de lado aquellas que tienen que ver con la Analógica. Este dato sugiere que la US prioriza la formación en Electrónica Digital, posiblemente reflejando las demandas actuales del mercado. No obstante, podría correr el riesgo de ofrecer una formación insuficiente en Electrónica Analógica, esencial para la comprensión completa del campo y pilar de la Electrónica Digital moderna.

En el resto de universidades, el **Grado en Electrónica** ofrece un número de créditos similar. La **UPM** tiene el menor número de créditos obligatorios, pero

el número de créditos optativos es notablemente superior al del resto. Esto es debido a que en su plan de estudios se ofrecen muchas más asignaturas de libre elección que en el resto de universidades. Así pues, el **nivel de especialización** en la UPM será mayor que en las demás. Es por ello, que los estudiantes no adoptan una visión global de la electrónica, sino que su formación está más adaptada a sus intereses individuales.

Por último, otra de las diferencias más notables, son los créditos dedicados a la Electrónica Analógica en el **Grado en Ingeniería de Telecomunicaciones**. La **UPNA** y la **UPV** muestran una **homogeneidad** en su enfoque, mientras que la **UPM** y la **UPC** asignan una **cantidad** de créditos significativamente **mayor**. Por su parte, la **US** plantea un modelo distinto al resto, pues exige a sus estudiantes un mayor compromiso con asignaturas optativas para equiparar el volumen en créditos de las mencionadas UPNA y UPV. Estas divergencias reflejan las distintas prioridades y estructuras curriculares de cada institución académica

En segundo lugar, se recogió el **porcentaje de horas** que se dedicaba a **sesiones prácticas** en relación con las teóricas. Los resultados obtenidos se muestran en la *Gráfica 2.2*. Es importante destacar que este porcentaje comprende las horas **presenciales** que se realizan **fuera del aula**, ya sean con **prácticas de laboratorio** o en la **elaboración del proyecto**, del que se hablará más adelante.

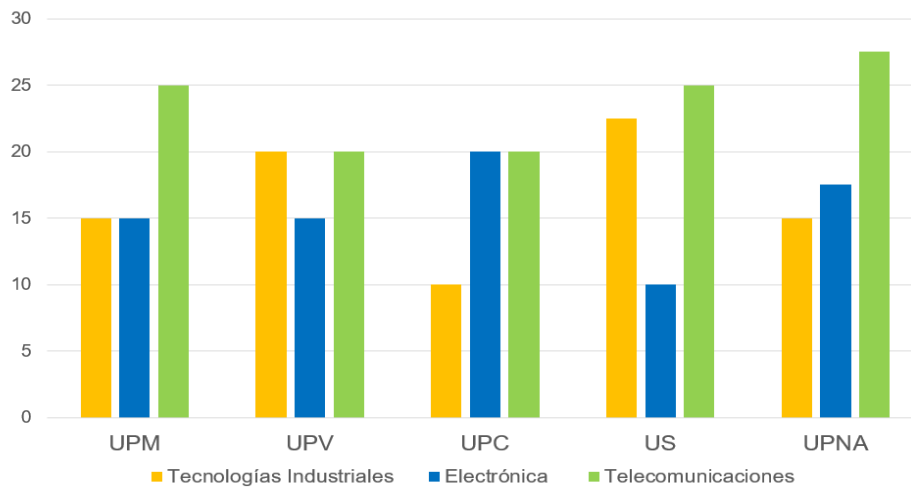


Gráfica 2.2. Porcentaje de horas dedicadas a prácticas por universidad y grado.

En este caso, las universidades que siguen una dinámica más parecida entre sus grados son la **UPNA** y la **UPC**. En cambio, en la **UPM**, en el **Grado de Tecnologías Industriales** la cantidad de prácticas es notablemente superior al del resto. Por otra parte, en la **UPV**, es el **Grado en Electrónica** el que tiene un número mayor. Por último, en la **US**, destaca el **Grado en Ingeniería de Telecomunicaciones**. Por lo que se puede concluir que ninguno de estos grados en España destaca por su cantidad de horas prácticas.

No obstante, aunque existan diferencias, no son muy significativas. Como **mínimo** en todas las universidades y grados se dedica un **10%** del tiempo a **sesiones prácticas** y solo en el caso de **Telecomunicaciones** en la **US** se pasa del **30%**. Por ello, se puede deducir que en **ninguna** de ellas se aplica el **aprendizaje basado en proyectos** como metodología principal en la enseñanza.

Otro de los datos que resulta importante a la hora de determinar el peso que tienen las prácticas en la enseñanza, es el porcentaje que les corresponde en la **nota final**. El porcentaje dedicado a las **prácticas de laboratorio** se recoge en la gráfica de la Gráfica 2.3.



Gráfica 2.3. Porcentaje de la nota correspondiente las prácticas de laboratorio según la universidad y el grado.

Para analizar esta gráfica es necesario contrastarlos con la existencia de un **proyecto final práctico**. En algunas asignaturas, se exige a los alumnos plasmar los conocimientos adquiridos en un trabajo final. Como se observa en la tabla del **Anexo**, solo en **9** de **33 asignaturas** se ofrece esta opción. En la Tabla 2.1 se señalan estas asignaturas especificando el grado, la universidad y su porcentaje final en la nota.

UNIVERSIDAD	GRADO	ASIGNATURA	%
UPV	Ingeniería Electrónica Industrial y Automática	Electrónica Analógica	20
		Instrumentación Electrónica	15
UPC	Ingeniería en Tecnologías Industriales	Electrónica	15
	Ingeniería Electrónica Industrial y Automática	Electrónica Analógica	20
		Electrónica para audio y vídeo	50
UPNA	Ingeniería en Tecnologías Industriales	Fundamentos de electrónica	40
		Instrumentación	30
	Ingeniería Eléctrica y Electrónica	Fundamentos de electrónica	40
	Laboratorio de Instrumentación	25	

Tabla 2.1. Porcentaje de la nota final dedicada al proyecto final en cada asignatura.

El primer punto a destacar es la ausencia de proyectos en la **UPM** y la **US**. Así pues, en estas universidades, el porcentaje de la nota dedicado a prácticas es exclusivamente la de la **Gráfica 2.3**. En la **UPM**, en el grado en **Tecnologías Industriales**, el porcentaje de la **nota final** es incluso **menor** que el porcentaje de horas dedicadas a prácticas. Sin embargo, tanto en **Electrónica** como en **Telecomunicaciones** el porcentaje de la **nota final** es **superior** al del tiempo dedicado. Por su parte, en la **US**, en los tres grados el **porcentaje de horas** dedicadas a prácticas es **superior** al porcentaje correspondiente a la nota final.

En lo que respecta a la **UPV** solo se encuentran **proyectos** prácticos en el **Grado de Ingeniería Electrónica**. En este caso, el proyecto hace que el porcentaje de la calificación correspondiente a prácticas, supere a las horas dedicadas. Además, a pesar de no realizar un proyecto, también en el resto de grados el porcentaje dedicado a la nota final es mayor que el de las horas de prácticas. Por lo que en la **UPV** las prácticas tienen **más peso** en la **nota final** que en las **horas dedicadas**.

En cuanto a la **UPC**, los grados que contienen un **proyecto** vuelven a superar notablemente el porcentaje de nota final al de las horas prácticas. Estos grados son **Ingeniería en Tecnologías Industriales** e **Ingeniería Electrónica**. No obstante, en **Ingeniería de Telecomunicaciones**, el porcentaje de tiempo invertido en prácticas es mayor que el de la calificación.

Por último, en la **UPNA** se sigue una dinámica similar a la de **UPC**. Se encuentran **proyectos** en los grados de **Ingeniería en Tecnologías Industriales** y en **Ingeniería Electrónica**, donde el porcentaje de nota final supera al del tiempo de prácticas. Por otro lado, en **Ingeniería de Telecomunicaciones**, donde no existe proyecto, el porcentaje de horas dedicadas a prácticas vuelve a ser mayor que el de la calificación.

Cabe destacar que en ninguna de las universidades estudiadas se propone a los alumnos del **Grado en Ingeniería de Telecomunicaciones** realizar un **proyecto final** en ninguna de las asignaturas de Electrónica Analógica. Este dato resulta sorprendente, ya que los proyectos son una forma de evaluar si el alumno es capaz de plasmar lo aprendido en la asignatura en un caso que se pueda adaptar a la vida real.

Finalmente, es relevante señalar que solo en **3 asignaturas** de las **33** recogidas en la Tabla del **Anexo**, la suma de puntos que corresponden a ejercicios prácticos (proyecto y prácticas de laboratorio) alcanza el 50% de la nota final. Estas asignaturas son **Electrónica para audio y vídeo** en el **Grado de Ingeniería Electrónica** en la **UPC** y **Fundamentos de electrónica** en los grados de **Ingeniería en Tecnologías Industriales** e **Ingeniería Electrónica** en la **UPNA**. Así pues, siguiendo la misma tendencia que en el tiempo dedicado, el peso de la enseñanza en Electrónica Analógica en España sigue recayendo sobre la parte teórica de las asignaturas.

2.2. UNIVERSIDADES INTERNACIONALES

Debido a los distintos modelos de educación entre países, resulta difícil realizar un estudio comparativo parecido al llevado a cabo con las universidades nacionales. Además, las variaciones en los sistemas educativos y los enfoques pedagógicos influyen en la interpretación de los resultados, por ello, se realizará por separado el estudio de cada universidad. Por su gran prestigio internacional se analizaron los casos del **Instituto Tecnológico de Massachussetts, Caltech** y la **Universidad de Cambridge**.

2.2.1. Instituto Tecnológico de Massachussetts

En primer lugar, se buscó información sobre el programa académico del **Instituto Tecnológico de Massachussetts** [7]. Dentro de la rama de *Electrical Engineering and Computer Science* se encuentran todas las asignaturas ofertadas por la universidad relacionadas con la Electrónica Analógica. Algunos ejemplos son *Circuits and Electronics*, *Microelectronic Devices And Circuits* o *Introduction To Electronics, Signals, And Measurement*.

El Instituto Tecnológico de Massachussetts dispone en su página web de todo el material utilizado para la docencia en sus clases. En cada asignatura se pueden descargar distintos tipos de recursos, como vídeos explicativos, guiones de prácticas de laboratorio, ejercicios o proyectos prácticos.

La diferencia principal entre esta universidad y las universidades nacionales son los **ejercicios prácticos**, tanto en cantidad como en su forma. En todas las asignaturas se propone una práctica de laboratorio por cada concepto aprendido, dándole la misma importancia a las sesiones teóricas y prácticas. Además, no solo se limitan a prácticas de laboratorio guiadas, sino que se plantean problemas de diseño que cada alumno deberá resolver con los conocimientos adquiridos. No obstante, no se encontró información sobre el **porcentaje de la calificación final** que se destinaba a prácticas o teoría.

Otro de los puntos a destacar, es la predominancia de las asignaturas de **Electrónica Digital** respecto a las de **Electrónica Analógica**. No obstante, sí que destaca en el programa de estudios de *Circuits and Electronics* que es una asignatura esencial para la comprensión de conceptos digitales más avanzados. Uno de los **proyectos analógicos** que se propone como **introducción a la lógica digital** es una red sencilla de dos fuentes y dos resistencias. Las entradas son una onda cuadrada y una sinusoidal y la salida es una **combinación lineal** de ambas entradas.

En la asignatura de *Circuits and Electronics* también se proponen otro tipo de diseños. Uno de ellos consiste en la **suma** de una **señal sinusoidal** y una **señal DC** a través de una **bandeja de agua salada**. Otro ejemplo es una **transmisión infrarroja** de una **señal musical**, cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 2.1 [8].

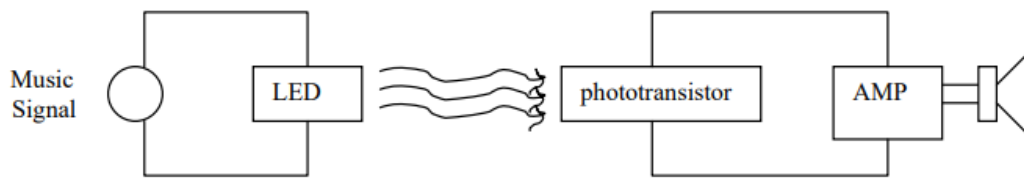


Figura 2.1. Diagrama de bloques de uno de los proyectos de la asignatura Circuits and Electronics en el Insituto Tecnológico de Massachusetts.

2.2.2. Caltech

En el caso de **Caltech** [9] no se puede realizar un análisis muy detallado, ya que no se proporciona la información sobre los planes de estudios. En esta universidad, solo se encuentra disponible en la página web el nombre de las asignaturas que se van a cursar cada año. Por ello, el único dato que se puede extraer es el porcentaje de asignaturas de **Electrónica Analógica** que se ofertan en la universidad. Este porcentaje es de alrededor del **15%**.

2.2.3. Universidad de Cambridge

Una de las universidades europeas con más renombre a nivel internacional es la **Universidad de Cambridge**. Esta universidad sigue el modelo de la Figura 2.2 [10].

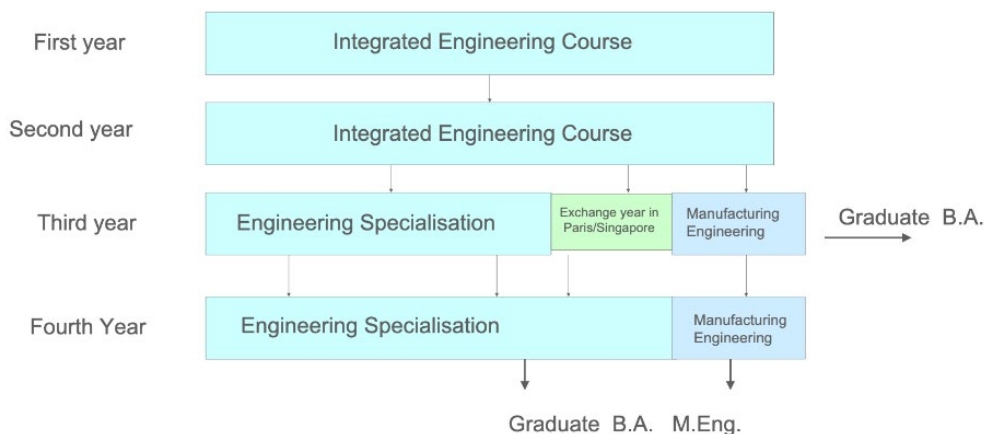


Figura 2.2. Modelo de estudio de ingeniería en la Universidad de Cambridge.

La universidad no especifica los planes de estudio de cada asignatura por separado, sin embargo, sí que habla de los porcentajes de tiempo y nota correspondientes a prácticas. La **primera parte** es común para todas las ingenierías. En ella **1/9** de las **horas** lectivas son dedicadas a prácticas y suponen un **15%** de la nota final. La **segunda parte** se subdivide a su vez en dos partes distintas, A y B. En la parte A la calificación en prácticas supone el **30%** y en la parte B el **50%**. El porcentaje del tiempo dedicado a prácticas no se especifica.

En la página web de la **Universidad de Cambridge** [11] se muestran distintos proyectos desarrollados por alumnos en cada etapa de la ingeniería. En el **primer año** los alumnos diseñan y prueban un circuito que **convierte el sonido de un micrófono** en un **nivel de luz** a través de una **serie de diodos LED**. De los estudiantes de **cuarto año** hay publicados tres proyectos: **un sistema para medir la eficacia y el rendimiento de un motor de gasolina, un altímetro que rastrea la altura de un cohete y un panel de instrumentos personalizado para una aeronave**. Con estos diseños se observa la progresión de sus alumnos y las habilidades con las que terminan su formación.

2.3. CONCLUSIÓN

La conclusión más destacada tras la realización de este estudio es la diferencia entre la importancia que dan a los casos prácticos las universidades nacionales y la que le dan las internacionales. Mientras que en **España** los planes de estudio se centran en los **conceptos** que se imparten en las **clases teóricas**, las universidades de **otros países** exponen como muestra de sus resultados los **proyectos** que son capaces de realizar sus alumnos.

Las **universidades internacionales** que se han estudiado son reconocidas en varios rankings como las más **prestigiosas del mundo**, por lo que **seguir su modelo** puede suponer alcanzar un reconocimiento mayor a nivel internacional. Observando los programas académicos de las universidades nacionales ninguno de ellos destacaba por el predominio de prácticas, sino que se centraba más en la parte teórica de la asignatura. Las diferencias encontradas con las universidades internacionales revelan la necesidad de reflexionar sobre el equilibrio necesario entre teoría y práctica en la formación académica de las universidades en España.

CAPÍTULO 3. PROPUESTA PEDAGÓGICA EN LOS PROYECTOS

3.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este proyecto es el de transmitir al alumno conocimientos de electrónica analógica relacionándolos con aplicaciones **prácticas y concretas**. En esta propuesta pedagógica se busca crear dispositivos con resultados atractivos para el estudiante a través de la construcción de **circuitos analógicos sencillos**.

Para la realización de estos dispositivos se presuponen en el alumno algunos conocimientos básicos de electrónica analógica, tales como:

- El dominio del **análisis de circuitos** con impedancias resistivas, capacitivas o inductivas.
- El conocimiento de **dispositivos electrónicos basados en semiconductores** (diodos y transistores BJT y MOSFET).
- La comprensión de las características básicas y el análisis de un **amplificador operacional**.

Así pues, el propósito fijado con las propuestas prácticas es que los alumnos obtengan conocimientos en **tres áreas principales de la electrónica analógica**:

1. **Circuitos de amplificación** creados con transistores o amplificadores operacionales. Análisis y cálculo de la amplificación generada con su utilización dentro de la banda de operación.
2. **Osciladores sintonizados**. Familiarización con el *Criterio de Barkhausen* y cálculo de la frecuencia de oscilación según los elementos utilizados en el circuito y de su configuración.
3. **Filtrado de señales**. Utilización de filtros activos para filtrar las frecuencias deseadas y amplificar la señal de entrada. Cálculo de su función de transferencia y estudio de su comportamiento en frecuencia.

Estos tres temas se abordarán a través de tres proyectos. En cada uno de ellos, además de estudiar los conceptos mencionados, el alumno conocerá algunos **circuitos integrados y dispositivos**, utilizados con frecuencia en electrónica analógica. A continuación, se presentarán los objetivos de aprendizaje de cada uno los proyectos que se van a realizar.

3.2. PROPUESTA 1: OSCILADOR

El primer proyecto propuesto consta de un **oscilador** con un **zumbador** en su salida. El oscilador contiene una **resistencia** que varía según la **intensidad de luz incidente (LDR- Light Dependant Resistor)**, por lo que la

frecuencia de salida dependerá de la luz que le llegue a esta resistencia. En este proyecto se trabajarán principalmente los **osciladores sintonizados**.

El objetivo del zumbador es convertir la frecuencia de la onda de salida del oscilador en una frecuencia sonora. Así pues, el alumno deberá estudiar el **Criterio de Barkhausen** con el objetivo de determinar las **posibles frecuencias** que después reproducirá el zumbador. Además, colateralmente, conocerá el uso de **LDRs** y **zumbadores**.

3.3. PROPUESTA 2: AFINADOR ELECTRÓNICO

En el segundo proyecto el alumno realizará el montaje de un **afinador electrónico**, con el que se observará la diferencia de frecuencia entre una señal sonora y una frecuencia de referencia. La señal sonora atravesará tres etapas: su **captación y amplificación**, **filtrado** de la frecuencia de referencia y **visualización del grado de afinación**. En cada una de ellas se estudiarán conceptos distintos.

En primer lugar, se realizará la captación y amplificación de la señal sonora. En ella se estudiará el uso de un **micrófono electret**, comprendiendo la forma en la que transforma la señal sonora en una señal de tensión. Además, se trabajará la **amplificación con transistores**, analizándose la amplificación proporcionada en función de la polarización de los mismos mediante componentes discretos.

En segundo lugar, se llevará a cabo el filtrado de la frecuencia de referencia. Para ello, se utilizará un **filtro activo paso-banda** con una configuración **MFB (Multiple Feedback)**. El alumno deberá estudiar su función de transferencia para conseguir un **ancho de banda estrecho** alrededor de la frecuencia de referencia, obteniéndose una señal cuya amplitud será proporcional al grado de afinación.

Finalmente, se visualizará el grado de afinación a través de 10 LEDs con ayuda del **Integrado LM3914**. En este apartado, el estudiante entenderá la función de este integrado y su utilización práctica.

3.4. PROPUESTA 3: TRANSMISIÓN INFRARROJA

El último proyecto consistirá en la transmisión de una **señal infrarroja**. Para realizarlo, con el propósito de que la luz ambiente no influya en la transmisión, la señal se **modulará** antes de ser transmitida y se **demodulará** en su llegada al circuito receptor.

En las etapas previas a la transmisión se realizarán tres circuitos. En primer lugar, se **generará una onda cuadrada**, que se utilizará como portadora. Con este circuito, se estudiará el **Integrado 555**, que es un dispositivo muy

popular y versátil en diversas aplicaciones electrónicas. Concretamente, se conocerá su funcionamiento en su modo de **oscilador astable**.

Después, se **modulará** la onda a transmitir. En esta etapa, se aprenderá a **multiplicar las ondas** portadora y transmisora con la utilización de un transistor. Además, como la transmisión se llevará a cabo a través de un **diodo LED infrarrojo**, se estudiará un tercer circuito que transforme la señal de tensión en una señal de corriente proporcional empleando un amplificador de transconductancia. Este, contendrá un amplificador operacional y un transistor.

Posteriormente, se realizará la recepción de la onda a través de un **fototransistor**. Una vez recibida, se deberá demodular y amplificar. Para ello, se utilizará un **filtro activo paso-banda** con la configuración **Sallen-Key**. Así pues, se estudiará su función de transferencia para poder realizar su análisis en frecuencia. Con este, se determinarán los elementos que proporcionen al filtro el ancho de banda y la ganancia deseados.

3.5. CONCLUSIÓN

El estudio, desarrollo y montaje de estas tres propuestas no solo proporcionará al alumno una visión práctica de los conceptos teóricos mencionados, sino que también le concederá las **habilidades prácticas** que se obtienen en un **laboratorio de electrónica**. Estas competencias serán fundamentales en la utilización de la electrónica analógica para aplicaciones reales.

En el laboratorio, el alumno conseguirá familiarizarse con el uso de **elementos de medida**, como osciloscopios y multímetros, y con los posibles **problemas** que influyen en los resultados esperados. La solución de estos problemas, que pueden ir desde la desviación en las magnitudes de los componentes hasta la aparición de ruido en el circuito, supondrá un reto para el alumno, desarrollando su **visión crítica** y su **habilidad para resolverlos**.

CAPÍTULO 4. PROPUESTA 1: OSCILADOR

4.1. DESCRIPCIÓN

El primer proyecto propuesto para el desarrollo en el aula es el análisis y montaje de un **oscilador**, que permite **cambiar su frecuencia** de salida **según la intensidad de la luz**, es decir, sin necesidad de contacto físico con el circuito. En su salida, se colocará un **zumbador** como elemento actuador que, consecuentemente, emitirá sonidos a distintas frecuencias según la intensidad de luz incidente.

4.2. OBJETIVOS

El circuito de este proyecto estará compuesto de un **oscilador senoidal** y un **zumbador piezoeléctrico**. Para conseguir en el oscilador una frecuencia que dependa de la intensidad de la luz, se utilizará una **LDR (Light Dependent Resistor)**. Con el propósito de que el zumbador emita sonidos a distintas frecuencias, se deberán cumplir los siguientes objetivos:

- Definir los distintos **valores de resistencia** que puede alcanzar la **LDR**.
- Hallar la **frecuencia de oscilación** en **función de los distintos parámetros** con el propósito de concretar el rango de frecuencias que sonarán en el zumbador.
- Verificar que el rango de frecuencias en la salida del oscilador esté dentro del intervalo de **frecuencias audibles** para el ser humano.
- Asegurarse de que la **tensión** a la **salida del oscilador** es la adecuada para **alimentar** el **zumbador piezoeléctrico**.

4.3. ESQUEMÁTICO

Como se puede observar en la Figura 4.1, el circuito constará de dos partes: un **oscilador** y un **zumbador piezoeléctrico**.

El oscilador escogido es el de **desplazamiento de fase** [12], que es un tipo de **oscilador senoidal sintonizado**. Como todos ellos, consta de un **circuito amplificador** y de una **red de realimentación serie-paralelo**, compuesta en este caso por **resistencias** y **condensadores**, que definirán la frecuencia de oscilación. Este tipo de osciladores se usan frecuentemente como **osciladores de audio**.

Por otro lado, con el objetivo de transmitir la señal generada sin que las **capacidades parásitas** del **zumbador piezoeléctrico** afecten al oscilador, se ha añadido en su salida un **seguidor de tensión**.

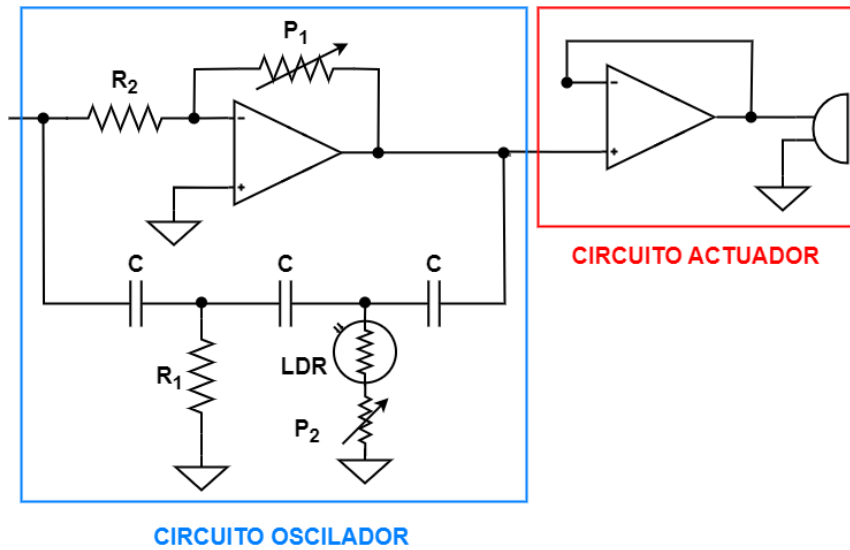


Figura 4.1. Esquemático del sistema completo.

4.4. ANÁLISIS

En primer lugar, se analizará el comportamiento del **oscilador de desplazamiento de fase**. Al tratarse de un **oscilador senoidal sintonizado**, para su correcto funcionamiento, será necesario que se cumpla el **Criterio de Barckhausen**. Este criterio se deberá cumplir tanto para la magnitud, como para la fase:

$$|\beta(\omega)A(\omega)| \geq 1 \tag{Ec. 4.1}$$

$$\varphi(\beta(\omega)) + \varphi(A(\omega)) = 2\pi N \tag{Ec. 4.2}$$

En estas ecuaciones, $\beta(\omega)$ representa la función de transferencia de la **realimentación** y $A(\omega)$ la función de la transferencia de la **ganancia**. En la Figura 4.2 se señalan $A(\omega)$ y $\beta(\omega)$ en el circuito.

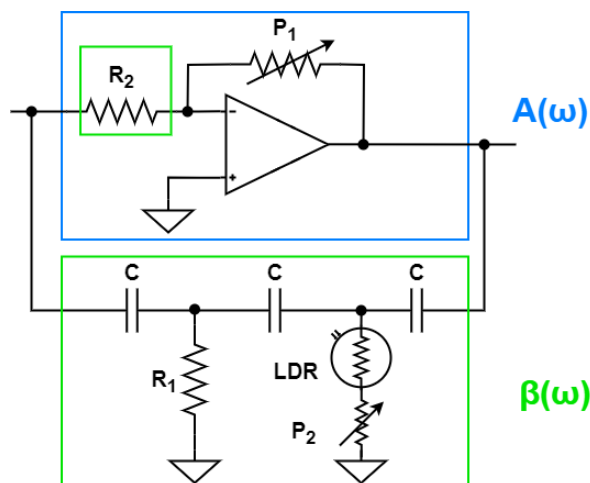


Figura 4.2. Oscilador de desplazamiento de fase con $A(\omega)$ y $\beta(\omega)$ señalados.

Cuando el **criterio de Barkhausen se cumple para una frecuencia ω_0** , la señal de **salida** será una **señal sinusoidal de esa frecuencia**. De esta forma, calculando las funciones de transferencia de A y β , se hallará la frecuencia de oscilación en la salida.

a) Función de transferencia de A(ω):

Se trata de un **amplificador operacional en configuración inversora**, por lo que su función de transferencia es:

$$A(\omega) = -\frac{P_1}{R_2} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Se obtiene un **módulo de P_1/R_2** y una **fase de 180°** . Además, se comprueba que A no depende de ω , por lo que la **frecuencia de oscilación dependerá exclusivamente de $\beta(\omega)$** .

b) Función de transferencia de $\beta(\omega)$:

Con el objetivo de calcular la función de transferencia de $\beta(\omega)$, se utilizará la Figura 4.3.

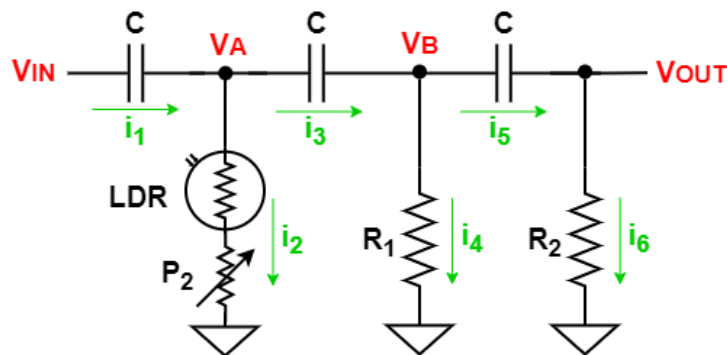


Figura 4.3. Realimentación del oscilador de desplazamiento de fase.

Para mayor simplicidad en los cálculos, se realizará el cambio de variable: **$R=LDR+P_2$** . Siendo R la suma de las resistencias de la LDR y P_2 en serie.

En la Figura 4.3 se observa que $i_5 = i_6$, por tanto:

$$\frac{V_B - V_{OUT}}{Z_C} = \frac{V_{OUT}}{R_2} \Rightarrow V_B = V_{OUT} \left(\frac{Z_C}{R_2} + 1 \right) \quad \text{Ec. 4.4}$$

Por otra parte, del **nodo B** se obtiene que $i_3 = i_4 + i_5$ (siendo $i_5 = i_6$):

$$\frac{V_A - V_B}{Z_C} = \frac{V_B}{R_1} + \frac{V_{OUT}}{R_2} \Rightarrow V_A = V_B \left(\frac{Z_C}{R_1} + 1 \right) + V_{OUT} \frac{Z_C}{R_2} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Por último, del **nodo A**, $i_1 = i_2 + i_3$:

$$\frac{V_{IN} - V_A}{Z_C} = \frac{V_A}{R} + \frac{V_A - V_B}{Z_C} \Rightarrow V_{IN} = V_A \left(\frac{Z_C}{R} + 2 \right) - V_B \quad \text{Ec. 4.6}$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.4 y 4.5 en la ecuación 4.6 y operando, se obtiene:

$$V_{IN} = V_{OUT} \left[\left(\frac{Z_C}{R_2} + 1 \right) \left(\frac{Z_C}{R_1} + 1 \right) \left(\frac{Z_C}{R} + 2 \right) - \left(\frac{Z_C}{R_2} + 1 \right) + \frac{Z_C}{R_2} \left(\frac{Z_C}{R} + 2 \right) \right]$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{1}{\frac{Z_C^3}{R R_1 R_2} + Z_C^2 \left(\frac{1}{R R_1} + \frac{2}{R R_2} + \frac{2}{R_1 R_2} \right) + Z_C \left(\frac{1}{R} + \frac{2}{R_1} + \frac{3}{R_2} \right) + 1}$$

Sustituyendo $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$, se alcanza la función de transferencia $\beta(\omega)$:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{-\frac{1}{j\omega^3 C^3 R R_1 R_2} - \frac{1}{\omega^2 C^2} \left(\frac{1}{R R_1} + \frac{2}{R R_2} + \frac{2}{R_1 R_2} \right) + \frac{1}{j\omega C} \left(\frac{1}{R} + \frac{2}{R_1} + \frac{3}{R_2} \right) + 1} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Para cumplir con la Ec. 4.2 del **Criterio de Barckhausen** y sabiendo que $\varphi A(\omega)=180^\circ$, se deduce que $\varphi \beta(\omega)=180^\circ$. Como la parte real del denominador es negativa, para cumplir con este criterio, la parte imaginaria deberá ser igual a cero. De esta forma, se halla la **frecuencia de oscilación** en función de los distintos parámetros del circuito.

$$-\frac{1}{\omega^3 C^3 R R_1 R_2} + \frac{1}{\omega C} \left(\frac{1}{R} + \frac{2}{R_1} + \frac{3}{R_2} \right) = 0$$

$$\omega_0 = \frac{1}{C \sqrt{R_1 R_2 + 2 R R_2 + 3 R R_1}} \quad \text{Ec. 4.8}$$

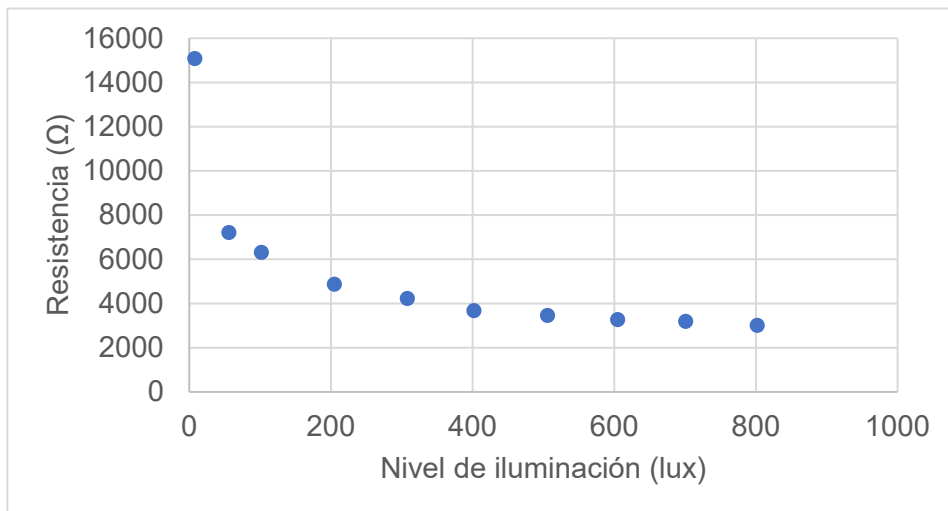
Además, para que esta oscilación se mantenga, también se debe satisfacer la Ec. 4.1.

$$|\beta(\omega_0)A| \geq 1 \Rightarrow \left| \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega_0^2 C^2} \left(\frac{1}{R R_1} + \frac{2}{R R_2} + \frac{2}{R_1 R_2} \right) \frac{P_1}{R_2}} \right| \geq 1 \quad \text{Ec. 4.9}$$

Las ecuaciones Ec. 4.8 y Ec. 4.9 se utilizarán para **definir los componentes del oscilador de desplazamiento de fase**.

En primer lugar, se concretará el **valor de los condensadores**, ya que existen menos valores estándar que de las resistencias. Los valores típicos comprenden desde 1nF hasta varios μF . En este caso, se utilizará un valor de **C=10 nF**.

Para escoger las resistencias, hay que tener en cuenta que el rango de frecuencias en la salida del oscilador sea **perceptible** por el **oído humano**. Este rango oscila entre los **20** y los **20 kHz**. Además, también hay que considerar la **variación de resistencia** que se producirá en la **LDR**. Para ello, se realizó su **caracterización**, utilizando un **luxómetro** y un **multímetro**. Para conseguir distintos niveles de luminosidad se utilizó un folio. Al acercarlo más a la LDR, se limitaba progresivamente el paso de la luz. Cada cierta distancia se tomó la medida de la iluminación y de la resistencia que ofrecía la LDR. Todas las medidas se representaron en la Gráfica 4.1.



Gráfica 4.1. Caracterización de la LDR.

En el Gráfica 4.1 se observa una tendencia característica de una LDR. No obstante, por posibles inexactitudes en el laboratorio, se tomarán estos datos como una **aproximación**. Se considerará que la LDR podrá tomar resistencias entre los **3** y los **15 k Ω** .

Contemplando todos los factores mencionados, se escogerán resistencias de $R_1=R_2=18\text{ k}\Omega$. Además, se incluirá un potenciómetro (P_2), con el que se regulará la resistencia mínima de R ($R=LDR+P_2$). A partir de esta resistencia se establecerá el **valor máximo** de la **frecuencia de salida** del oscilador. El potenciómetro utilizado será de $10\text{ k}\Omega$. Empleando estos valores en la Ec. 4.8, la frecuencia de salida del oscilador podrá tomar, según el nivel de iluminación, frecuencias entre **300 y 500 Hz**.

Por último, para asegurar la oscilación, se definirá el **valor de P_1** . La **máxima** resistencia necesaria en P_1 se dará cuando R también sea **máxima**. Aproximadamente, R máxima será igual a **25 k Ω** , lo que corresponde a frecuencia de oscilación de **313,7 Hz**. Así pues, utilizando la Ec. 4.9, se deduce que la **ganancia mínima de A** deberá ser de **32,05**. Como $R_2=18\text{ k}\Omega$, el potenciómetro deberá poder tomar valores iguales o superiores a **577 k Ω** . Teniendo en cuenta este resultado, el potenciómetro utilizado será de **$P_1=1\text{ M}\Omega$** .

Tanto para el montaje del oscilador como para el del seguidor de tensión, se utilizará el amplificador operacional **TL081** [13]. La amplitud de la tensión en la salida del oscilador dependerá de su alimentación. Para conseguir un voltaje adecuado para el zumbador, ambos operacionales se alimentarán entre **+12 V y -12 V**.

En la Figura 4.4 se muestra el esquema completo con los valores de los componentes especificados.

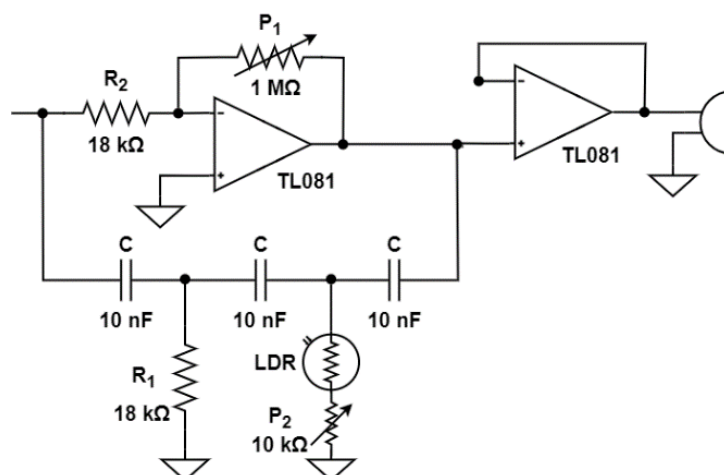


Figura 4.4. Esquema del sistema con los valores de los componentes especificados.

4.5. SIMULACIÓN

Para comprobar que el sistema funciona correctamente, se simulará con el **programa LTSpice**. El circuito introducido es el de la Figura 4.5, donde se **modificará** el valor de **R_3** para representar la **variación** en la **LDR**.

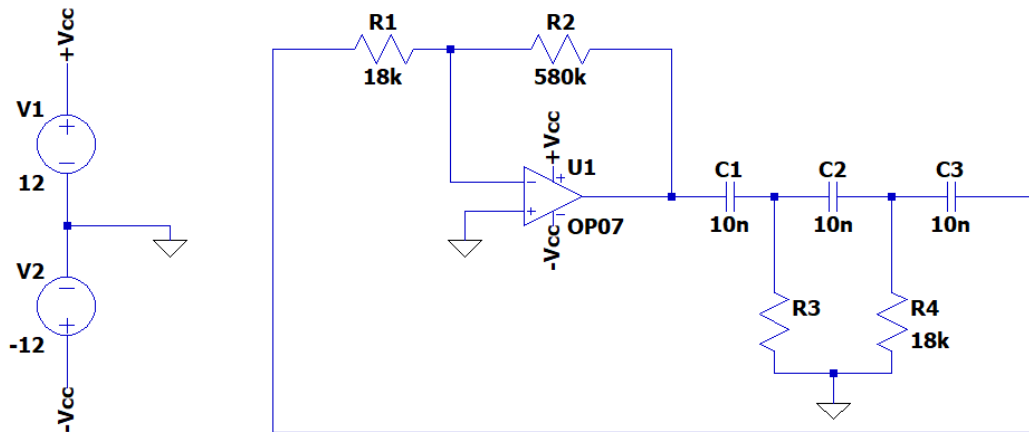


Figura 4.5. Circuito del oscilador en LTSpice.

El valor máximo que tomará **R3** será de alrededor de **25 kΩ**. Con la Ec. 4.8 se deduce que su frecuencia de oscilación deberá ser de **313,7 Hz**. Para verificar el comportamiento del sistema con esta resistencia, se realiza, en primer lugar, el análisis en frecuencia de la realimentación (β). En la Figura 4.6 se observa el resultado.

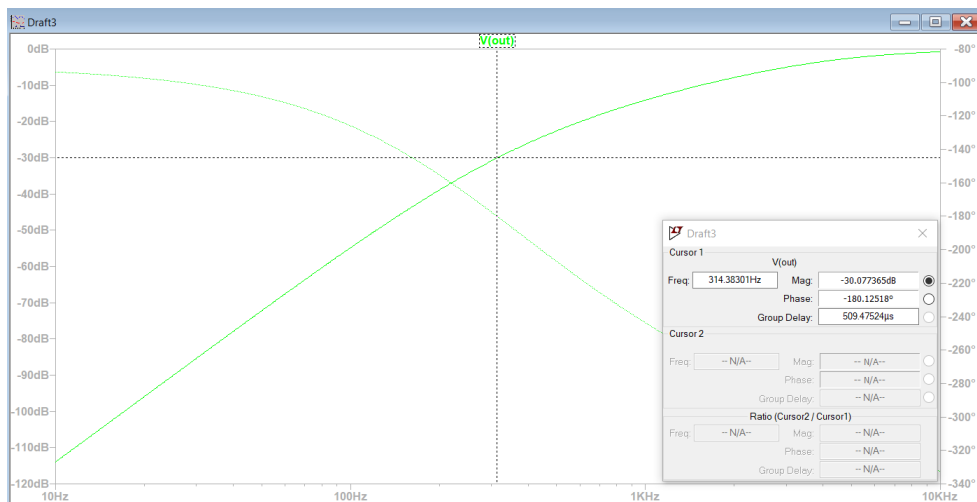


Figura 4.6. Resultado del análisis en frecuencia con $R=25k\Omega$.

Como ya se ha explicado, para que el circuito oscile, es necesaria una **fase de -180°** en la **realimentación**. Se comprueba en la Figura 4.6 que esta fase se obtiene en la frecuencia de corte estimada. Se verifica este resultado a través de su análisis temporal, mostrado en la Figura 4.7.

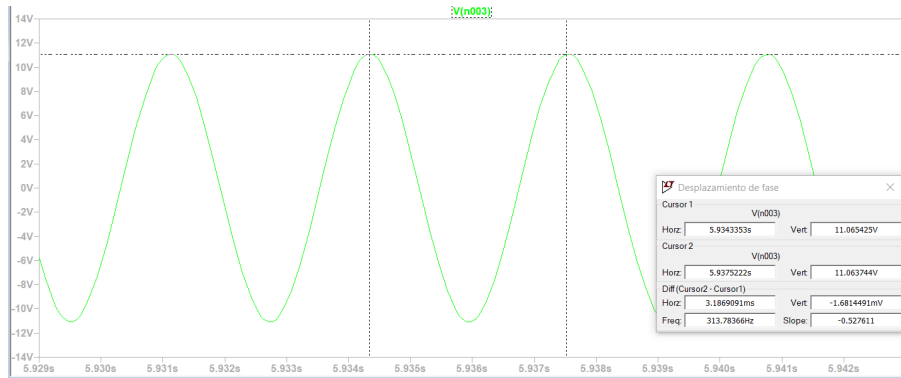


Figura 4.7. Resultado de la salida del circuito con $R_3=25k\Omega$.

Con la Figura 4.7 se comprueba que la **frecuencia de oscilación** es la deseada y que la **tensión de salida** es correcta para el funcionamiento del zumbador. Este resultado cambiará conforme varíe la resistencia R_3 . En la Tabla 4.1 se recogen posibles valores de R_3 con su frecuencia esperada.

R_3 (k Ω)	f_0 (Hz)
22	331,6
18	361,0
14	399,9

Tabla 4.1. Frecuencias esperadas según la resistencia en la LDR.

Los resultados con la modificación de R_3 se muestran en las figuras Figura 4.8, Figura 4.9 y Figura 4.10.

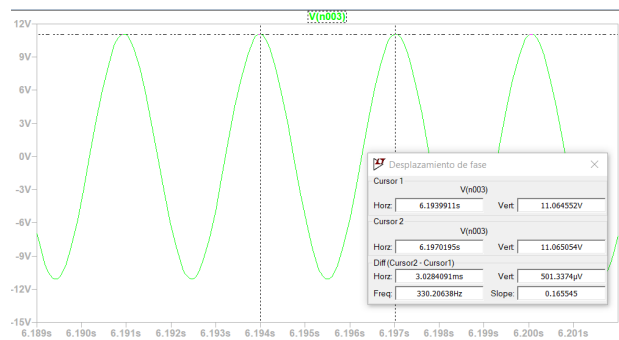


Figura 4.8. Resultado de la salida del circuito con $R_3=22k\Omega$.

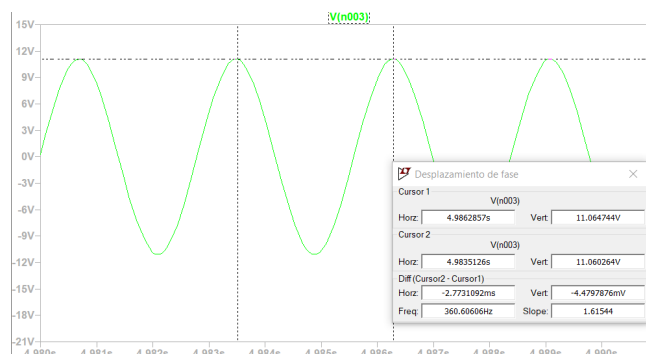


Figura 4.9. Resultado de la salida del circuito con $R_3=18k\Omega$.

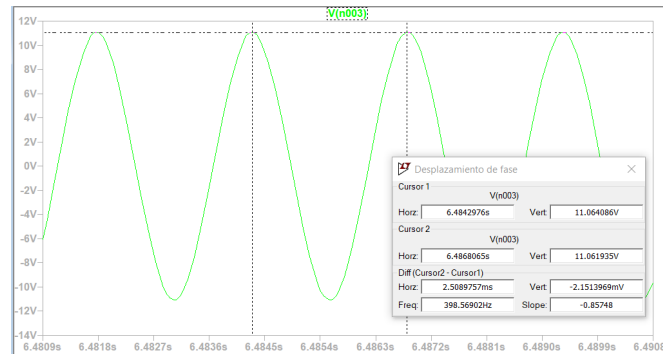


Figura 4.10. Resultado de la salida del circuito con $R3=14k\Omega$.

4.6. RESULTADOS

Tras el análisis en LTSpice, se procederá a montar el circuito en el laboratorio y observar los resultados reales. El circuito completo montado es el de la Figura 4.11.

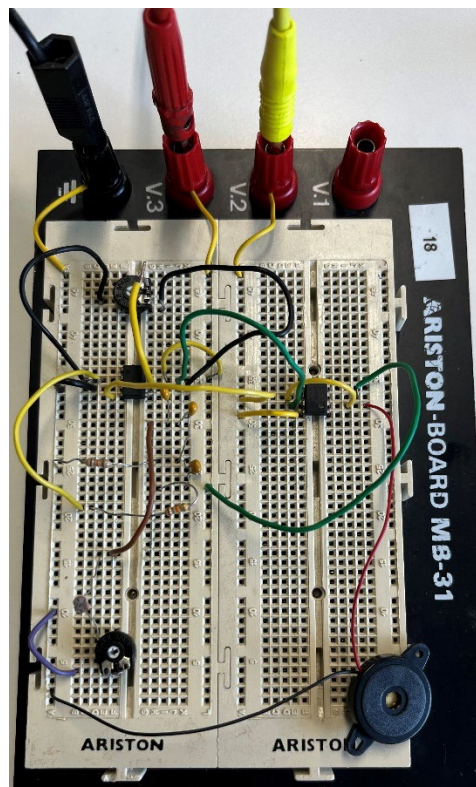


Figura 4.11. Circuito del sistema completo montado en el laboratorio.

Al igual que en LTSpice, se realizará el análisis en frecuencia y temporal cuando la LDR alcanza la **resistencia máxima**, es decir, cuando se obtiene en la salida la **frecuencia mínima**. Este valor se obtiene cubriendo por completo la LDR, obstruyendo el paso de la luz.

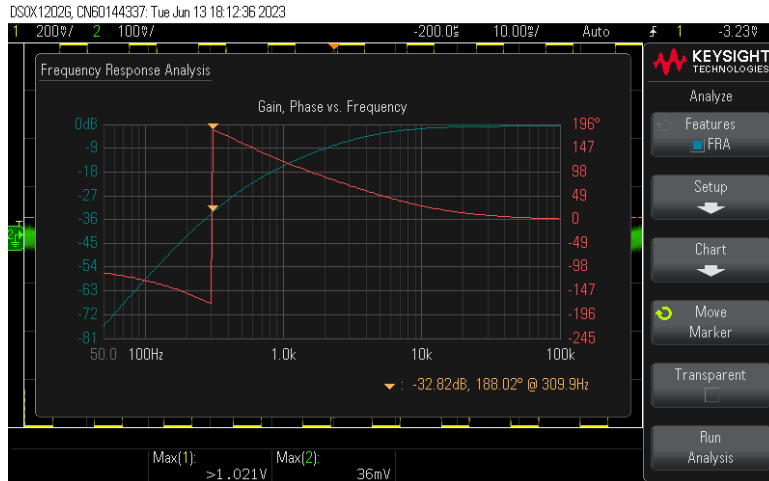


Figura 4.12. Resultado del análisis en frecuencia cuando no incide luz en la LDR.

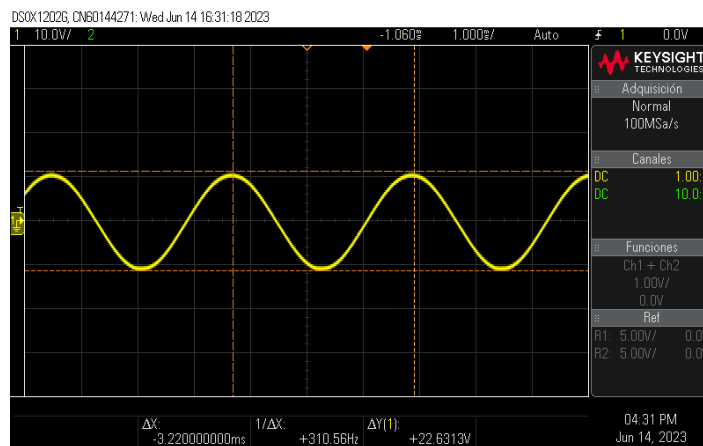


Figura 4.13. Tensión en la salida del oscilador cuando no índice luz en la LDR.

La fase de 180° se da en la Figura 4.12 en la frecuencia en la que oscila la Figura 4.13, comprobando así el funcionamiento correcto del circuito. Además, la tensión de salida es suficiente para que el zumbador funcione correctamente.

Por último, se comprobó que, con distintas intensidades de luz, la frecuencia de salida cambiaba. Se muestra este resultado en Figura 4.14 y Figura 4.15.

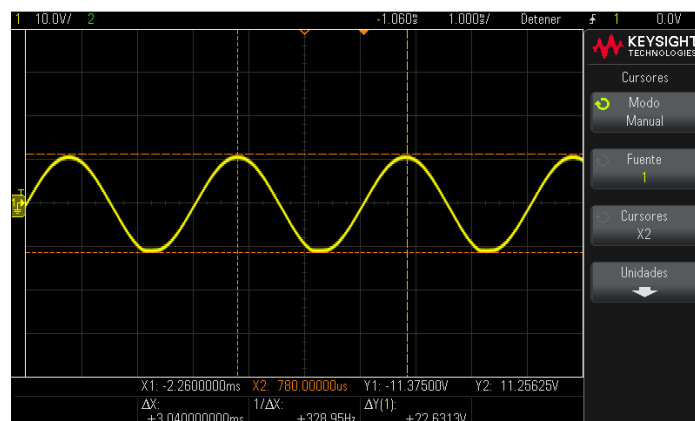


Figura 4.14. Tensión en la salida del oscilador cuando incide una intensidad de luz media en la LDR.

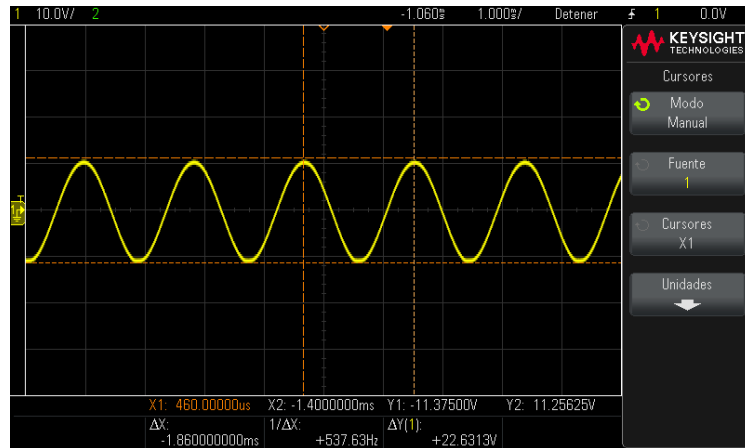


Figura 4.15. Tensión en la salida del oscilador cuando incide la luz del ambiente en la LDR.

Finalmente, tras conseguir estos resultados, se verificó en el laboratorio que el zumbador funcionaba correctamente, escuchándose distintas frecuencias según la cantidad de luz que se dejaba pasar a la LDR.

CAPÍTULO 5. PROPUESTA 2: AFINADOR ELECTRÓNICO

5.1. DESCRIPCIÓN

El segundo proyecto consistirá en el montaje de un **afinador electrónico**. Estos dispositivos indican mediante una **señal visual** la diferencia en frecuencia entre un sonido y una frecuencia de referencia. Como su nombre indica, este dispositivo se usa habitualmente para afinar instrumentos, empleándose como nota de referencia el **La 440**, que es la determinada por el Estándar Internacional en la norma **ISO 16:1975** [14]. La señal visual se reproducirá a través de **10 diodos LED**. Un mayor número de LEDs encendidos indicará un nivel de afinación mayor, es decir, una menor diferencia entre la frecuencia fundamental del sonido generado por el instrumento y la frecuencia de referencia.

5.2. OBJETIVOS

Con el propósito de que el afinador funcione correctamente se dividirá su diseño en tres partes principales: **la captación de la señal sonora, el filtrado de la frecuencia de referencia y la visualización del grado de afinación**. Para cumplir con las finalidades de cada una de ellas se deberán lograr los siguientes objetivos:

- Entender el comportamiento de un **micrófono electret** para conseguir captar con él la señal sonora.
- **Amplificar la señal captada** para que pueda ser utilizada en las etapas posteriores. **Adaptar la señal captada** para que pueda ser utilizada en las etapas posteriores.
- Diseñar un **filtro paso banda** cuya frecuencia de corte sean **440 Hz** y con **un ancho de banda adecuado** para un afinador.
- Familiarizarse con la utilización del integrado **LM3914** para observar el nivel de afinación de la señal de entrada.
- Comprobar que el **número de diodos LED** encendidos se corresponde con el **grado de afinación** de la señal sonora.
- **Verificar** el correcto funcionamiento del sistema completo empleando un **teléfono móvil** para emitir distintas frecuencias.

5.3. ESQUEMÁTICO

Para realizar el afinador completo se separará su montaje en las tres partes que se han mencionado anteriormente: **la captación de la señal sonora, el filtrado de la frecuencia de referencia y la visualización del grado de afinación**. La salida de cada una de ellas será la entrada de la etapa posterior,

de esta forma, la unión de las tres representará el funcionamiento total del sistema.

5.3.1. Captación de la señal sonora

El propósito de este apartado es el de **transformar la señal sonora en una señal de tensión**. Para ello, se utilizará un **micrófono electret**. Tanto para conseguir polarizar el micrófono, como para obtener una señal aceptable, se utilizará una etapa de **preamplificación**, compuesta por un transistor NPN polarizado en activa, que está delimitada hasta la salida del condensador 2 en la Figura 5.1 [15]. Posteriormente, se volverá a **amplificar la señal** para conseguir el nivel de tensión deseado.

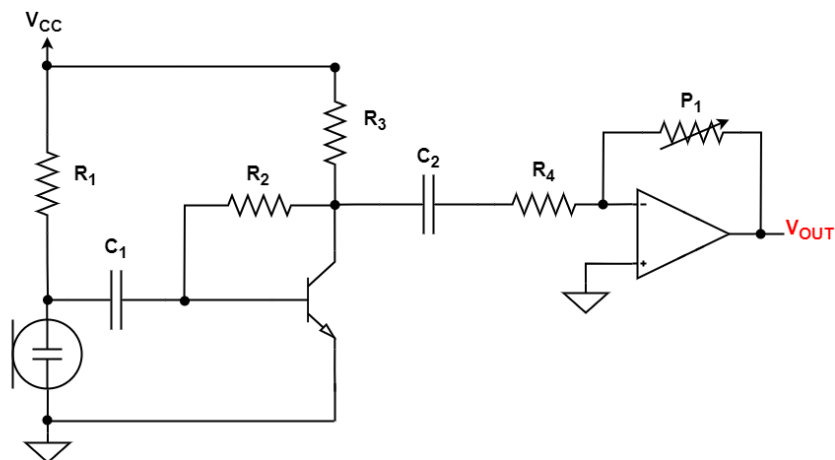


Figura 5.1. Esquemático del circuito captador de la señal sonora.

5.3.2. Filtrado de la frecuencia de referencia

Con el fin de dejar pasar únicamente las señales próximas a **440 Hz** y atenuar las que se alejen de esta frecuencia se debe utilizar un **filtro paso banda** de banda estrecha. Para su diseño se ha empleado un **filtro activo de 2º orden** con configuración **MFB (Multiple Feedback)** [12].

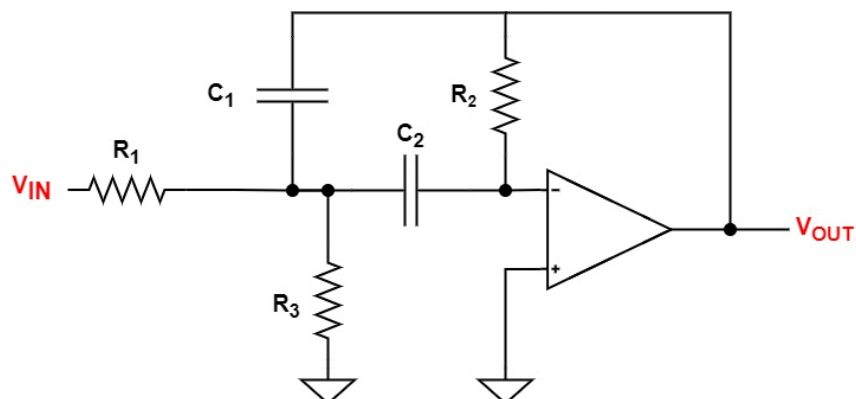


Figura 5.2. Esquemático del filtro de la frecuencia de referencia.

Para la elección de los valores de R_1 , R_2 , R_3 , C_1 y C_2 se calculará, en el próximo apartado, la **función de transferencia** de la Figura 5.2, de la que se obtendrán la **frecuencia propia** (f_0) y el **factor de calidad** (Q) del filtro.

5.3.3. Visualización del grado de afinación

La finalidad de esta parte del circuito es observar cuánto se ha atenuado la señal en el filtro, es decir, visualizar cómo de cerca está de la frecuencia de referencia. Para ello, se ha utilizado el integrado **LM3914** y **10 diodos led**, conectados tal y como se especifica en la hoja de características del fabricante *Texas Instruments* [16].

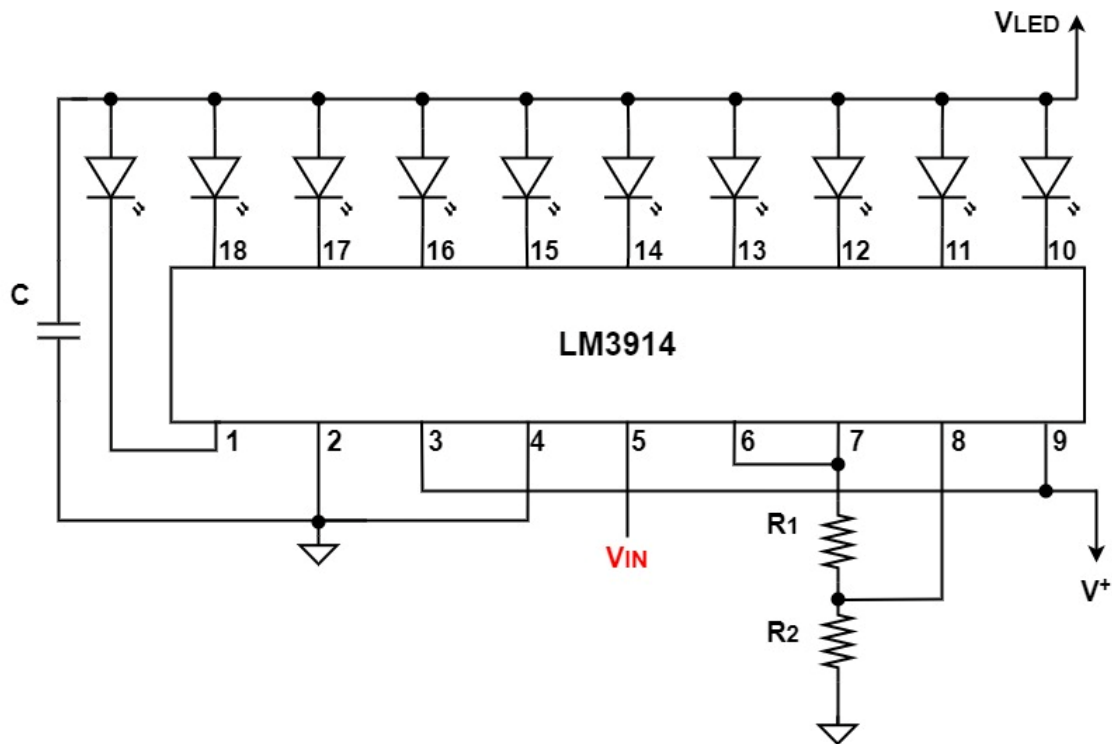


Figura 5.3. Esquemático de la visualización del grado de afinación.

5.4. ANÁLISIS

A continuación, además de analizar el comportamiento de los circuitos anteriores, se asignarán los valores correspondientes a las resistencias y condensadores utilizados.

5.4.1. Captación de la señal sonora

Para entender la finalidad de este circuito, es necesario entender el comportamiento de un **micrófono electret**. Este dispositivo consta de **dos placas conductoras** que, separadas por una capa dieléctrica, forman un condensador. **Una de estas placas** tiene una **carga eléctrica permanente**.

La **placa externa** del micrófono es **flexible**. En consecuencia, cuando las ondas sonoras impactan en ella, se producen **variaciones en la distancia** entre las dos placas del micrófono. Cuando esta distancia cambia, la **capacidad** del dispositivo también lo hace. Como en este proceso la **carga** se mantiene **constante** ($Q=CV$), la **variación de capacidad** supone una **variación de tensión**, produciéndose una **señal de tensión eléctrica** que **representa la onda sonora original**.

Los micrófonos electret **no necesitan alimentación** para funcionar. Sin embargo, la **señal de tensión** que producen es muy **pequeña**, por lo que la mayoría de ellos suelen incorporar un **amplificador interno** en su encapsulado, que **sí necesita ser alimentado**.

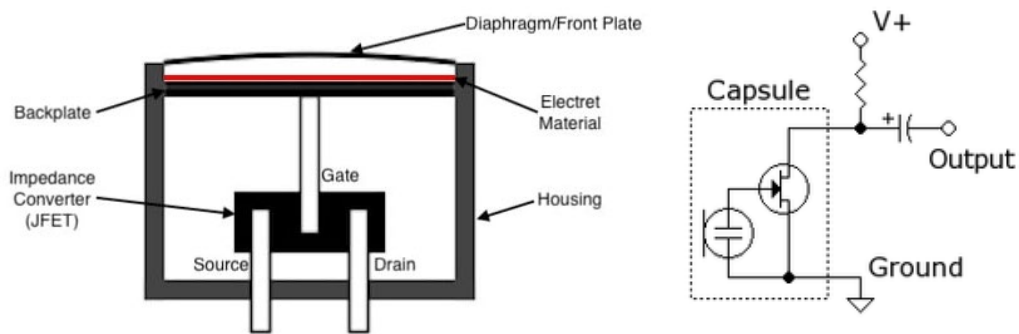


Figura 5.4. Esquema del encapsulado de un micrófono electret y de su equivalente eléctrico.

Aunque el propio encapsulado del micrófono contiene un amplificador, los niveles de la tensión de salida no son suficientes para que pueda ser procesada por las etapas posteriores. Por ello, es necesario utilizar un **circuito preamplificador**. Además, con el mismo circuito, se **alimentará el amplificador interno** del encapsulado.

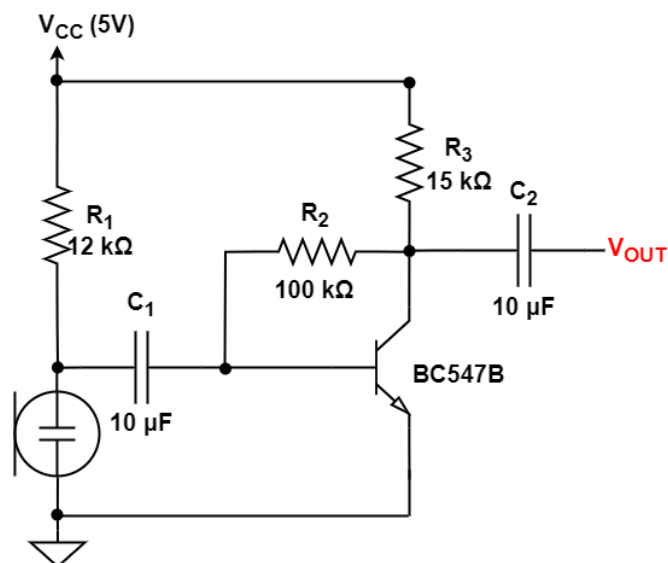


Figura 5.5. Esquemático del circuito preamplificador.

En la Figura 5.5 se puede observar que se trata de un **transistor NPN** en configuración de **emisor común**. Con R_3 se cargará el colector del transistor y con R_2 se polarizará su base, introduciendo a su vez una realimentación negativa que aportará estabilidad y linealidad.

Por su parte, la alimentación del amplificador interno se llevará a cabo a través de la **resistencia R_1** y un **condensador de desacoplo (C_1)**, que eliminará la componente DC de la salida.

Para estudiar la **ganancia** que proporcionará este circuito, se realizará su **análisis en DC** y en **pequeña señal**.

A) Análisis en DC

Para realizar el análisis en DC se **cortocircuitan las fuentes de tensión** y se dejan en **circuito abierto los condensadores**. Además, al tratarse de un **BJT**, el transistor se supone en **activa**. Sustituyéndolo por lo modelo en DC, el circuito a analizar es el de la Figura 5.6.

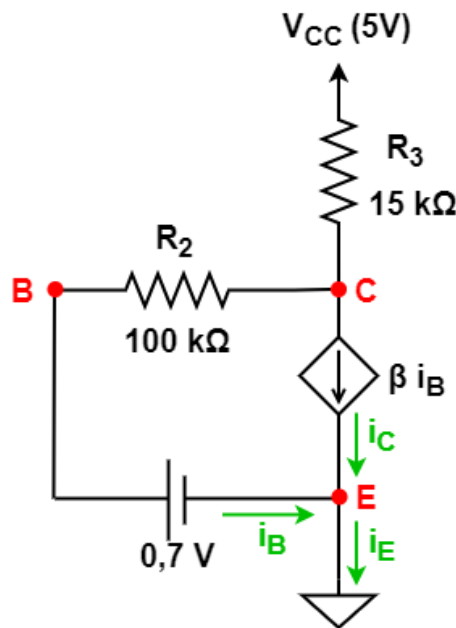


Figura 5.6. Circuito para el análisis en DC del circuito preamplificador.

Del **nodo E**, se deduce que $i_C + i_B = i_E$. Sabiendo que $i_C = \beta i_B$, entonces:

$$(1 + \beta) i_B = i_E \quad \text{Ec. 5.1}$$

De la **tensión en C**, se determina que: $V_C = V_{CC} - R_3 i_E$ y $V_C = R_2 i_B + 0,7$. Asimismo, se puede obtener:

$$V_{CC} - R_3 i_E = R_2 i_B + 0,7 \quad \text{Ec. 5.2}$$

Utilizando Ec. 5.1 y Ec. 5.2 y sustituyendo por los valores de los componentes, se hallan las corrientes del circuito: $i_B = 1,113 \times 10^{-6} A$, $i_C = 2,803 \times 10^{-4} A$. De esta forma, se comprueba que se cumple la primera condición de activa del transistor ($i_B > 0$). Por otro lado, se debe cumplir que $V_{CE} > 0,2V$. En nuestro caso, $V_{CE} = V_C = 0,8825V$, por lo tanto, el transistor se encuentra en activa tal y como se había supuesto.

B) Análisis en pequeña señal

Para el análisis en pequeña señal en la banda de paso se **anulan las fuentes de continua**, las **capacidades parásitas del transistor** funcionan como **circuitos abiertos** y los **condensadores de desacoplo** funcionan como **cortocircuito**. Sustituyendo el transistor por su modelo en pequeña señal en activa (**modelo en π**), se obtiene el circuito de la Figura 5.7.

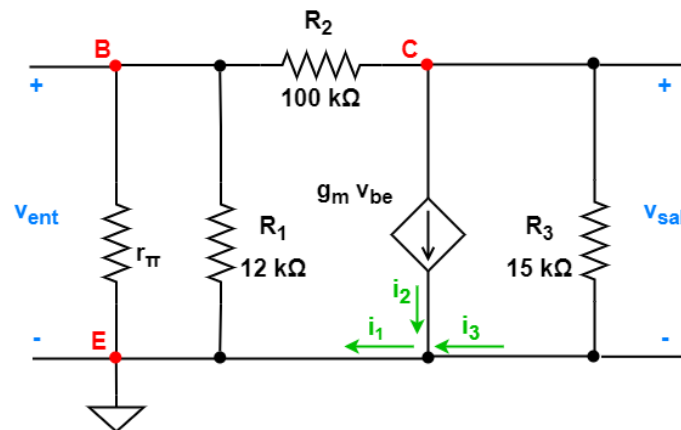


Figura 5.7. Circuito para el análisis en pequeña señal del circuito preamplificador.

Para resolver este circuito, primero, se hallarán los parámetros r_π y g_m :

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \frac{30 \text{ mV}}{1,113 \mu\text{A}} = 26,95 \text{ k}\Omega \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0,2763 \text{ mA}}{30 \text{ mV}} = 9,210 \text{ mA/V} \quad \text{Ec. 5.4}$$

La ganancia del circuito será:

$$\frac{v_{sal}}{v_{ent}} \Big|_{R_L = \infty} = \frac{i_3 R_3}{v_{be}} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Por el **nodo C**, se deduce que $i_1 = i_2 + i_3$. Obteniendo así la Ec. 5.6.

$$i_3 = i_1 - i_2 = -\frac{v_{be}}{R_1 / r_\pi} - g_m v_{be} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Con las Ec. 5.5 y Ec. 5.6 se halla la **ganancia del preamplificador**.

$$\frac{v_{sal}}{v_{ent}} \Big|_{R_L=\infty} = \frac{\left(-\frac{1}{R_1//r_\pi} - g_m\right) v_{be} R_3}{v_{be}} = \left(-\frac{1}{R_1//r_\pi} - g_m\right) R_3 = \mathbf{140,0 V/V}$$

En la salida de este circuito, la tensión dependerá de la intensidad del sonido en la entrada. Por ello, depende del dispositivo que emita el sonido y de la distancia a la que se emita, se obtendrá más o menos tensión. En consecuencia, al terminar este montaje se debe comprobar cuál es el nivel de en la salida. Para poder trabajar en las **etapas posteriores**, se deberá adaptar esta tensión a $\pm 5 \text{ V}$. Esta amplificación se llevará a cabo a través de un amplificador operacional, alimentado con una tensión de $\pm 12 \text{ V}$, una resistencia y un potenciómetro, que se regulará hasta conseguir el nivel de tensión deseado.

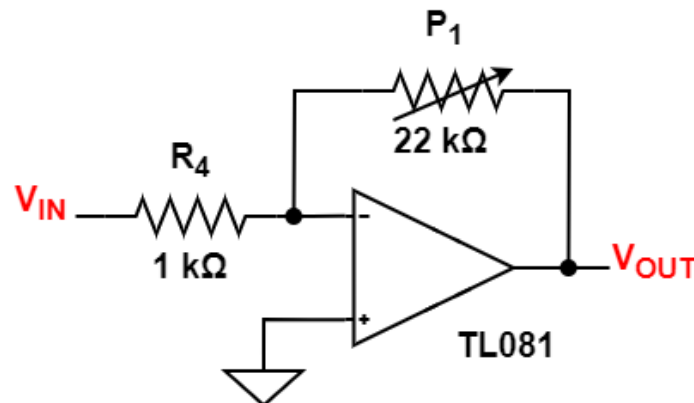


Figura 5.8. Circuito amplificador inversor.

La amplificación que se producirá en esta etapa viene determinada por la Ec. 5.7.

$$V_{OUT} = -\frac{P_1}{R_4} V_{IN} \quad \text{Ec. 5.7}$$

5.4.2. Filtrado de la frecuencia de referencia

Los parámetros que caracterizan un filtro son la **frecuencia de corte** (f_0) y el **factor de calidad** (Q). Ambos se obtienen a partir de la **función de transferencia** del filtro. A continuación, se calculará dicha función de transferencia.

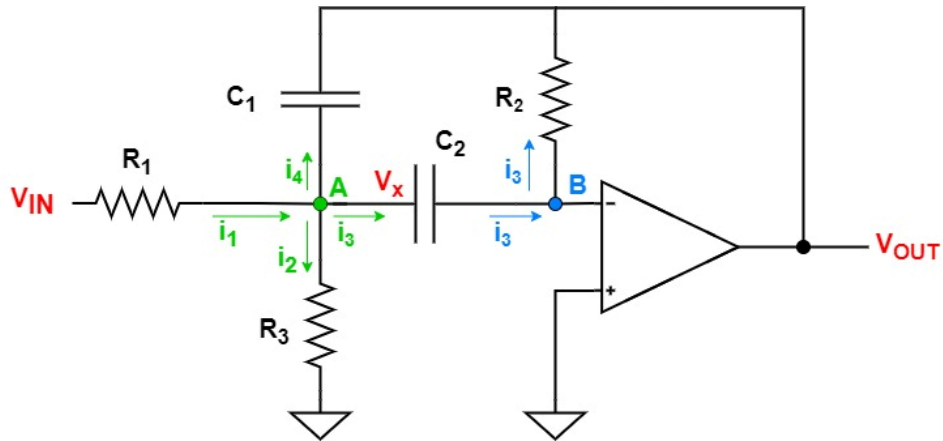


Figura 5.9. Circuito del filtro a analizar.

Del **nodo A** (señalado en verde en la Figura 5.9) se obtiene:

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4$$

$$\frac{V_{IN} - V_x}{R_1} = \frac{V_x}{R_3} + \frac{V_x}{Z_{C2}} + \frac{V_x - V_{OUT}}{Z_{C1}} \Rightarrow \frac{V_{IN}}{R_1} = V_x \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{Z_{C2}} + \frac{1}{Z_{C1}} \right) - \frac{V_{OUT}}{Z_{C1}} \quad \text{Ec. 5.8}$$

Para la obtención de V_x en función de V_{OUT} se utilizará el **nodo B** (señalado en azul en la Figura 5.9).

Se supone el operacional ideal, por lo tanto, la tensión en ambas patillas de entrada será la misma ($V^- = V^+ = 0V$) y la **corriente de bias** será **ceró**. De modo que, la corriente que pasa por C_2 será la misma que pasa por R_2 .

$$\frac{V_x}{Z_{C2}} = \frac{-V_{OUT}}{R_2} \Rightarrow V_x = \frac{-V_{OUT} Z_{C2}}{R_2} \quad \text{Ec. 5.9}$$

Sustituyendo en el **nodo A**:

$$\frac{V_{IN}}{R_1} = -\frac{V_{OUT} Z_{C2}}{R_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{Z_{C2}} + \frac{1}{Z_{C1}} \right) - \frac{V_{OUT}}{Z_{C1}}$$

$$\frac{V_{IN}}{R_1} = -V_{OUT} \left(\frac{Z_{C2}}{R_2 R_1} + \frac{Z_{C2}}{R_2 R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{Z_{C2}}{R_2 Z_{C1}} + \frac{1}{Z_{C1}} \right)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-1}{\frac{Z_{C2}}{R_2} + \frac{Z_{C2} R_1}{R_2 R_3} + \frac{R_1}{R_2} + \frac{Z_{C2} R_1}{R_2 Z_{C1}} + \frac{R_1}{Z_{C1}}}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = - \frac{R_2 R_3 Z_{C1}}{Z_{C2} R_3 Z_{C1} + Z_{C2} R_1 Z_{C1} + R_1 R_3 Z_{C1} + R_1 Z_{C2} R_3 + R_1 R_2 R_3} \quad \text{Ec. 5.10}$$

Remplazando las impedancias: $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$, $s = j\omega \Rightarrow Z_C = \frac{1}{sC}$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = - \frac{\frac{R_2 R_3}{s C_1}}{\frac{R_3}{s^2 C_1 C_2} + \frac{R_1}{s^2 C_1 C_2} + \frac{R_1 R_3}{s C_2} + \frac{R_1 R_3}{s C_1} + R_1 R_2 R_3}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = - \frac{\frac{R_2 R_3}{s C_1}}{\frac{R_3 + R_1 + R_1 R_3 C_1 s + R_1 R_3 C_2 s + R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 s^2}{C_1 C_2 s^2}}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = - \frac{R_2 R_3 C_2 s}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 s^2 + R_1 R_3 (C_1 + C_2) s + (R_3 + R_1)}$$

$$\boxed{\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = - \frac{\frac{R_2 R_3 C_2}{R_3 + R_1} s}{\frac{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}{R_3 + R_1} s^2 + \frac{R_1 R_3 (C_1 + C_2)}{R_3 + R_1} s + 1}} \quad \text{Ec. 5.11}$$

En filtros de segundo orden:

$$H(s) = \frac{\frac{A_0}{Q\omega_0} s}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{1}{Q\omega_0} s + 1} \quad \text{Ec. 5.12}$$

Por tanto, la **frecuencia propia** del filtro será:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_3 + R_1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}} \Rightarrow \boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 + R_1/R_3}{R_1 R_2 C_1 C_2}}} \quad \text{Ec. 5.13}$$

Y su **factor de calidad** vendrá determinado por la expresión:

$$Q = \frac{R_3 + R_1}{\omega_0 (C_1 + C_2) R_1 R_3} \Rightarrow \boxed{Q = \frac{1 + R_1/R_3}{\omega_0 (C_1 + C_2) R_1}} \quad \text{Ec. 5.14}$$

Una vez obtenidos ambos parámetros ya se pueden fijar los valores de R_1 , R_2 , R_3 , C_1 y C_2 .

Como los valores estándar de los condensadores son menores que los de las resistencias, se comenzará fijando C_1 y C_2 . Los valores típicos oscilan entre 1 nF y varios μF . Por ello, se tomará: **$C_1 = C_2 = 220 \text{ nF}$** .

Por otro lado, los valores de las resistencias dependerán de la frecuencia de corte y del factor de calidad que se quiere conseguir.

El valor **factor de calidad** determina el **ancho de banda** de las frecuencias que dejará pasar el filtro. Las frecuencias de corte superior e inferior del filtro dadas por las Ec. 5.15 y Ec. 5.16.

$$f_L = f_0 \left(\frac{-1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right) \quad \text{Ec. 5.15}$$

$$f_H = f_0 \left(\frac{1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right) \quad \text{Ec. 5.16}$$

Para obtener un **ancho de banda pequeño**, la Q deberá ser lo más alta posible. Con la Ec. 5.14, se deduce que esto sucederá cuando R_3 sea mucho más pequeña que R_1 . Se fijan los valores **$R_1=18\text{k}\Omega$ y $R_3=82\Omega$** .

Utilizando la Ec. 5.13 y sustituyendo los valores de R_1 , R_3 , C_1 y C_2 y la frecuencia de corte, se obtiene un resultado de **$R_2=33,12\text{k}\Omega$** . Como este valor no pertenece a un valor estándar de resistencias, se colocará en su lugar un **potenciómetro**, con el que se regulará la frecuencia de corte para ajustarla lo más cerca posible a 440 Hz. De esta forma también se corregirán las posibles desviaciones en los valores del resto de componentes.

Con todos los componentes ya fijados, se obtiene un **factor de calidad teórico $Q=10,07$** y unas frecuencias de corte **$f_L= 418,7\text{Hz}$ y $f_H= 462,40$** .

El esquemático final que se utilizará en el proyecto será el mostrado en la Figura 5.10. La alimentación del amplificador operacional utilizado será de **$\pm 12 \text{ V}$** y su modelo el **TL081**.

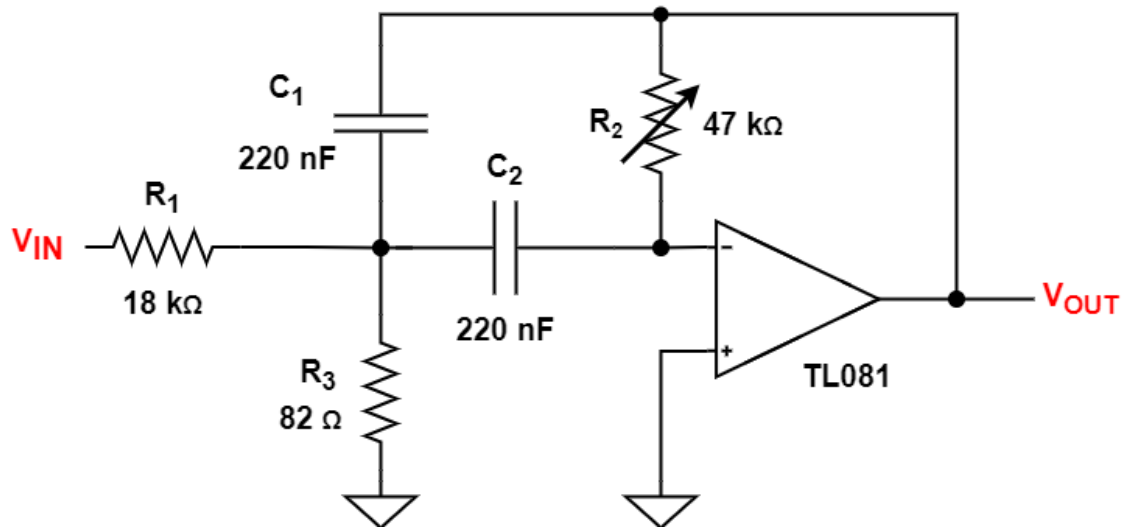


Figura 5.10. Esquemático final del filtrado de la frecuencia de referencia.

5.4.3. Visualización del grado de afinación

Como ya se ha comentado, este apartado consistirá en observar de manera visual, mediante **10 diodos LED**, cuál es el **nivel de afinación** de la nota emitida. Para ello, se utilizará el esquemático de la Figura 5.3. El elemento principal de este circuito es el **integrado LM3914**, que se emplea para visualizar el valor de una señal eléctrica comparada con un valor de referencia. El esquema interno del integrado se muestra en la Figura 5.11.

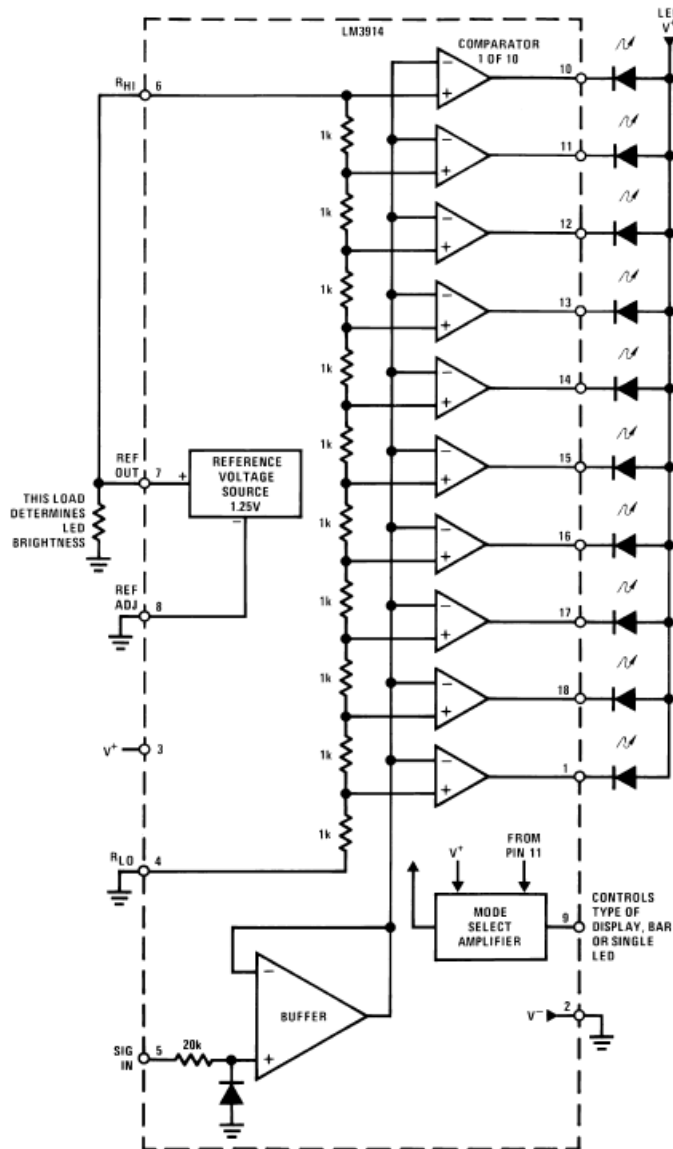


Figura 5.11. Esquema interno del integrado LM3914 [16].

Como se puede observar, el integrado está compuesto de un conjunto de **comparadores**, separados cada uno de ellos por una **resistencia de 1kΩ**. Las resistencias están conectadas a los **pines 6 (R_{HI})** y **4 (R_{LO})**. Conectando R_{LO} a tierra y R_{HI} a una determinada tensión, se determina el nivel según el cual se encenderán cierto número de LEDs con una determinada **entrada (pin 5)**.

Por otro lado, el **pin 7** está conectado a una **fuentes de tensión interna**, por lo que una forma de conseguir tensión en el pin 6 es cortocircuitarlo con el 7. La tensión de este pin es de **1,25 V**, no obstante, ésta se puede regular a través del **pin 8 (REF ADJ)**. En caso de necesitarse un voltaje mayor, se conecta el **pin 8** a un divisor de tensión, formado por R₁ y R₂. La fórmula para calcular la tensión de salida viene especificada en la hoja de características.

$$V_{REF\ OUT} = 1,25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \text{Ec. 5.17}$$

Cuando la frecuencia de entrada al filtro sea la frecuencia de referencia, la amplitud de la tensión en su salida será de **5V**. Por ello, los valores de R_2 y R_1 se deben escoger para conseguir en $V_{REF\ OUT}$ una tensión próxima a este valor. Utilizando la Ec. 5.17 y seleccionando unos valores de $R_1 = 1,2\ \Omega$ y $R_2 = 3,3\ \Omega$, se obtiene $V_{REF\ OUT} = 4,69\ V$. En consecuencia, en cada resistencia interna de **1 k Ω** caerán **0,469 V**. Este valor define el número de LEDs que se encenderán a través de la Ec. 5.18.

$$n^{\circ}\ de\ LEDs = \frac{V\ (pin\ 5)}{0,469} \quad \text{Ec. 5.18}$$

Por otro lado, los pines **2** y **3** corresponden a la **alimentación** del integrado, por lo que se conectan a **tierra** y **Vcc** respectivamente. Además, en la hoja de características se recomienda utilizar un **condensador** de **2,2 μ F** si los cables de suministro del LED tienen 6 pulgadas (15,24 cm) o más de longitud. El esquema final es el mostrado en la Figura 5.12.

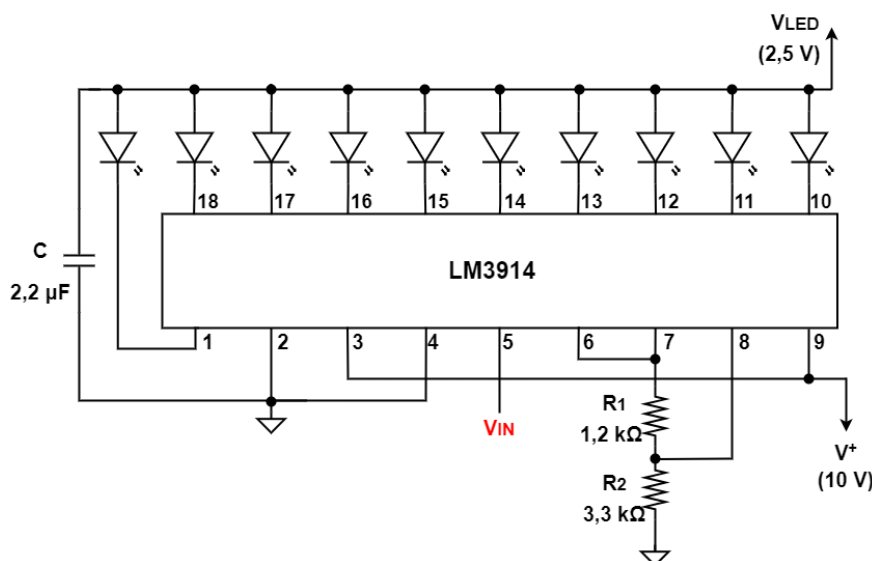


Figura 5.12. Circuito para la visualización del grado de afinación.

5.5. SIMULACIÓN

El objetivo de este apartado es el de comprobar que el circuito encargado de la **captación de la señal sonora** y el **filtro** funcionan de acuerdo a lo estudiado. Para ello, se simularán ambos circuitos con el programa LTSpice.

5.5.1. Captación de la señal sonora

En primer lugar, se introducirá el circuito **preamplificador**, tal y como se muestra en la Figura 5.13.

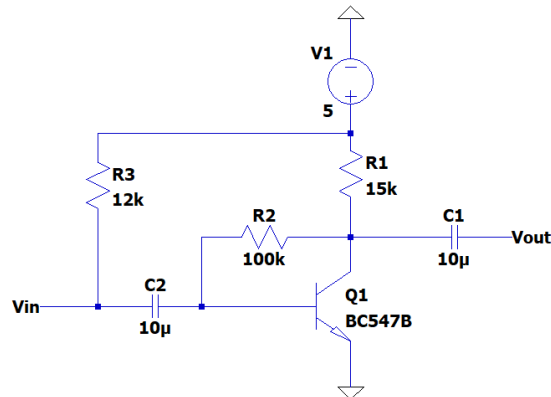


Figura 5.13. Circuito preamplificador en el simulador LTSpice.

Para comprobar que su ganancia es la prevista, se realizó su diagrama de Bode.

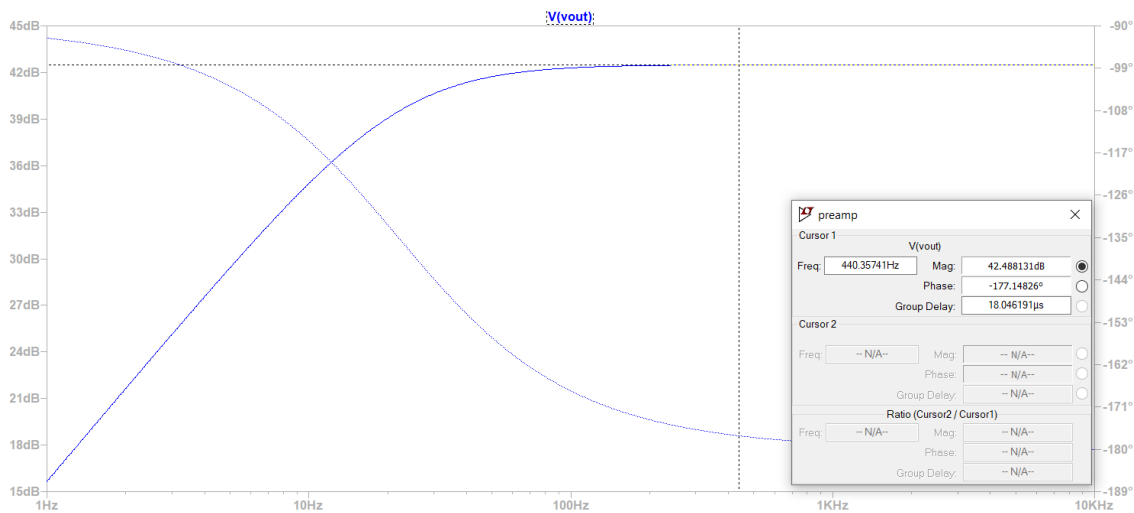


Figura 5.14. Diagrama de Bode en LTSpice del circuito preamplificador.

La ganancia obtenida es de aproximadamente **42,50 dB**, lo que corresponde a **133,4**, un resultado similar al obtenido teóricamente en el apartado 5.4.1 (**140,0**). Debido a que se han tomado β y V_T de una forma aproximada en la hoja de características, este resultado se puede dar por válido.

5.5.2. Filtrado de la frecuencia de referencia

Para observar el comportamiento del filtro se introdujo en LTSpice el circuito de la Figura 5.15.

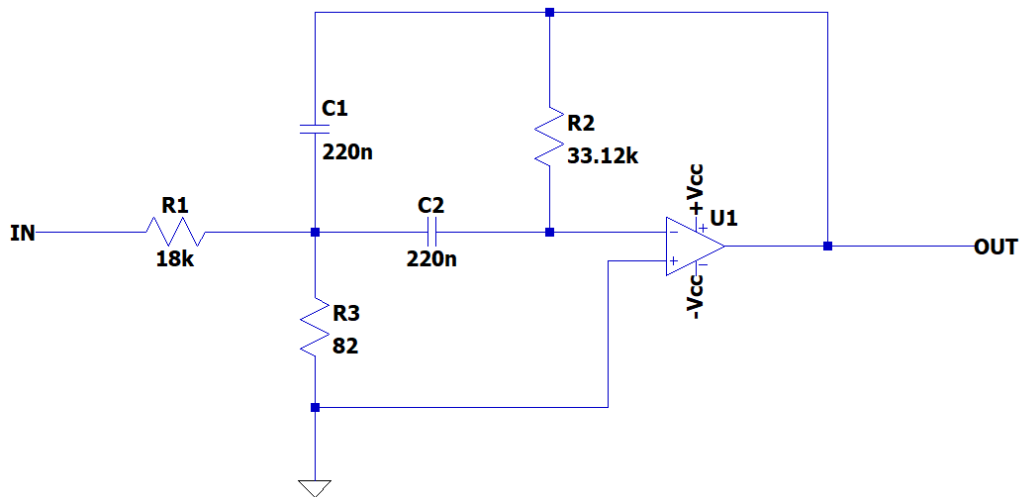


Figura 5.15. Circuito del filtro para su simulación en LTSpice.

Para observar la respuesta del circuito a distintas frecuencias se obtuvo su diagrama de Bode, mostrado en la Figura 5.15.

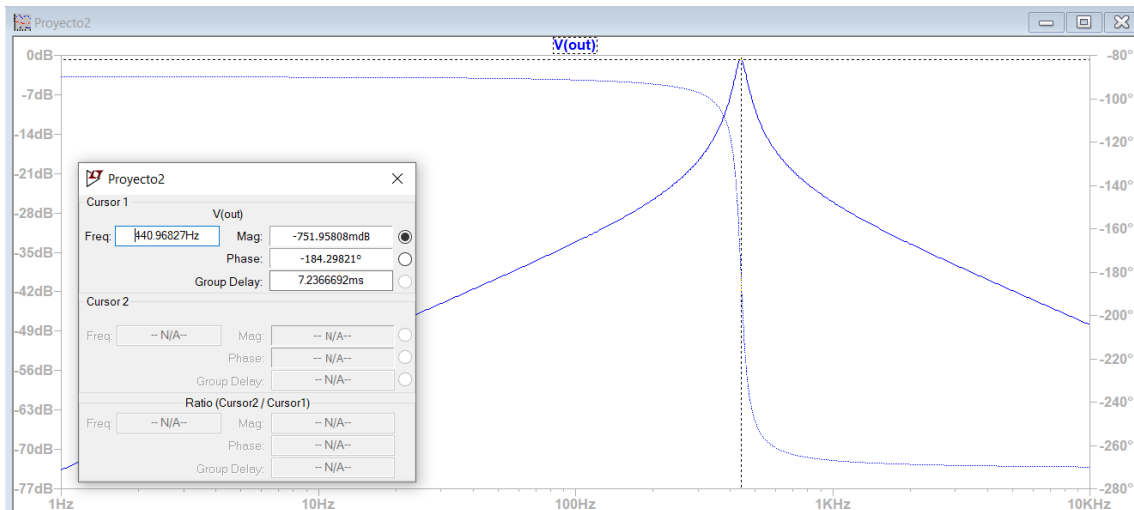


Figura 5.16. Diagrama de Bode resultante del filtro paso banda.

Se observa una gráfica típica de un **filtro paso banda**. Además, se comprueba con el cursor que su **frecuencia propia** coincide con la esperada: **440 Hz**. Además, con las frecuencias de corte superior e inferior se comprueba el valor del factor de calidad.

$$Q = \frac{f_0}{f_H - f_L} = \frac{440}{461,9 - 419,2} = \mathbf{10,30}$$

Se haya un factor de calidad similar al calculado teóricamente en el apartado 5.4.2, donde $Q_{teórica} = \mathbf{10,07}$.

Utilizando los valores obtenidos en la gráfica y en la Ec. 5.11, se obtienen los valores de amplitud de la tensión de salida según su frecuencia de entrada.

En la Tabla 5.1 se muestra la respuesta del filtro a determinadas frecuencias cuando la amplitud de entrada es 5V ($V_{IN}=5V$).

$$dB = 20 \log_{10}(V_{OUT}/V_{IN}) \quad \text{Ec. 5.19}$$

f(Hz)	dB	V _{OUT}
240	-22,98	0,3548
340	-15,29	0,8599
440	-0,7520	4,585
540	-13,30	1,081
640	-18,70	0,5807

Tabla 5.1. Valores de tensión de salida obtenidos a partir de la Figura 5.16 y la Ecuación 5.11 con una tensión de entrada de amplitud 5V.

Con los resultados de la Tabla 5.1 se comprueba que, a medida que la frecuencia de entrada se aleja de 440 Hz, la señal de salida obtenida tiene una amplitud menor.

5.6. RESULTADOS

Después de realizar el análisis y la simulación de los circuitos, se procedió a comprobar sus resultados en el laboratorio. A continuación, se mostrarán las distintas salidas de cada una de las etapas del afinador.

5.6.1. Captación de la señal sonora

En primer lugar, se montó el circuito de la Figura 5.1, mostrado en la Figura 5.17.

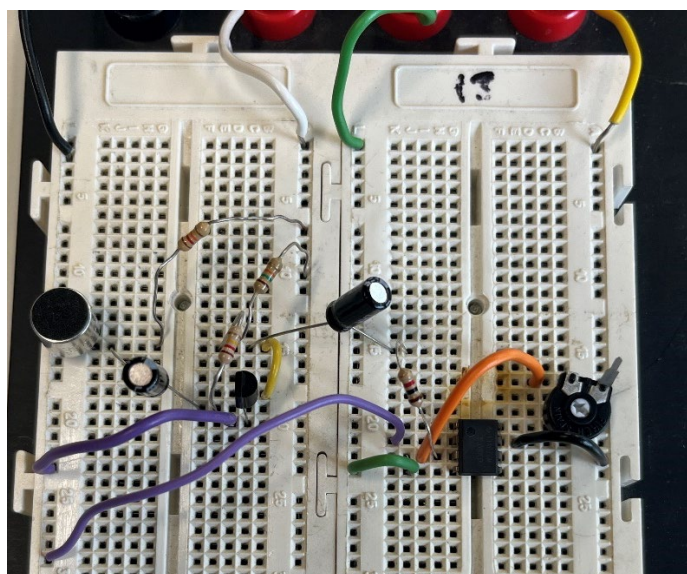


Figura 5.17. Montaje del circuito de captación de la señal sonora.

Para comprobar su correcto funcionamiento, se realizó su **análisis en frecuencia** entre **50 Hz y 10 kHz**, lo que corresponde a una zona de la banda de paso del circuito preamplificador. El resultado de la ganancia (**40,39 dB**) fue similar al obtenido en apartado 5.1.4 en LTSpice (**42,50 dB**).

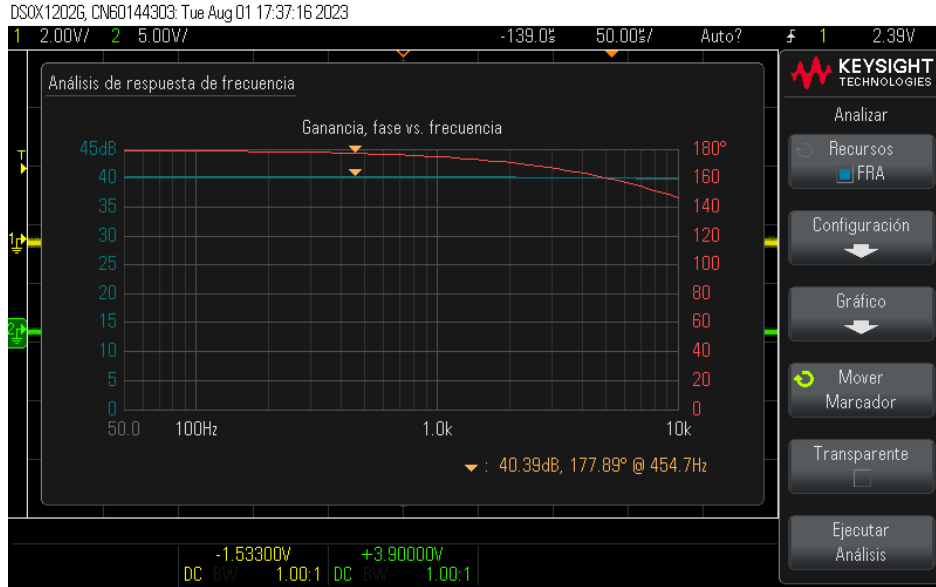


Figura 5.18. Diagrama de Bode del circuito preamplificador.

Además, se reprodujo mediante un dispositivo móvil una frecuencia de 440 Hz para comprobar la onda generada, obteniendo en el osciloscopio el resultado de la Figura 5.19.

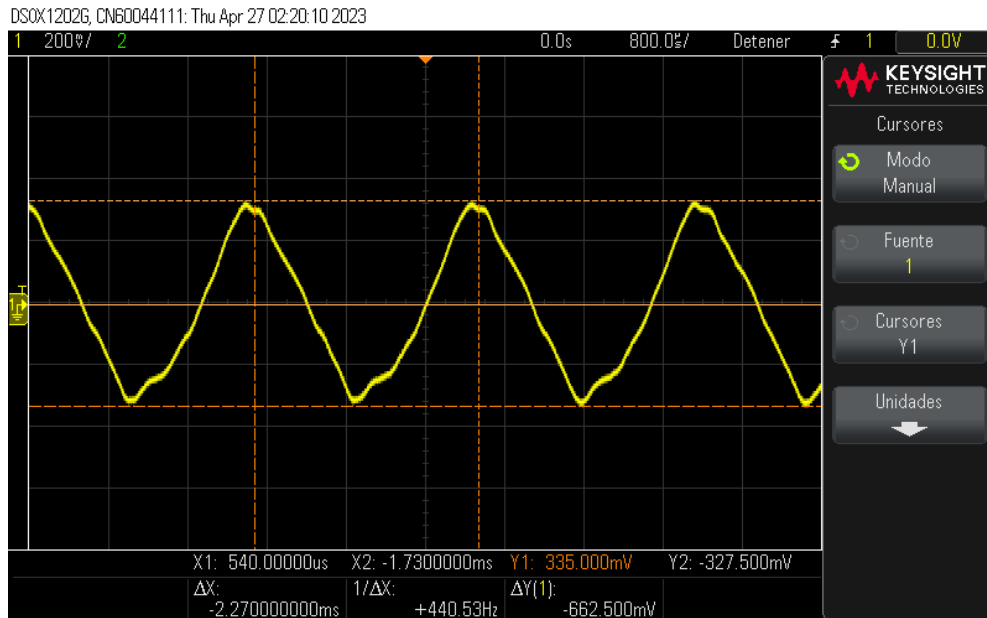


Figura 5.19. Resultado de la señal sonora convertida en tensión.

5.6.2. Filtrado de la frecuencia de referencia

En segundo lugar, se montó el filtro mostrado en la Figura 5.20 y se observó su respuesta en frecuencia (Figura 5.21).

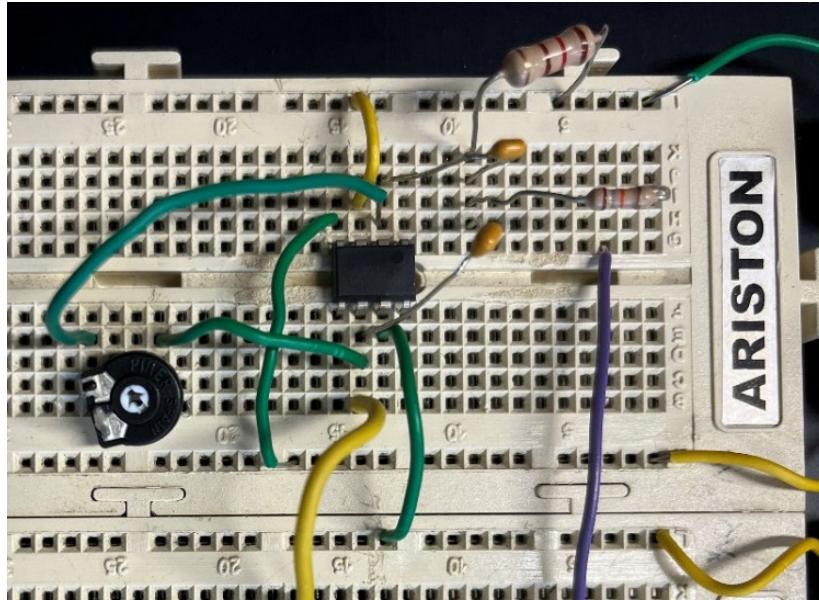


Figura 5.20. Montaje del circuito del filtro paso banda.

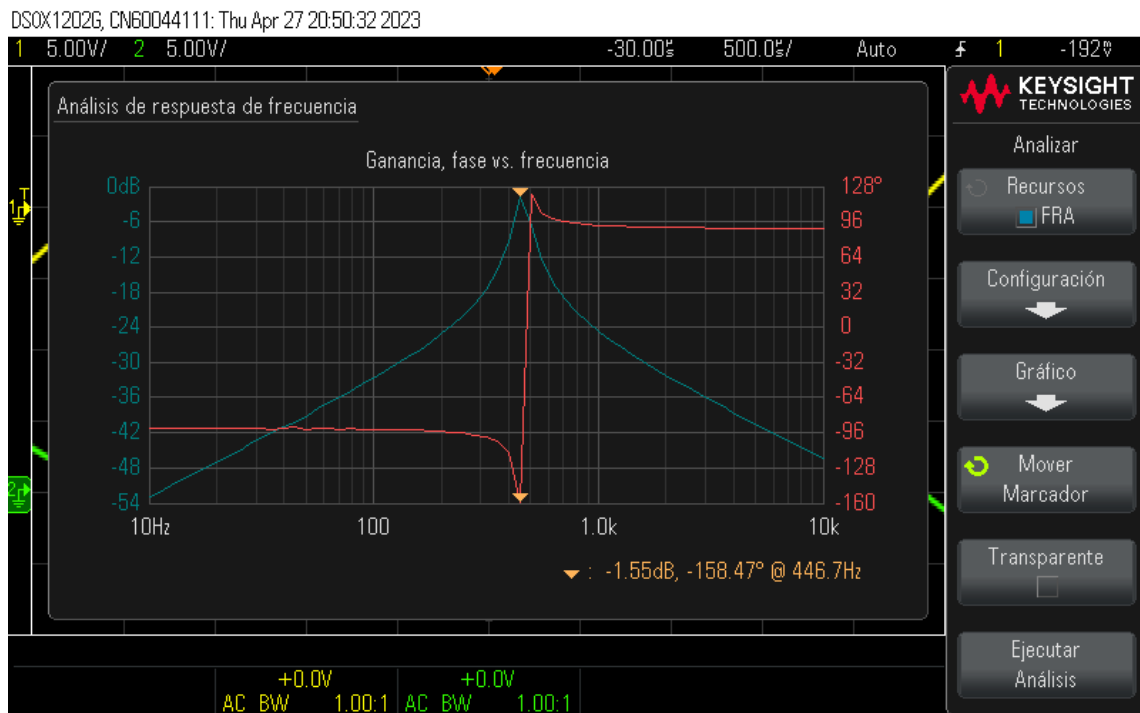


Figura 5.21. Diagrama de Bode resultante del filtro paso banda.

Para comparar el resultado con el obtenido en la simulación, se comparó la tensión en la salida de la Tabla 5.1 con los valores obtenidos con el osciloscopio.

f(Hz)	dB (Simulación)	dB (Laboratorio)	V _{OUT} (Simulación)	V _{OUT} (Laboratorio)
240	-22,98	-21,9	0,3548	0,4018
340	-15,29	-16	0,8599	0,7924
440	-0,752	-1,55	4,585	4,183
540	-13,3	-12,3	1,081	1,213
640	-18,7	-17,9	0,5807	0,636

Tabla 5.2. Comparación de los valores obtenidos en la simulación y en el laboratorio.

Se comprueba así que, al igual que en los resultados de la simulación, en el circuito real también se obtiene una señal de salida menor a medida que la frecuencia de entrada se aleja de 440 Hz.

Además, el **factor de calidad** obtenido en el **laboratorio** también es similar a la obtenida con LTSpice (**10,30**).

$$Q = \frac{f_0}{f_H - f_L} = \frac{440}{462,0 - 419,6} = 10,39$$

5.6.3. Visualización del grado de afinación

El último montaje fue el circuito que permite visualizar el grado de afinación, mostrado en la Figura 5.22. La salida de este circuito es la cantidad de LEDs encendidos según la amplitud de la tensión de entrada. Por ello, para comprobar su funcionamiento, se unieron los tres circuitos y se emitieron con un dispositivo móvil distintas frecuencias.

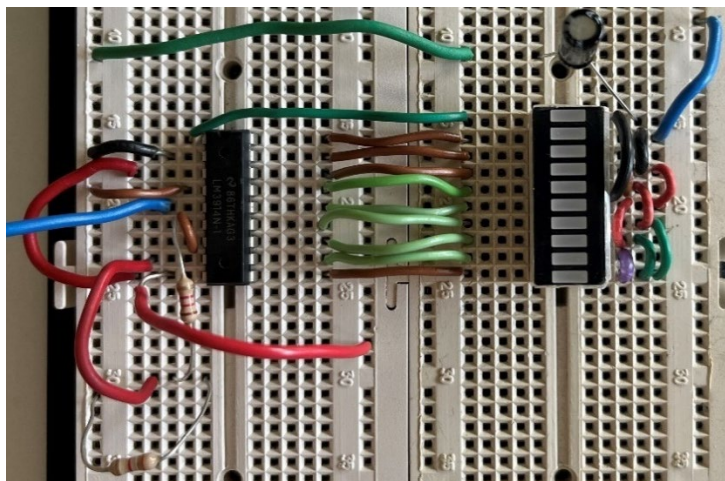


Figura 5.22. Montaje del circuito para la visualización del grado de afinación.

Cuando el sonido emitido es de una frecuencia de **440 Hz**, en la salida del filtro la tensión será de aproximadamente $\pm 5V$. Tal y como se ha montado el circuito de visualización, cuando esto ocurre, se deben encender **10 LEDs** en la salida. El resultado se muestra en la Figura 5.23.

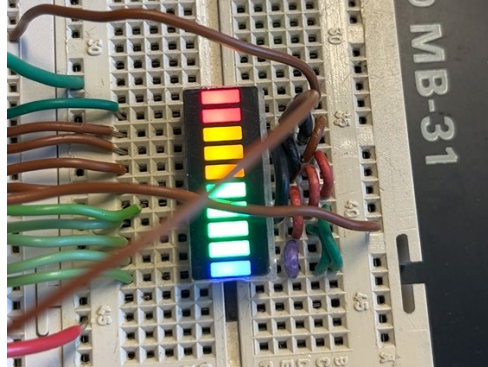


Figura 5.23. Iluminación de LEDs con una frecuencia de 440 Hz.

Posteriormente, se comprobó el encendido de los LEDs cuando la frecuencia de entrada era similar a una de las **frecuencias de corte**. A una frecuencia de **462 Hz**, la ganancia debe ser de **-3 dB**, lo que corresponde a una tensión de salida de $\pm 3,54 V$. Por tanto, se deben encender **7 LEDs**. El resultado se muestra en la Figura 5.24.

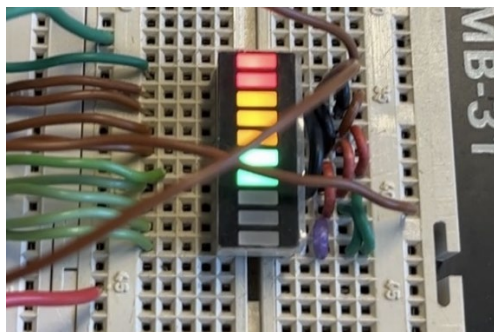


Figura 5.24. Iluminación de LEDs con una frecuencia de 462 Hz.

Conforme la frecuencia de referencia se aleja de **440 Hz**, el número de LEDs encendidos es menor. Se verificó este resultado comprobando con frecuencias de **400 Hz** y **540 Hz**. Donde el resultado fue de **4 LEDs** encendido y **2 LEDs** respectivamente.

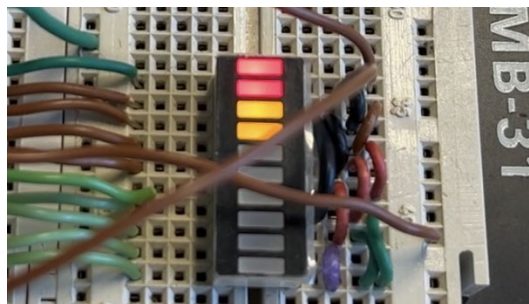


Figura 5.25. Iluminación de LEDs con una frecuencia de 400 Hz.

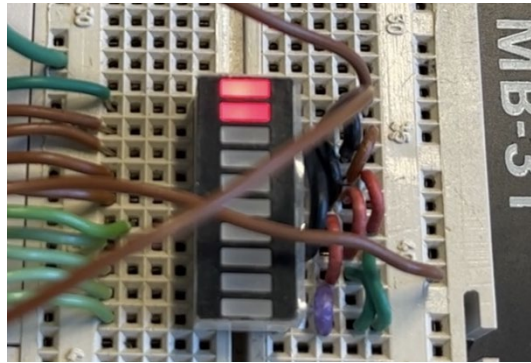


Figura 5.26. Iluminación de LEDs con una frecuencia de 540 Hz.

CAPÍTULO 6. PROPUESTA 3: TRANSMISIÓN INFRARROJA

6.1. DESCRIPCIÓN

Como último proyecto, se desarrollará un sistema de **transmisión** sencillo a través de una **señal infrarroja**. Para ello, se contará con un **diodo LED infrarrojo**, en el circuito transmisor, y un **fototransistor**, en el circuito receptor. La información transmitida se **modulará** empleando una modulación en amplitud sobre una portadora cuadrada y, tras su llegada al circuito receptor, se **demodulará**. De esta forma, se conseguirá que la **luz del ambiente** no afecte al resultado de la transmisión.

6.2. OBJETIVOS

El sistema completo de este proyecto estará compuesto de cinco circuitos, que son: **generador de onda cuadrada**, **circuito modulador**, **circuito transmisor**, **circuito receptor** y **filtro paso banda**. Con el propósito de que el sistema de comunicación funcione correctamente, se deberán cumplir los siguientes objetivos:

- Entender el funcionamiento del **integrado 555** como **astable**, con el fin de generar una **onda cuadrada** adecuada para funcionar como **onda portadora**.
- Comprender el comportamiento de un **circuito modulador**, consiguiendo obtener una **onda modulada** con una **señal cuadrada**, como **onda portadora**, y una **señal senoidal**, como **onda moduladora**.
- Ajustar la **corriente** y la **tensión** de forma adecuada para el funcionamiento del **diodo LED infrarrojo** y del **fototransistor** en los **circuitos transmisor y receptor**, respetivamente.
- Conseguir, a través del **filtrado**, recuperar la onda senoidal inicial, **demodulando** la onda recibida y, además, **eliminando su componente continua**, consecuencia de la **luz del ambiente**.
- Comprobar que, tras cumplirse el resto de los objetivos, la **transmisión infrarroja** funciona correctamente.

6.3. ESQUEMÁTICO

Como ya se ha mencionado, el sistema completo estará formado de cinco circuitos: **generador de onda cuadrada**, **circuito modulador**, **circuito transmisor**, **circuito receptor** y **filtro**. Para estudiarlos de una forma más sencilla, se montará cada uno de ellos por separado. En cada Figura, se especifica la **entrada**, correspondiente a la salida del circuito anterior, en **verde** y la **salida** del propio circuito en color **rojo**.

6.3.1. Generador de onda cuadrada

El objetivo de este circuito es el de **generar** una **onda cuadrada** que, posteriormente, pueda ser usada en el circuito modulador como **onda portadora**. Para ello, se utilizará el **integrado 555** como **astable** [17]. Los valores de las resistencias y condensadores dependerán del **periodo** y del **ciclo de trabajo** deseados.

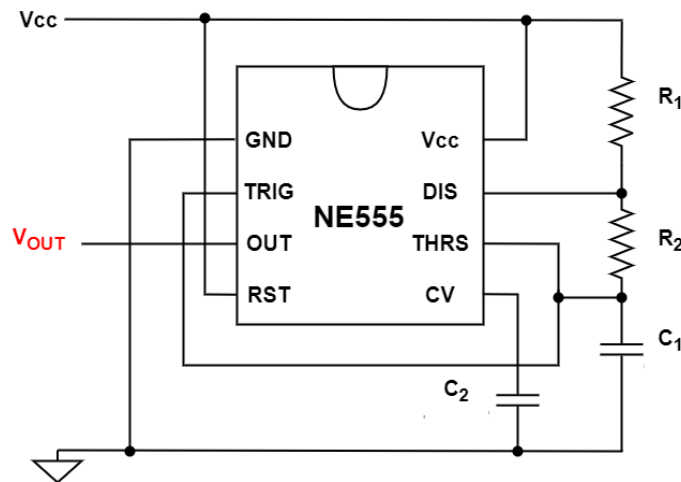


Figura 6.1. Esquemático del circuito generador de onda cuadrada.

6.3.2. Circuito modulador

Para la transmisión se utilizará una **señal senoidal**, que será la **onda moduladora del circuito**. Por otra parte, se utilizará como **onda portadora** la **señal cuadrada** generada anteriormente. El **circuito modulador** es el mostrado en la Figura 6.2 [18].

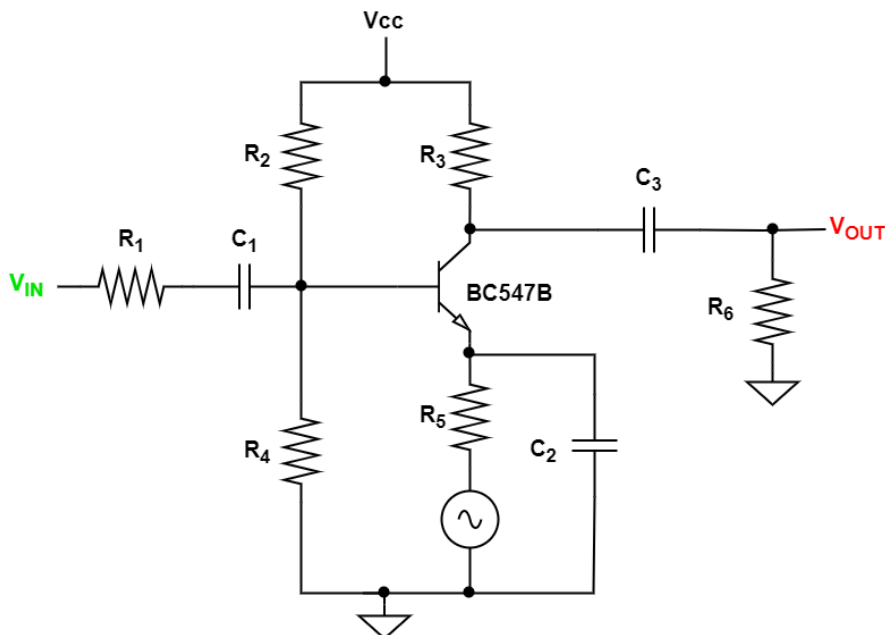


Figura 6.2. Esquemático del circuito modulador.

6.3.3. Circuito transmisor

La señal infrarroja se **transmitirá** a partir de un **diodo LED infrarrojo**, que transforma la corriente en **luz infrarroja**. Para conseguir adaptar la **señal modulada** a una **corriente** adecuada para el LED, se utilizarán un **amplificador operacional**, un **transistor** y una **resistencia** en una configuración de **amplificador de transconductancia**.

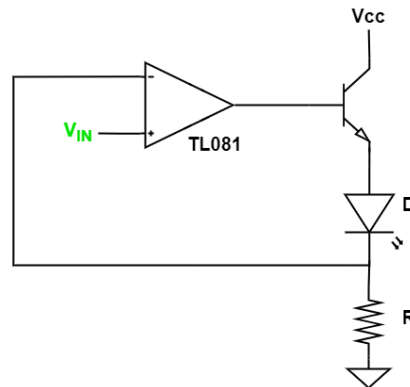


Figura 6.3. Esquemático del circuito transmisor.

6.3.4. Circuito receptor

La **recepción** de la señal se realizará por medio de un **fototransistor**. Se utilizará una **fuentes de continua** para **alimentarlo** y una **resistencia** para controlar la **corriente**. La **onda recibida** tendrá una **tensión proporcional** a la de la **onda transmitida** en el circuito anterior.

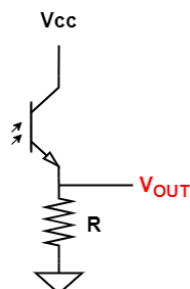


Figura 6.4. Esquemático del circuito receptor.

6.3.5. Filtro paso banda

El **filtro paso banda** tendrá dos propósitos. Por un lado, se deberá **demodular** la señal recibida para recuperar la onda senoidal, por lo que la **frecuencia máxima de la banda de paso** deberá ser considerablemente **inferior** a la de la **onda cuadrada** generada. Por otro lado, se deberá **eliminar la componente continua**, que se produce como consecuencia de la **luz ambiente**. La configuración escogida para ello será **Sallen-Key** [12] que, al tratarse de un **filtro activo**, además de eliminar frecuencias indeseadas, permitirá amplificar la señal recibida. Además, con el fin de que el filtro no afecte a la onda recibida, se ha incluido al inicio del circuito un **seguidor de tensión**.

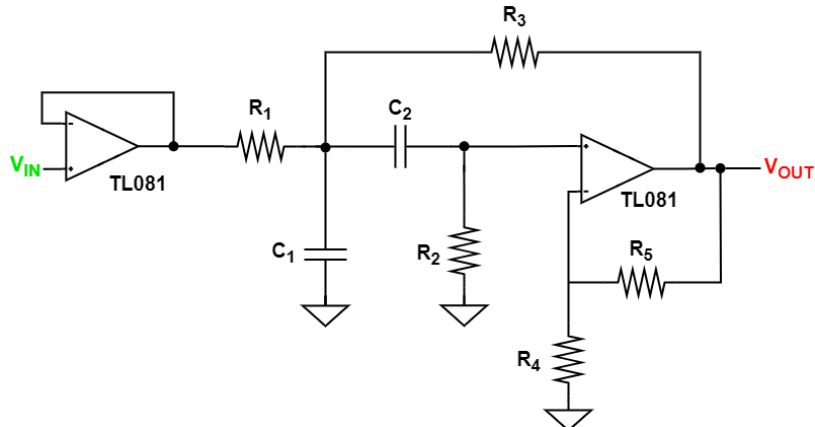


Figura 6.5. Esquemático del filtro paso banda.

6.4. ANÁLISIS

En este apartado, se analizará el comportamiento de los circuitos anteriores, con los objetivos de comprobar su correcto funcionamiento y de asignar valores a sus componentes.

6.4.1. Generador de onda cuadrada

Para generar la onda cuadrada se utilizará el **circuito integrado 555** en una configuración **astable**. Este integrado está compuesto de **dos comparadores**, **tres resistencias**, **un transistor** y **un flip-flop**. Conectado como astable, el circuito genera una señal cuadrada, cuyo **periodo** y **ciclo de trabajo** dependen de los **valores de las resistencias** y el **condensador**.

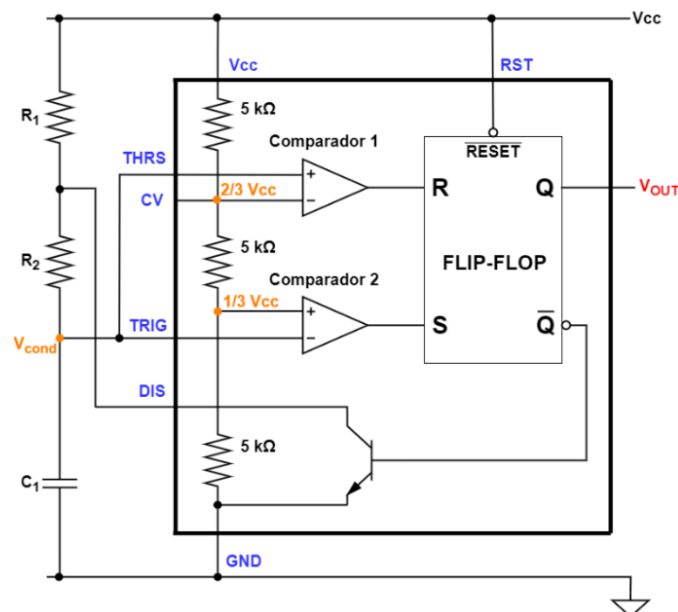


Figura 6.6. Esquema del interior del Integrado 555 conectado como astable.

El Integrado 555 debe su nombre a las **tres resistencias de $5\text{ k}\Omega$** que se encuentran en su interior. Al tratarse de tres resistencias iguales, en cada una de ellas **caerá una tensión** igual a $\frac{1}{3} V_{cc}$. Por lo que la **patilla – del comparador 1** tendrá siempre una tensión de $\frac{2}{3} V_{cc}$ y la **patilla + del comparador 2** de $\frac{1}{3} V_{cc}$. El resto de entradas al comparador dependerán de la **carga del condensador** del circuito exterior (V_{cond}).

En el estado inicial, el condensador se encuentra descargado, por lo que la tensión en la **patilla + del comparador 1** y en la **patilla – del comparador 2** es igual a $0V$. En consecuencia, en el **comparador 1** la salida será 0 ($V^+ < V^-$) y en el **comparador 2** será V_{cc} ($V^+ > V^-$). Así pues, en el **flip-flop**, se tendrá el $SET=1$ y $RESET=0$, por lo que la salida será en este caso será $V_{out}=V_{cc}$.

Posteriormente, el **condensador** se irá **cargando** gradualmente **a través de R_1 y R_2** , por lo que la curva que formará V_{cond} dependerá de ambas resistencias. Cuando V_{cond} alcanza una tensión **superior a $\frac{2}{3} V_{cc}$** , la salida del **comparador 1** es de V_{cc} ($RESET=1$) y la del **comparador 2** es de 0 ($SET=0$), por lo que la salida del flip-flop cambiará a $V_{out}=0$.

Al mismo tiempo que la salida Q del flip-flop se pone a 0 , la salida \bar{Q} se pondrá a V_{cc} , llevando a **saturación** al **transistor** del 555. Como resultado, el **condensador** conseguirá **descargarse** a través de R_2 . Esta **descarga finalizará** cuando la tensión $V_{cond} < \frac{1}{3} V_{cc}$, donde se volverá a la situación inicial. Se tendrá en el comparador 1 $V^+ < V^-$, en el comparador 2 $V^+ > V^-$ y, por tanto, $Q=V_{cc}$ y $\bar{Q}=0$. El transistor no dejará pasar las cargas y, por tanto, el condensador volverá a cargarse de nuevo.

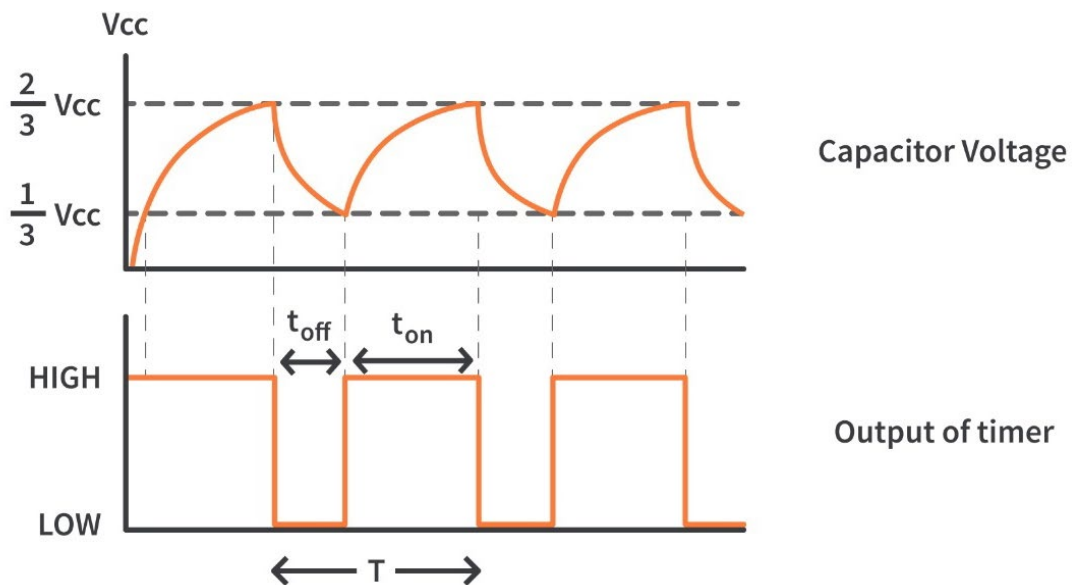


Figura 6.7. Tensión en el condensador (V_{cond}) y en la salida (V_{OUT}) [19].

Como se ha explicado, t_{ON} dependerá de R_1 , R_2 y C y t_{OFF} de R_2 y C . Las ecuaciones, especificadas en la hoja de características del integrado [17], son:

$$t_{ON} = 0,693 (R_1 + R_2) C \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$t_{OFF} = 0,693 R_2 C \quad \text{Ec. 6.2}$$

Por lo que la frecuencia de la onda cuadrada estará determinada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2) C} \quad \text{Ec. 6.3}$$

La **onda moduladora** será una **onda senoidal** con una frecuencia de **1 kHz**. La onda cuadrada generada funcionará como **portadora**, por lo que su frecuencia deberá ser muy superior. En este caso, se ha considerado como adecuada una frecuencia de **50 kHz**. Además, se ha fijado el valor del **condensador** en **10 nF**.

Para determinar el valor de las resistencias, se tendrá en cuenta el **ciclo de trabajo**, determinado por la Ec. 6.4.

$$D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \quad \text{Ec. 6.4}$$

Para que el ciclo de trabajo no sea inferior al 65%, pero la diferencia entre resistencias no sea considerable, se han escogido los siguientes valores para las resistencias: **$R_1 = 0,82 \text{ k}\Omega$** y **$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$** .

Con las magnitudes escogidas para la configuración del Integrado 555 como astable, el resultado de este circuito será una **onda cuadrada**, con una **frecuencia de 51,06 kHz** y un **ciclo de trabajo del 64,54 %**. Además, sus valores máximo y mínimo serán **5V** y **tierra**, que coinciden con la alimentación del integrado.

6.4.2. Circuito modulador

La finalidad de este circuito es conseguir una **señal modulada**. Por un lado, la **onda portadora** será la señal generada en el apartado anterior, una señal **cuadrada** de alrededor de **50 kHz** y **tensión de 0-5V**. Por otro lado, la **onda moduladora** consistirá en una **onda senoidal** de **1 kHz** y **amplitud de 2V**.

Para cumplir con el objetivo descrito, se utilizará el circuito de la Figura 6.8. Como muestra dicha figura, se empleará un transistor, resistencias y condensadores. La **onda portadora** se aplicará en la **base del transistor** y la

señal moduladora en el emisor. De esta forma, se multiplicarán ambas señales, produciendo la modulación.

El circuito fue tomado de [18]. En dicho circuito, la señal portadora tenía una amplitud de entrada considerablemente menor que la señal moduladora. Para corregir este efecto, en el circuito utilizado en el proyecto, se ha incluido una **resistencia de entrada de 100 kΩ (R₁ en la Figura 6.8)**. De esta forma, al caer una cierta tensión en esta resistencia, actuará como un divisor de tensión con la resistencia de entrada del circuito, consiguiendo que la tensión aplicada en la base sea notablemente menor que la tensión de salida del circuito anterior.

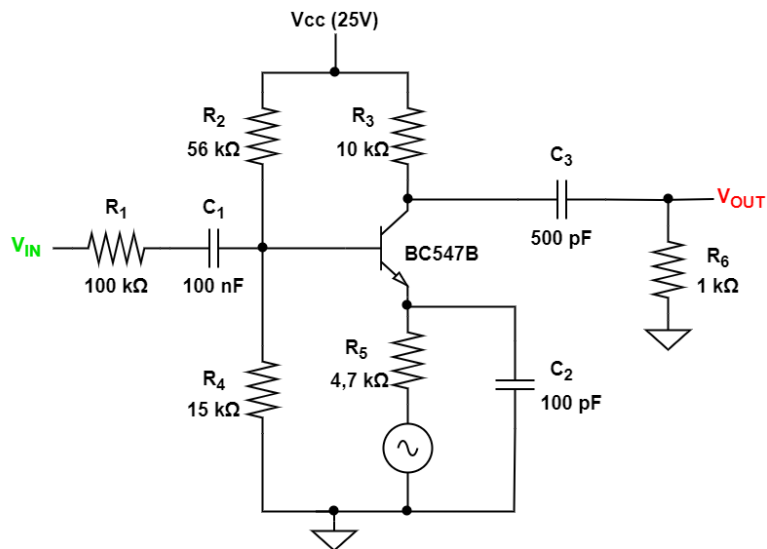


Figura 6.8. Esquemático del circuito modulador.

Si en el circuito mostrado la señal en el emisor es nula, el transistor operaría como un amplificador lineal. Es decir, la señal de la base se vería amplificada e invertida 180° en el colector. Sin embargo, al aplicar una cierta **tensión en el emisor**, la amplitud de la salida irá variando en relación con esta.

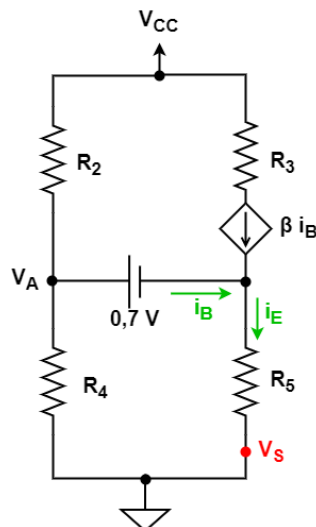


Figura 6.9. Modelo del transistor para su análisis en DC.

Del modelo del transistor en continua, se halla la relación de intensidades entre los distintos terminales del transistor.

$$i_C + i_B = i_E \Rightarrow (1 + \beta) i_B = i_E \quad \text{Ec. 6.5}$$

Observando el resto del circuito se obtienen también las siguientes relaciones:

$$\frac{V_{CC} - V_A}{R_2} - \frac{V_A}{R_4} = i_B \quad \text{Ec. 6.6}$$

$$\frac{V_A - 0,7 - V_S}{R_5} = i_E = (1 + \beta) i_B \quad \text{Ec. 6.7}$$

Con las Ec. 6.5, Ec. 6.6 y Ec. 6.7 se halla i_B en función de V_S .

$$i_B = \frac{V_{CC} R_4 - (0,7 + V_S)(R_2 + R_1)}{R_5 (R_2 + R_1) (1 + \beta) + R_2 R_4} \quad \text{Ec. 6.8}$$

Una vez calculado el punto de polarización del circuito en función de V_S , es posible calcular la ganancia de pequeña señal empleando el modelo π del transistor para la banda de paso.

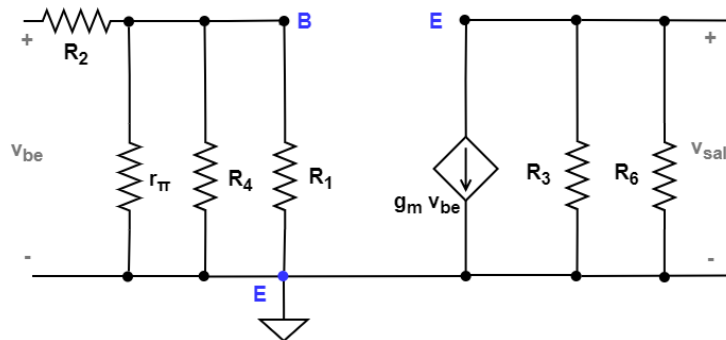


Figura 6.10. Modelo π del transistor para su análisis en AC.

Se obtiene que la ganancia del circuito viene determinada por:

$$A = \frac{v_{sal}}{v_{ent}} \Big|_{R_L = \infty} = \frac{-g_m v_{be} R_3 // R_6}{v_{be}} = -g_m R_3 // R_6 \quad \text{Ec. 6.9}$$

siendo g_m :

$$g_m = \frac{i_C}{V_T} = \frac{\beta i_B}{V_T} = \frac{\beta}{V_T} \frac{V_{CC} R_4 - (0,7 + V_S)(R_2 + R_1)}{R_5 (R_2 + R_1) (1 + \beta) + R_2 R_4} \quad \text{Ec. 6.10}$$

Como i_C depende de V_S , g_m y, por tanto, la ganancia del transistor, también lo harán. Así pues, la **onda en la salida** será la resultante de la **multiplicación de A y la señal en la entrada**. Su forma deberá ser similar a la mostrada en la Figura 6.11.

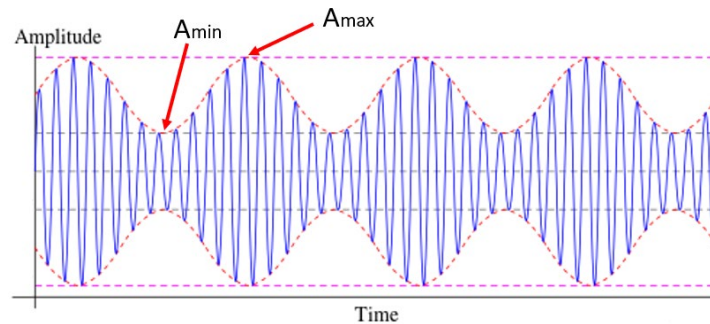


Figura 6.11. Onda resultante en la salida del circuito modulador.

Por las ecuaciones descritas anteriormente, A_{max} se producirá cuando V_S sea mínima y A_{min} se producirá cuando V_S sea máxima.

6.4.3. Circuito transmisor

El elemento principal del circuito transmisor es un **diodo LED infrarrojo**. Este tipo de diodos funcionan **convirtiendo la corriente eléctrica en luz infrarroja**. Por lo que, el objetivo de este circuito será conseguir, con la señal obtenida en el circuito modulador, la corriente adecuada para el LED. Para ello, se utilizarán un **amplificador operacional**, un **transistor** y una **resistencia**.

En primer lugar, con el fin de que la corriente de entrada al circuito no afecte a la señal modulada, se empleará el **amplificador operacional con realimentación negativa**. Conectando la salida del circuito modulador a la entrada + del amplificador operacional, se consigue que el circuito tenga una **resistencia de entrada infinita**. La **alimentación** del amplificador operacional será de **$\pm 15V$** .

No obstante, la **corriente** proporcionada por el **amplificador operacional no es suficiente** para que el diodo LED funcione correctamente. Por esa razón, la salida del operacional se conectará a la **base de un transistor**, que se **polarizará** con una **tensión de +15 V** en el **colector**. Cuando la **tensión** en la **base** sea **positiva**, el transistor se encontrará en **activa** y la corriente en el emisor será **β veces** la de la base.

Por otro lado, se utilizará la propiedad de **semiconductor** del transistor para eliminar las **tensiones negativas** de la onda modulada. Cuando la **tensión** en la **base** sea negativa, el transistor estará en **corte** y, por tanto, la **corriente en el emisor será nula**. De esta forma será más sencillo recuperar la onda senoidal después de su llegada al circuito receptor.

La salida del diodo se conectará a la entrada (–) del amplificador operacional, consiguiendo así la realimentación negativa. En consecuencia, para **modular** la **corriente del diodo**, se conectará una **resistencia** entre su salida y tierra. Esta resistencia permitirá ajustar la corriente que circule por el LED, siendo mayor cuanto menor sea la resistencia. Por ello, para obtener una corriente adecuada para que la iluminación del LED tenga un alcance adecuado, se utilizará una resistencia pequeña de **100 Ω** .

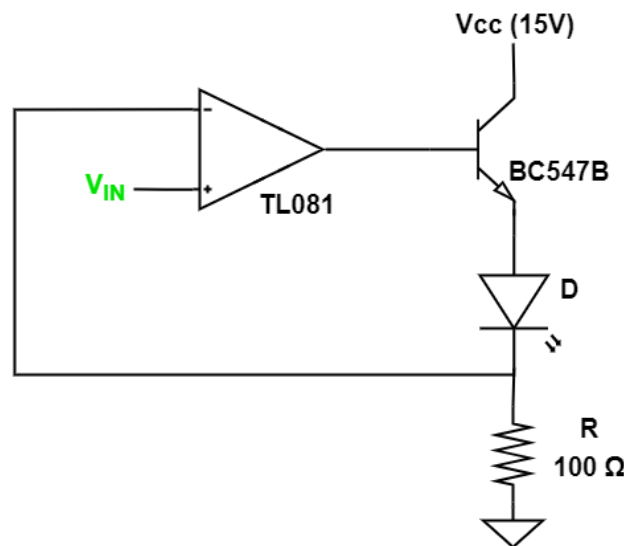


Figura 6.12. Circuito transmisor con los valores y modelos de sus componentes.

6.4.4. Circuito receptor

El elemento principal del circuito receptor es un **fototransistor**. Al contrario que el diodo LED, este dispositivo convierte la **luz infrarroja** en una **señal eléctrica**. Cuando la luz incide en el fototransistor, los fotones de esa luz liberan electrones en la base del transistor.

Al igual que en un transistor NPN convencional, si se encuentra en **activa**, la corriente que circula a través de la base se verá **amplificada** en la que circula a través del emisor y colector. Es por ello por lo que para conseguir que el transistor se encuentre en esta zona de trabajo, se conectará el **colector a +15V** y el **emisor a una resistencia de 10 k Ω** . El circuito resultante es el de la Figura 6.13.

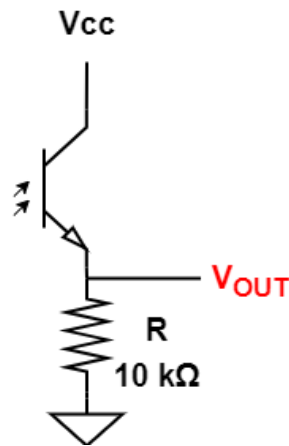


Figura 6.13. Circuito utilizado para la recepción de la señal transmitida.

6.4.5. Filtro paso banda

Con el propósito de **demodular** la onda recibida y **eliminar la componente continua**, se diseñará un filtro paso banda. La configuración escogida será **Sallen-Key** ya que, al tratarse de un **filtro activo**, se conseguirá **amplificar** la señal a la vez que se filtra.

Con el fin de conseguir las frecuencias de corte deseadas, se analizarán en función de las resistencias y condensadores del circuito. Para ello, se calculará la función de transferencia del filtro.

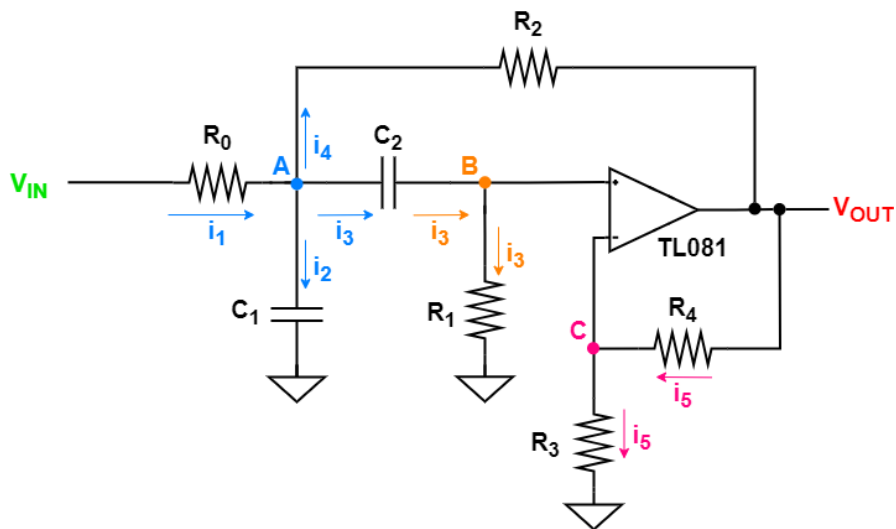


Figura 6.14. Filtro paso banda.

Del **nodo A** (señalado en azul en la Figura 6.14) se obtiene:

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4$$

$$\frac{V_{IN} - V_A}{R_0} = \frac{V_A}{Z_{C1}} + \frac{V_A - V_B}{Z_{C2}} + \frac{V_A - V_{OUT}}{R_2}$$

Ec. 6.11

Del **nodo B** (señalado en naranja en la Figura 6.14) se obtiene:

$$\frac{V_A - V_B}{Z_{C2}} = \frac{V_B}{R_1} \Rightarrow V_A = \left(1 + \frac{Z_{C2}}{R_1}\right) V_B \quad \text{Ec. 6.12}$$

Del **nodo C** (señalado en rosa en la Figura 6.14) se obtiene:

$$\frac{V_{OUT} - V_C}{R_4} = \frac{V_C}{R_3} \Rightarrow V_C = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{OUT} \quad \text{Ec. 6.13}$$

Suponiendo que el amplificador operacional es ideal, la tensión en ambas entradas deberá ser igual, por tanto, $V_B = V_C$. De esta forma, con la Ec. 6.13 se halla V_B en función de V_{OUT} . Además, utilizando la Ec. 6.12, se halla también V_A en función de V_{OUT} . Para simplificar los cálculos, se ha sustituido $1 + \frac{R_4}{R_3}$ por **K**.

$$V_B(V_{OUT}) = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{OUT} = \frac{1}{K} V_{OUT} \quad \text{Ec. 6.14}$$

$$V_A(V_{OUT}) = \left(1 + \frac{Z_{C2}}{R_1}\right) \frac{1}{K} V_{OUT} \quad \text{Ec. 6.15}$$

Sustituyendo Ec. 6.14 y Ec. 6.15 en Ec. 6.11 se obtiene:

$$V_{IN} = \frac{1}{K} \left(1 + \frac{Z_{C2}}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_0}{R_2} + \frac{R_0}{Z_{C1}} + \frac{R_0}{Z_{C2}}\right) V_{OUT} + \frac{1}{K} \frac{R_0}{Z_{C2}} V_{OUT} + \frac{R_0}{R_2} V_{OUT} \quad \text{Ec. 6.16}$$

Remplazando las impedancias: $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$, $s = j\omega \Rightarrow Z_C = \frac{1}{sC}$ y operando, se halla la función de transferencia (Ec. 6.17).

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{KR_1R_2C_2s}{R_0 + R_2 + R_1R_2C_2s + R_0R_2C_1s + R_0R_2C_2s + R_0R_1C_2(1-K)s + R_0R_1R_2C_1C_2s^2}$$

$$H(s) = \frac{\frac{KR_1R_2C_2}{R_0 + R_2} s}{\frac{R_0R_1R_2C_1C_2}{R_0 + R_2} s^2 + \frac{R_1R_2C_2 + R_0R_2C_1 + R_0R_2C_2 + R_0R_1C_2(1-K)}{R_0 + R_2} s + 1} \quad \text{Ec. 6.17}$$

En filtros de segundo orden:

$$H(s) = \frac{\frac{A_0}{Q\omega_0} s}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{1}{Q\omega_0} s + 1} \quad \text{Ec. 6.18}$$

Por tanto, la **frecuencia propia** del filtro será:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_0 + R_2}{R_0 R_1 R_2 C_1 C_2}} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 + R_2/R_0}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \text{Ec. 6.19}$$

Su **factor de calidad** vendrá determinado por la expresión:

$$Q\omega_0 = \frac{R_0 + R_2}{R_1 R_2 C_2 + R_0 R_2 C_1 + R_0 R_2 C_2 + R_0 R_1 C_2 (1 - K)}$$

$$Q = \frac{1 + R_2/R_0}{\omega_0 \left(\frac{R_1 R_2}{R_0} C_2 + R_2 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 (1 - K) \right)} \quad \text{Ec. 6.20}$$

Con la **frecuencia propia** (Ec. 6.19) y el **factor de calidad** (Ec. 6.20) se pueden determinar las **frecuencias de corte alta y baja** del filtro. Dichas frecuencias vienen dadas por las Ec. 6.21 y Ec. 6.22.

$$f_L = f_0 \left(\frac{-1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right) \quad \text{Ec. 6.21}$$

$$f_H = f_0 \left(\frac{1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right) \quad \text{Ec. 6.22}$$

Además, la **ganancia** conseguida en el filtro será:

$$\frac{A_0}{Q\omega_0} = \frac{KR_1 R_2 C_2}{R_0 + R_2} \Rightarrow A_0 = \frac{KQC_2 R_1 \omega_0}{1 + R_0/R_2} \quad \text{Ec. 6.23}$$

Para comenzar dando valores a los componentes, dado que existen menos valores estándar para condensadores que para resistencias, se fijará el valor de los condensadores: $C_1 = 10 \text{ nF}$ y $C_2 = 1 \text{ }\mu\text{F}$. Una vez fijados, para que el filtro cumpla con los objetivos establecidos, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- $0 < f_L < 1 \text{ kHz}$, para eliminar la componente continua que introduce la luz del ambiente sin eliminar la frecuencia de la onda senoidal que se está recibiendo.
- $1 \text{ kHz} < f_H < 50 \text{ kHz}$, para demodular la onda y recuperar la onda senoidal de 1 kHz.
- $A_0 \approx 10 \text{ V/V}$, para amplificar la onda recibida.

Teniendo en cuenta estas condiciones y los valores estándar de las resistencias, sus valores serán de: $R_0 = 8,2 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 180 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 18 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 180 \text{ k}\Omega$. Con estas magnitudes se cumplen los tres criterios mencionados: $f_L = 10,07 \text{ Hz}$, $f_H = 2,138 \text{ kHz}$ y $A_0 = 10,03 \text{ V/V}$. El circuito final se muestra en la Figura 6.15. La alimentación del amplificador operacional será de $\pm 15\text{V}$.

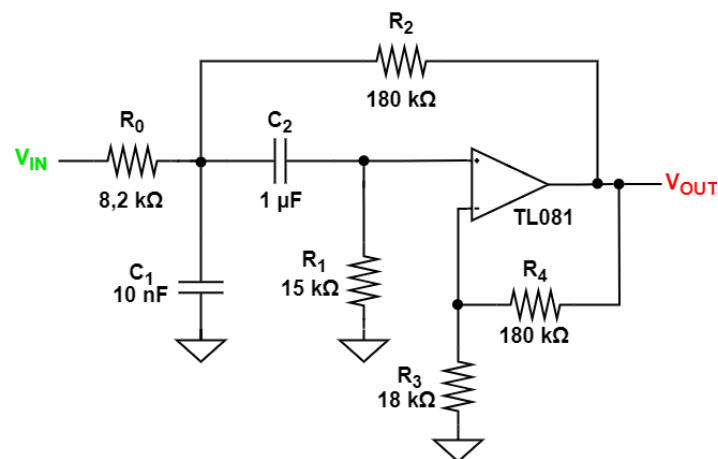


Figura 6.15. Circuito final para el filtrado de la señal recibida.

6.5. SIMULACIÓN

Para comprobar que cada circuito del sistema funciona según lo establecido en el análisis, antes de montarlos, se simularán **LTSpice**.

6.5.1. Generador de onda cuadrada

En primer lugar, se comprobó que el circuito que genera la onda cuadrada cumplía con su propósito. El esquema introducido en LTSpice se muestra en la Figura 6.16 y la onda de salida en la Figura 6.17.

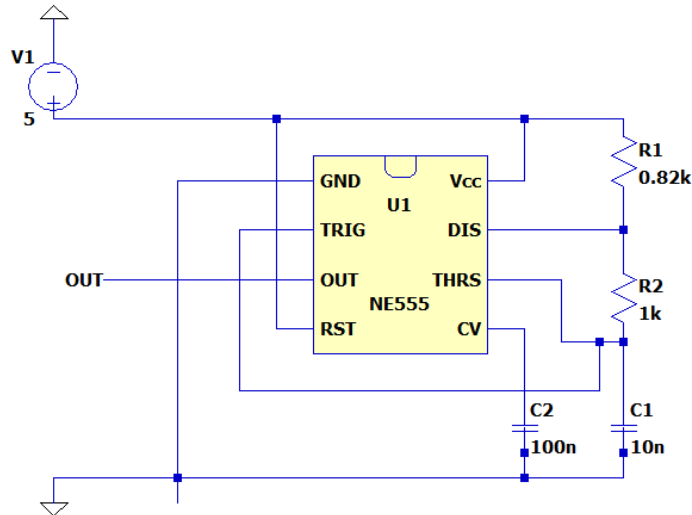


Figura 6.16. Circuito generador de onda cuadrada en LTSpice.

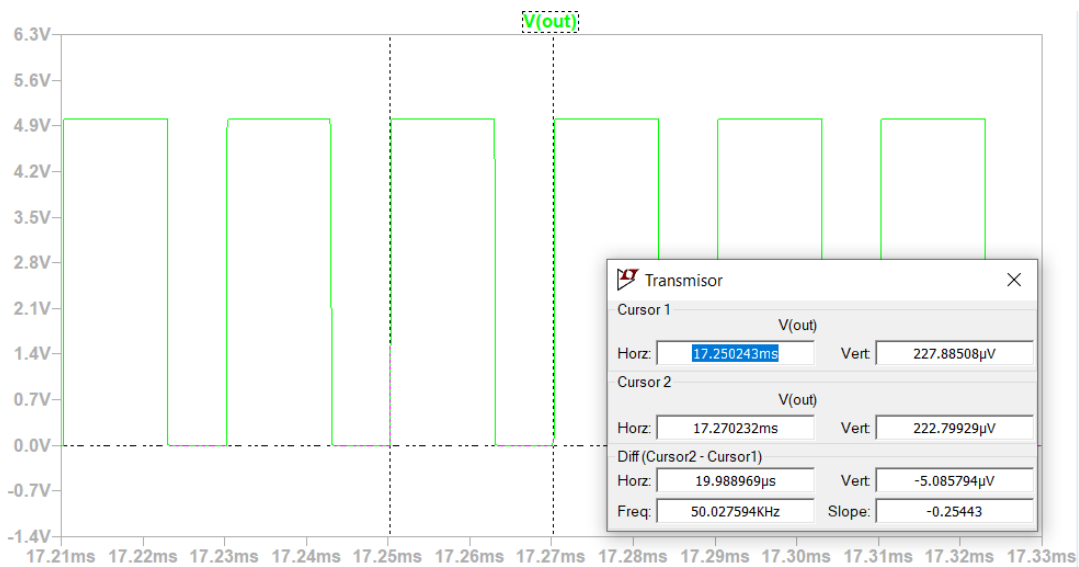


Figura 6.17. Onda de salida en circuito generador de onda cuadrada.

La salida de este circuito corresponde con lo esperado, una **onda cuadrada** con una **tensión mínima de 0V** y **máxima de 5V**. Además, su **frecuencia** es de **50,03 kHz** y el **ciclo de trabajo** de **0,636**, coincidiendo con los resultados obtenidos en el análisis teórico.

6.5.2. Circuito modulador

Para verificar el funcionamiento del circuito modulador, el esquema introducido fue el indicado en la Figura 6.18. La entrada de este circuito corresponde con la salida del circuito anterior.

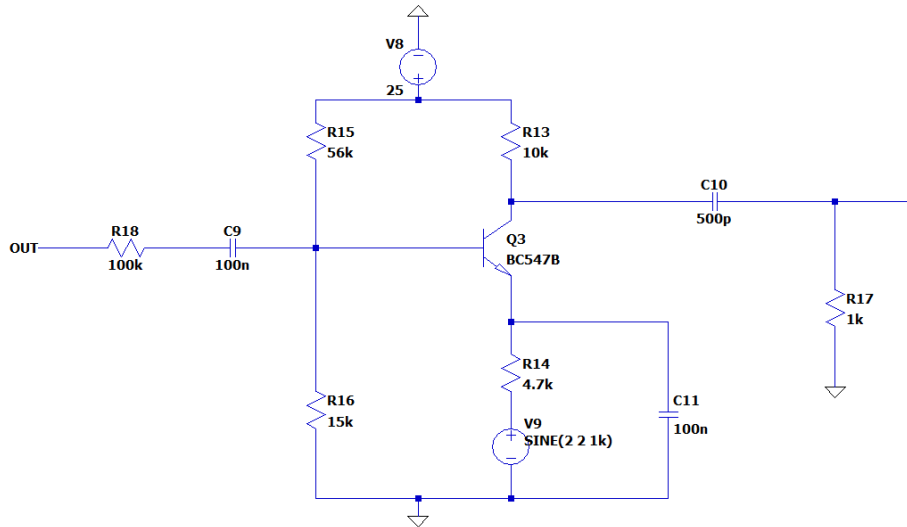


Figura 6.18. Circuito modulador en LTSpice.

La onda de salida es una multiplicación de la onda senoidal y la onda cuadrada introducidas.

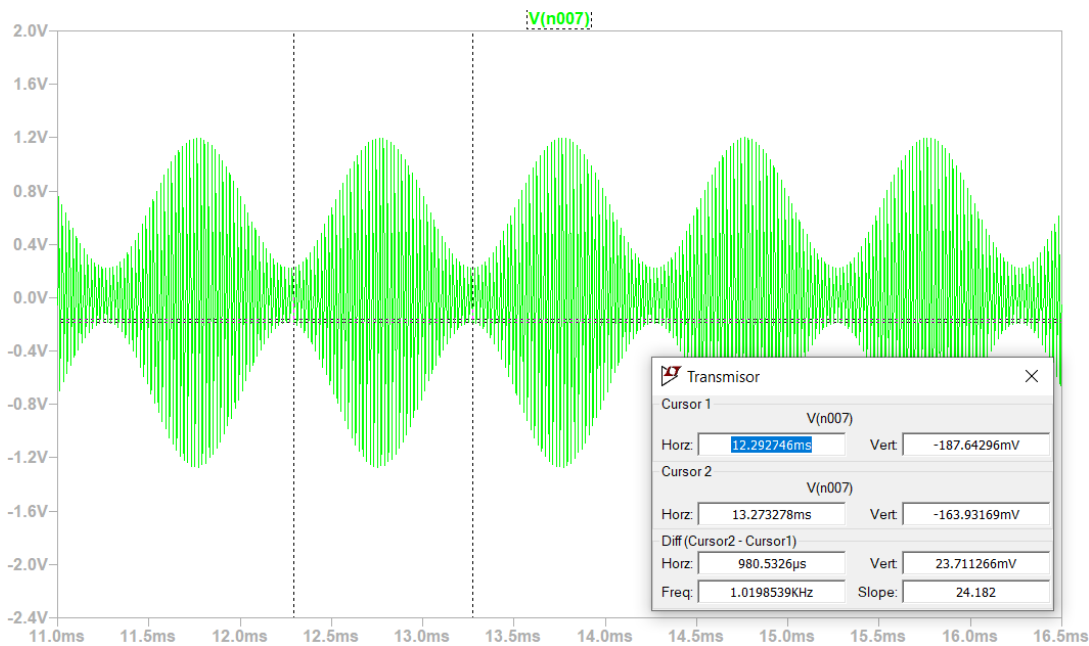


Figura 6.19. Onda de salida del circuito modulador.

En la Figura 6.19 se observa que la onda obtenida es de la misma forma que la esperada. Además, con los cursores se puede verificar que la **frecuencia** de la **onda moduladora** (1 kHz) corresponde con la frecuencia de la **envolvente** de la **onda modulada**. Para observar las oscilaciones de la onda portadora, se muestra con más detalle en la Figura 6.20.

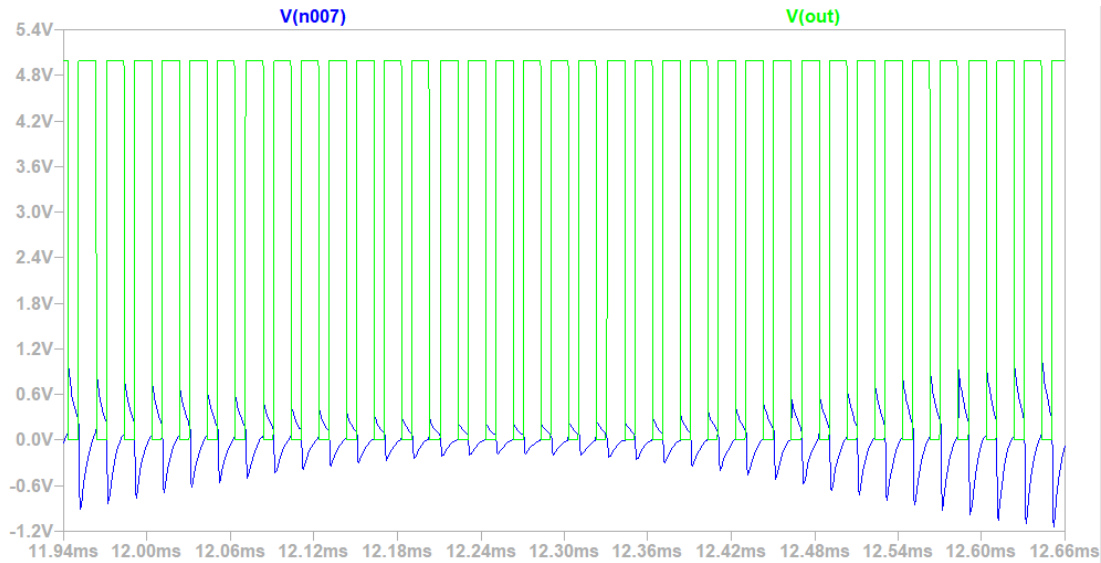


Figura 6.20. Onda portadora (verde) y onda en la salida del circuito modulador (azul).

En este caso, se puede observar como también los pulsos introducidos en la **onda portadora** corresponden con la frecuencia de la **onda modulada**. Así pues, se deduce que el circuito modulador implementado cumple su función correctamente.

6.5.3. Circuito transmisor

La salida del circuito modulador es introducida en la entrada del circuito transmisor. Este circuito se observa en la Figura 6.21.

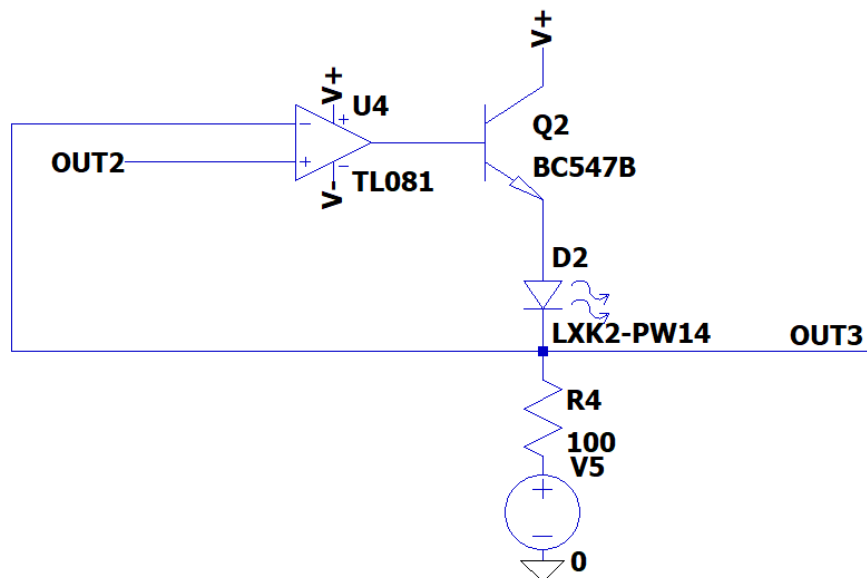


Figura 6.21. Circuito transmisor en LTSpice.

Como ya se ha comentado, para transmitir la onda, el diodo LED infrarrojo convierte la **corriente** en **luz infrarroja**. En consecuencia, el objetivo de esta parte del circuito era que la corriente que circulase por el diodo fuese **proporcional a la tensión** obtenida en el circuito anterior. Además, con el transistor, se conseguían **eliminar las tensiones negativas**, conservando solo la parte positiva de la onda. La corriente que circula por el diodo es la mostrada en la Figura 6.22 y Figura 6.23.

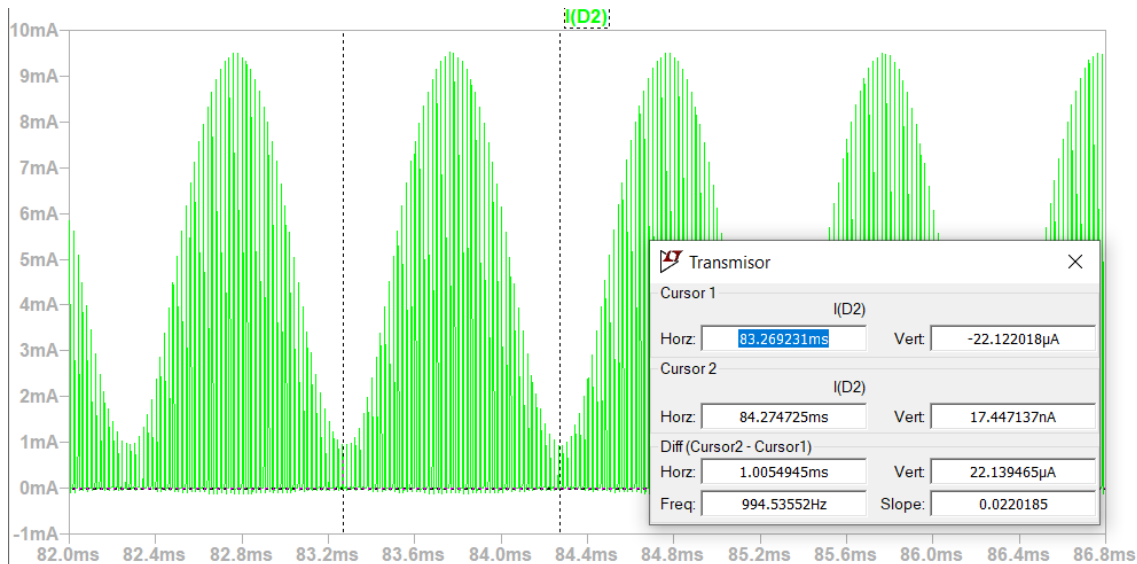


Figura 6.22. Onda de la corriente que circula a través del diodo LED infrarrojo.

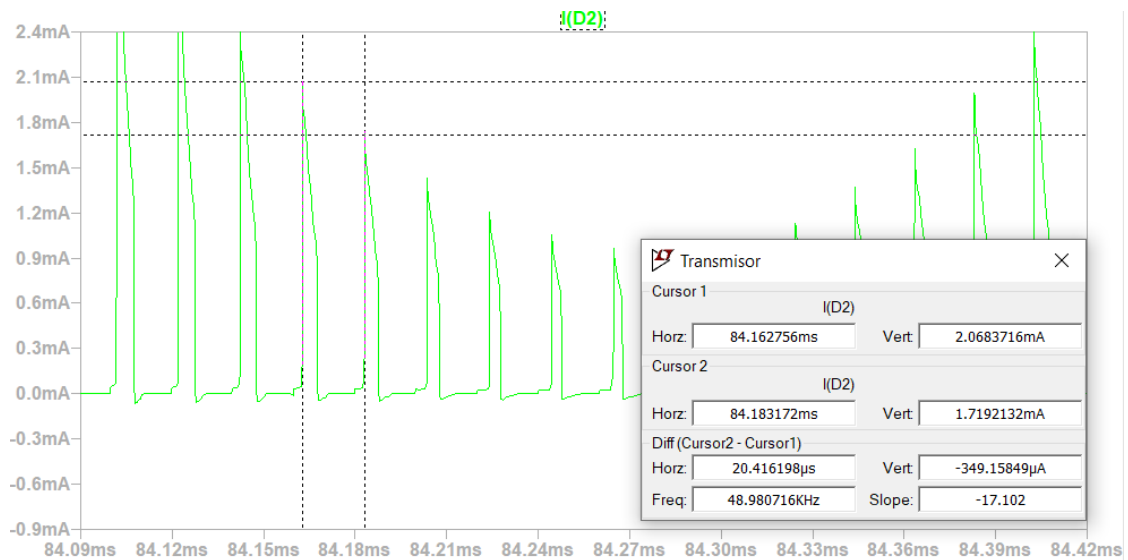


Figura 6.23. Onda de la corriente que circula a través del diodo LED infrarrojo.

En la Figura 6.22 se observa que la envolvente tiene la misma frecuencia que la onda moduladora y en la Figura 6.23 se comprueba que los pulsos internos coinciden con la frecuencia de la portadora. Por lo que este circuito también cumple con el objetivo previsto.

6.5.4. Filtro paso banda

Para terminar con la simulación del sistema, se realizará el análisis en frecuencia del filtro paso-banda estudiado. El circuito introducido se visualiza en la Figura 6.24.

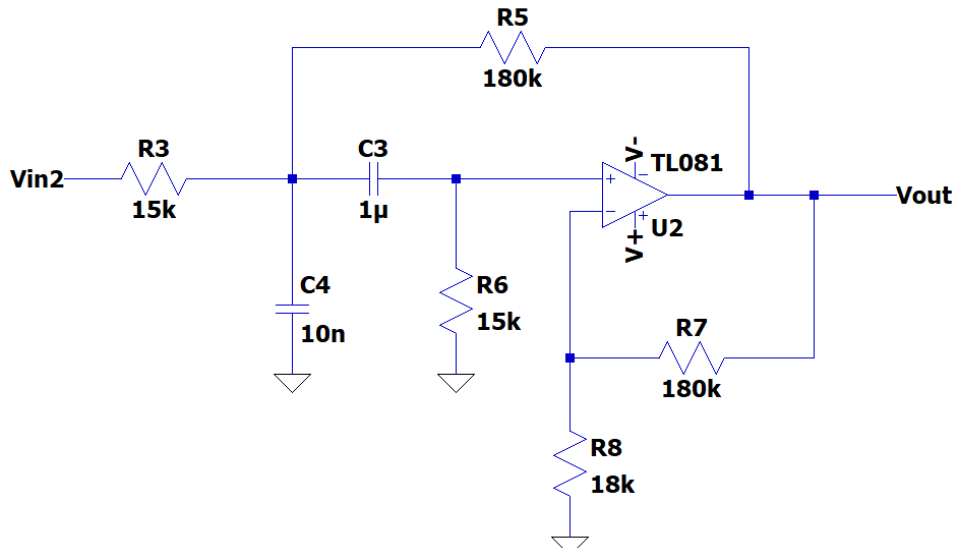


Figura 6.24. Circuito del filtro paso banda en LTSpice.

Los objetivos de este circuito eran conseguir una ganancia de 10 V/V ($20 \log(10) = 20 \text{dB}$) y un ancho de banda mayor de 0Hz y menor de 50 kHz que incluyese la frecuencia de la onda senoidal, 1 kHz. El **diagrama de Bode** del circuito estudiado se muestra en la Figura 6.25.

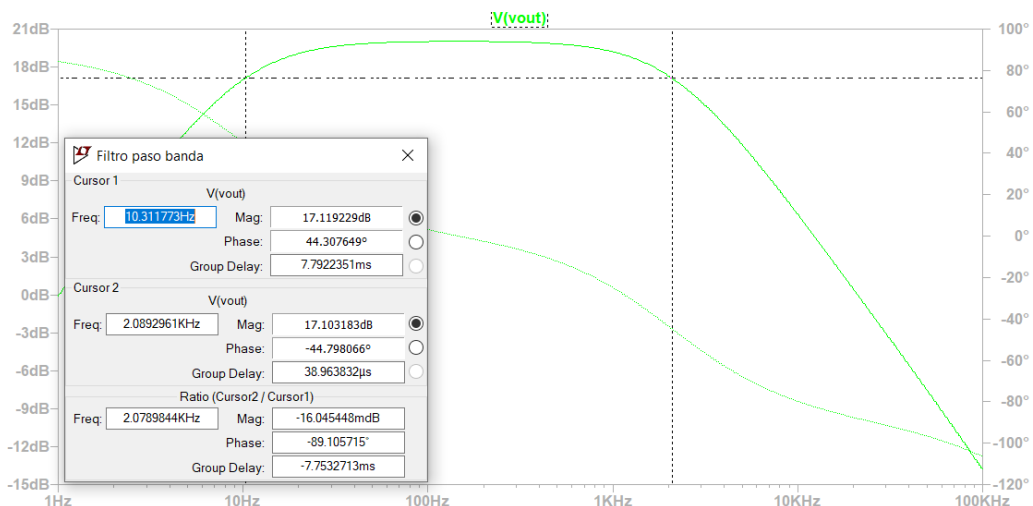


Figura 6.25. Análisis en frecuencia del filtro paso banda.

Se observa una forma típica de un filtro paso banda que alcanza 20 dB en su ancho de banda. Para comprobar que las **frecuencias de corte** fueran las calculadas, se comprobaron las frecuencias marcadas cuando la ganancia caía

3 dB. En la Figura 6.25 se observa en los cursores que la frecuencia de corte **inferior** es de **10,31 Hz** y la frecuencia de corte **superior** es de **2,079 kHz**, muy similares a las calculadas en el análisis teórico.

6.6. RESULTADOS

Para terminar con este proyecto, se montó cada circuito en el laboratorio. Al igual que en LTSpice, se analizó cada uno de ellos y se compararon sus salidas con las esperadas.

6.6.1. Generador de onda cuadrada

En primer lugar, se montó el generador de onda cuadrada con el integrado 555. El montaje se indica en la Figura 6.26 y la onda de salida del circuito en la Figura 6.27.

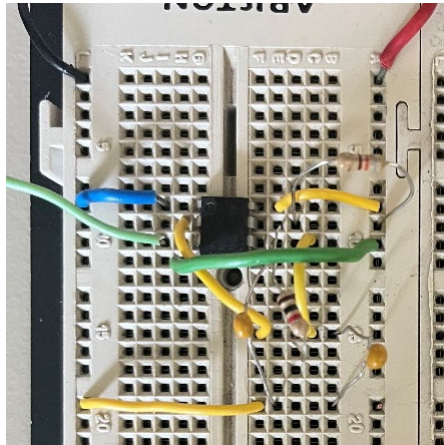


Figura 6.26. Montaje en el laboratorio del generador de onda cuadrada.

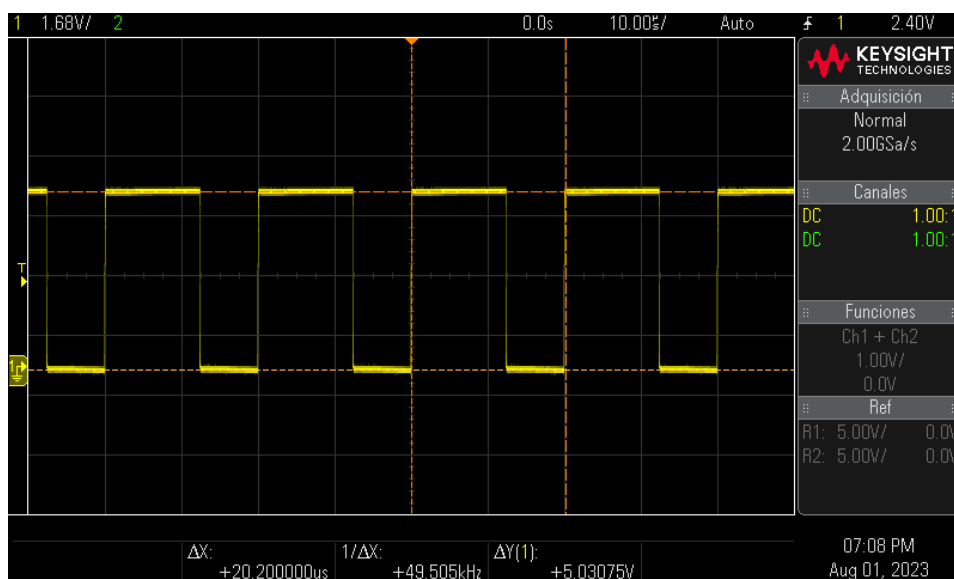


Figura 6.27. Onda de tensión en la salida en el oscilador de onda cuadrada.

Con los cursores se observa una tensión igual a la esperada (**5V**). Además, la frecuencia es de **49,505 kHz**, similar a la calculada en el apartado teórico (**51,06 kHz**). El ciclo de trabajo, por su parte, coincide con el de la simulación, siendo de **0,64** ($12,93\mu\text{s}/20,20\mu\text{s}$).

6.6.2. Circuito modulador

El segundo circuito que se montó en el laboratorio, fue el circuito modulador. Se muestra su montaje en la Figura 6.28 y su salida en la Figura 6.29 y Figura 6.30.

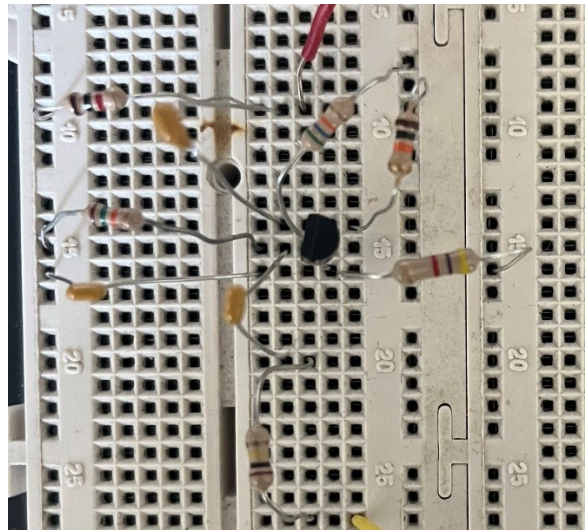


Figura 6.28. Montaje en el laboratorio del circuito modulador.

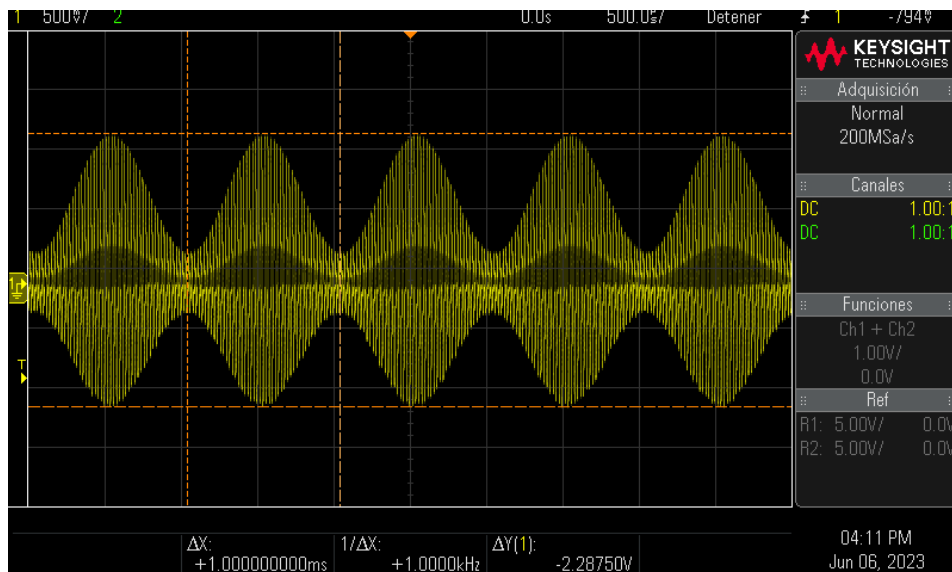


Figura 6.29. Onda de tensión en la salida del circuito modulador.

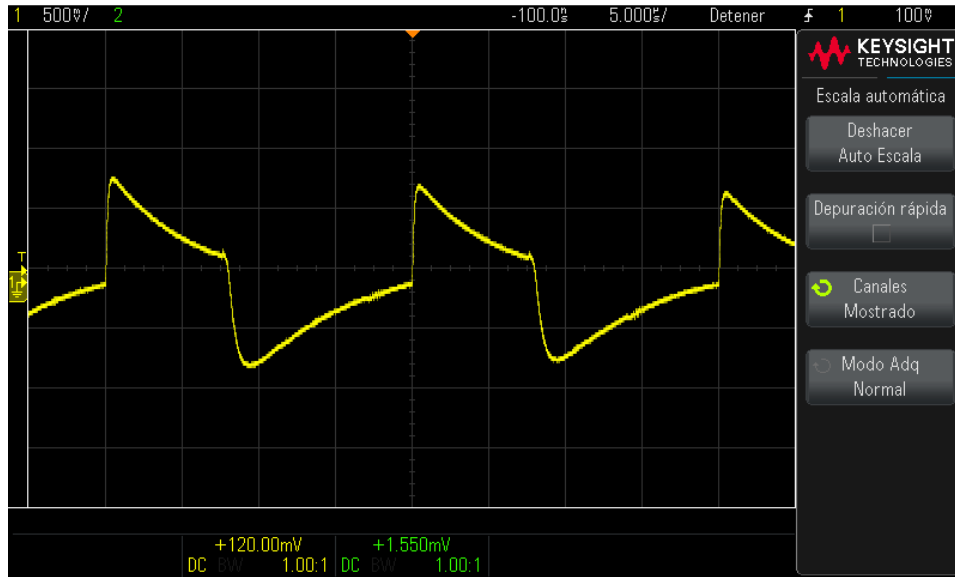


Figura 6.30. Onda de tensión de salida del circuito modulador.

En la Figura 6.29 se encuentra, tal y como se preveía, una onda modulada con una onda senoidal y una frecuencia de 1 kHz en su envolvente. Por otro lado, se observa en la Figura 6.30 la misma onda con más detalle. En este caso, se aprecian los pulsos y su forma, coincidiendo en frecuencia con la onda portadora introducida.

6.6.3. Circuito transmisor

Una vez modulada la onda, se montó el circuito transmisor, indicado en la Figura 6.31. En este caso, la onda de salida es la corriente que circula a través del diodo, que es la que se transformará en luz infrarroja. No obstante, como resulta más sencillo medir la tensión y en la salida del diodo será proporcional a la corriente, las medidas se tomarán sobre el voltaje en ese punto, que se muestra en la Figura 6.32.

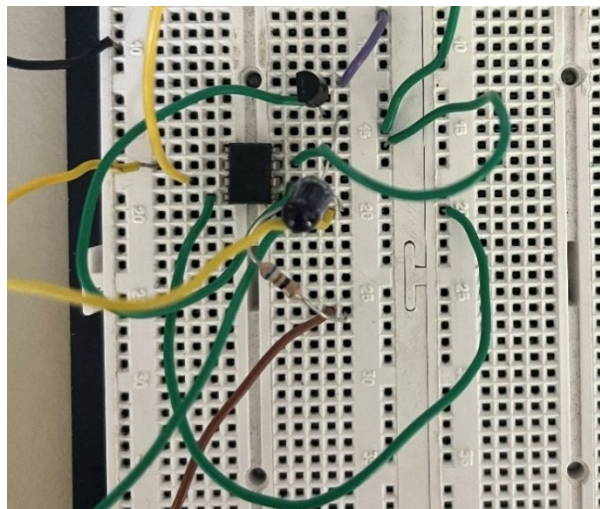


Figura 6.31. Montaje en el laboratorio del circuito transmisor

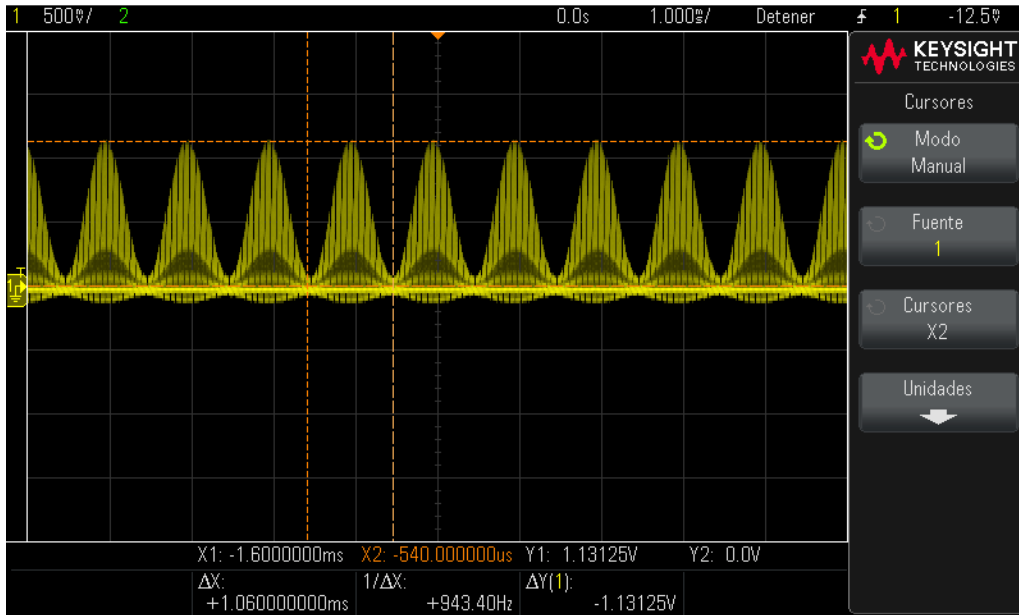


Figura 6.32. Onda de tensión en la salida del diodo.

En este circuito, además de conseguir una corriente proporcional a la tensión modulada, se buscaba eliminar las tensiones negativas. El resultado es el esperado: la onda modulada, con la misma frecuencia que la onda anterior, pero eliminando las componentes negativas.

6.6.4. Circuito receptor

El montaje del cuarto circuito es el más sencillo de todos. Se indica en la Figura 6.33. La onda de luz infrarroja transmitida debe salir a través del circuito transmisor y llegar al receptor. Por ello, para comprobar la transmisión, en la Figura 6.34 se comparan la onda de tensión medida en el circuito transmisor y la onda de salida del circuito receptor.

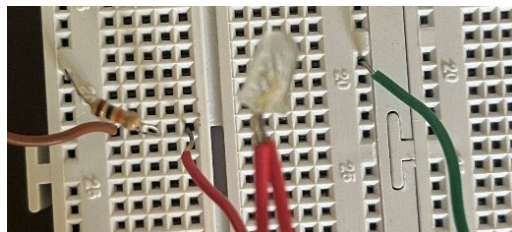


Figura 6.33. Montaje en el laboratorio del circuito receptor.

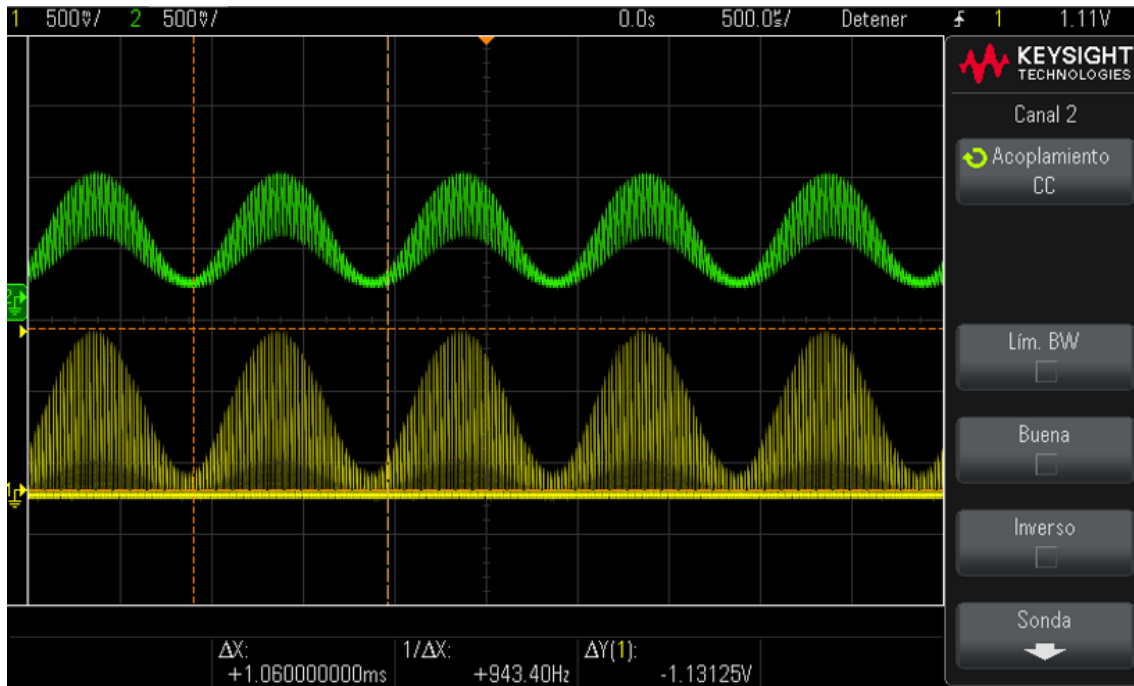


Figura 6.34. Onda de tensión en la salida del diodo (amarillo) y en el emisor del transistor (verde).

Se observa que la onda que llega al transistor es proporcional a la onda que sale del diodo. Además, esta señal se ve amplificada en el transistor.

6.6.5. Filtro paso banda

Como último paso, para recuperar la señal senoidal inicial y amplificarla, se montó el filtro activo de la Figura 6.35.

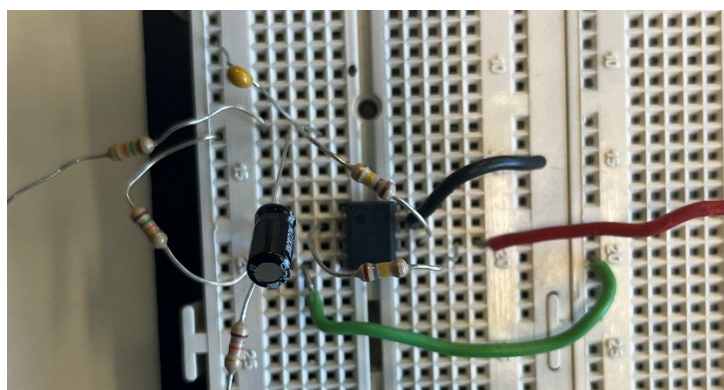


Figura 6.35. Montaje del filtro paso banda en el laboratorio.

Para analizar el comportamiento del filtro se realizó su análisis en frecuencia. El diagrama de Bode obtenido es el de la Figura 6.36.

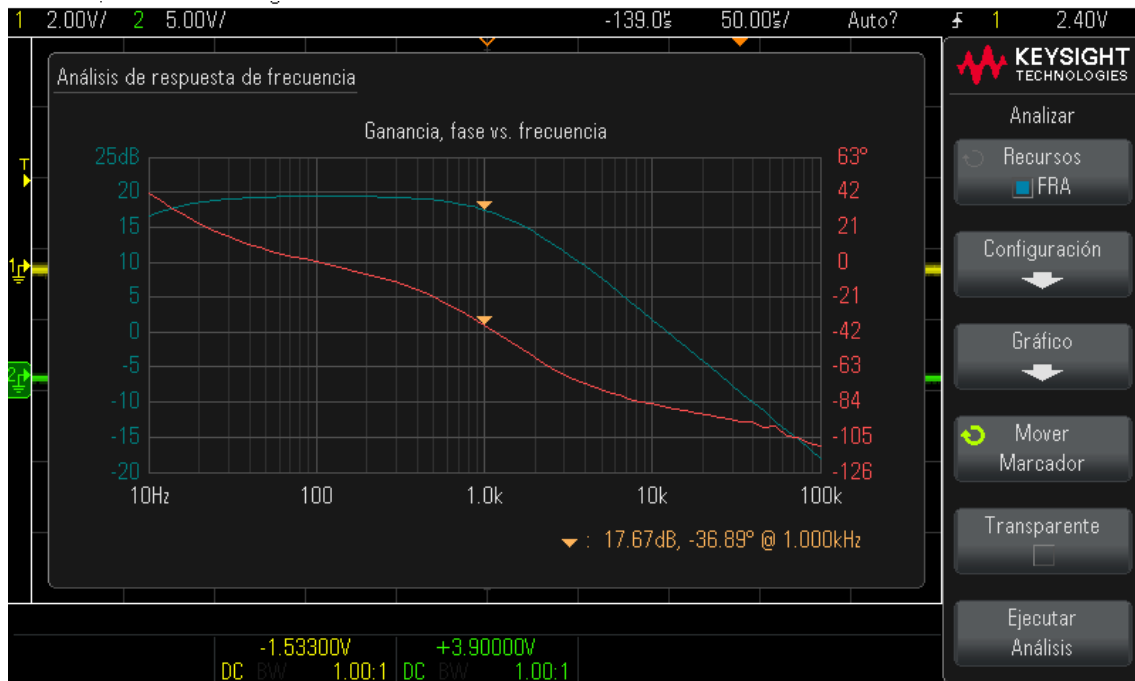


Figura 6.36. Análisis en frecuencia del filtro paso banda.

Se observa que la forma de la ganancia es la prevista en un filtro paso banda. Además, se comprobó con los cursores que en **1 kHz** la ganancia estuviese dentro del ancho de banda. Se obtuvo una ganancia de **17,67 dB**, por lo que sí se encontraba dentro. Por otro lado, se verificó la ganancia que se obtenía en la frecuencia de la onda portadora, **50 kHz**. La ganancia medida fue de **-10,93 dB**, por lo que las oscilaciones a esa frecuencia desaparecen de una forma notable al pasar por el filtro.

CAPÍTULO 7. COCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1. CONCLUSIONES

Este Trabajo de Fin de grado tenía **dos objetivos principales**. En primer lugar, realizar un estudio sobre la metodología que se sigue actualmente para impartir asignaturas relacionadas con la electrónica analógica, donde se han **analizado universidades** nacionales e internacionales. En segundo lugar, diseñar **tres propuestas** sencillas sobre electrónica analógica que pudiesen ser utilizadas para el **aprendizaje basado en proyectos**.

Tras completar el primer objetivo, se ha llegado a una conclusión clara: las universidades nacionales dan una **importancia mayor** a los **conceptos teóricos** que a la **realización de prácticas**. Sucedió lo contrario con el análisis de los planes de estudio en algunas de las universidades más prestigiosas en el mundo, lo que hace cuestionar si el modelo nacional es el correcto. A pesar de ser necesaria una base teórica, la cantidad de prácticas exigidas en España puede no ser suficiente para que los alumnos estén preparados para comenzar en el mundo laboral.

El aprendizaje basado en proyectos fomenta la creatividad, el pensamiento crítico y las habilidades de trabajo en equipo. Las **carencias** que la **falta de prácticas** puede ocasionar se han demostrado en **primera persona** durante el diseño y ejecución de los tres proyectos. En consecuencia, tras la realización de ellos, se han adquirido ciertas habilidades que no se habían potenciado a lo largo del grado universitario.

De forma general, cuando se ha realizado una práctica, los componentes han sido elegidos previamente por el profesor, por lo que el papel del alumno es el de analizar teóricamente el circuito, montarlo y observar lo que ocurre. Por lo tanto, en este proyecto ha supuesto **un reto novedoso** el fijar unos **objetivos previos** y **buscar después** los **circuitos** y **componentes necesarios** para cumplirlos.

Por otro lado, durante la **ejecución de los tres proyectos** se han encontrado **problemas** que no se pueden encontrar en una sesión teórica en el aula, como la aparición de ruido por la presencia de un cable defectuoso, el fallo de un circuito por un amplificador operacional dañado o la pérdida de un transistor por haber sobrepasado la corriente que podía soportar. La técnica para **detectar y solucionar estos fallos** se ha ido adquiriendo a lo largo del montaje de todos los circuitos.

En definitiva, tras la realización de este Trabajo de Fin de Grado, se ha podido comprobar en primera persona cómo el **aprendizaje basado en proyectos** es una metodología **eficaz** para la enseñanza de **electrónica analógica** en las **universidades**.

7.2. LÍNEAS FUTURAS

Para continuar con el estudio realizado durante este TFG, la siguiente fase podría ser la de evaluar **cómo se enfrentan los alumnos** a las tres **propuestas** presentadas. En este paso se seleccionaría a un grupo de estudiantes que hayan terminado recientemente los grados de **Ingeniería en Tecnologías Industriales, Ingeniería Electrónica o Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación** y se les proporcionarían los componentes suficientes para poder realizar los proyectos. Observando cómo montan cada uno de los circuitos, se podrían estudiar las **fortalezas y dificultades** generales con las que los **estudiantes terminan la universidad**. Este estudio puede resultar interesante para determinar qué áreas de la Electrónica Analógica se deben reforzar en la docencia y si es realmente **necesaria la introducción de más sesiones de prácticas**.

Por otro lado, sería interesante saber si las horas de prácticas **mejoran el aprendizaje** de los **conceptos teóricos**. Este factor se podría determinar realizando una prueba teórica sobre los temas trabajados en los proyectos antes y después de realizarlos. Comparando los resultados obtenidos en las pruebas previas y en las posteriores, se comprobaría si el **aprendizaje basado en proyectos** es una metodología que también hace mejorar a los alumnos **abordando situaciones sobre el papel**.

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "La historia del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP)". Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7760268>
- [2] "Estudios Oficiales de Grado". Universidad Politécnica de Madrid. https://www.upm.es/Estudiantes/Estudios_Titulaciones/EstudiosOficialesGrado
- [3] "Estudios de grado". UPV Universitat Politècnica de València. <https://www.upv.es/estudios/grado/index-es.html>
- [4] "Grados". UPC Universitat Politècnica de Catalunya. <https://www.upc.edu/es/grados>
- [5] "Grados". | Portal Universidad de Sevilla. <https://www.us.es/estudiar/que-estudiar/oferta-de-grados>
- [6] "Grados – Industriales". UPNA. <https://www.unavarra.es/sites/grados/industriales.html>
- [7] "Free Online Course Materials". MIT OpenCourseWare. https://ocw.mit.edu/search/?d=Electrical%20Engineering%20and%20Computer%20Science&s=department_course_numbers.sort_coursenum
- [8] "demo_05.pdf | Circuits and Electronics | Electrical Engineering and Computer Science". MIT OpenCourseWare. https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/demo_05/
- [9] "Undergraduate Programs | Electrical Engineering". Caltech <https://www.ee.caltech.edu/academics/ugrad>
- [10] "Course overview". CUED undergraduate teaching site. <http://teaching.eng.cam.ac.uk/node/339>
- [11] "Undergraduate Studies - Division of Electrical Engineering". University of Cambridge. <https://ee.eng.cam.ac.uk/index.php/undergraduate-studies/>
- [12] S. Franco: "Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits". McGraw Hill, 2002.
- [13] "TL081 Datasheet (PDF)". ALLDATASHEET. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/25383/STMICROELECTRONICS/TL081.html>.
- [14] "ISO 16:1975". ISO. <https://www.iso.org/standard/3601.html>
- [15] "Previo para micrófonos electret". Radio, electrónica, circuitos y montajes para el radioaficionado. <http://www.radioelectronica.es/radioaficionados/92-previo-para-microfonos-electret>
- [16] "LM3914N-1 pdf, LM3914N-1 Description, LM3914N-1 Datasheet, LM3914N-1". ALLDATASHEET. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/524103/T11/LM3914N-1.html>

[17] "NE555 Datasheet". ALLDATASHEET.

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17972/PHILIPS/NE555.html>

[18] "¿Cómo hacer un circuito modulador AM de amplitud?" FMUSER.

<https://es.fmuser.org/news/Radio/AM-Modulator-circuit.html>

[19] "555 Timer - Astable Multivibrator Configuration".

CircuitBread. <https://www.circuitbread.com/tutorials/555-timer-4-astable-multivibrator-configuration>

ANEXO. TABLA RESUMEN SOBRE LA SITUACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA EN LAS UNIVERSIDADES NACIONALES

UNIVERSIDAD	GRADO	ASIGNATURA	CARÁCTER	SEMESTRE	ECTS	h PRÁCTICAS	% NOTA FINAL	PROYECTO	% PROYECTO
Universidad politécnica de Madrid	Ingeniería en Tecnologías Industriales	Fundamentos de Electrónica	Obligatoria	5	4,5	8	15	NO	
		Electrónica Analógica	Optativa	7	4,5	15	15	NO	
	Ingeniería Electrónica Industrial y Automática	Electrónica	Obligatoria	4	4,5	6	10	NO	
		Electrónica Analógica	Optativa	5	7,5	12	15	NO	
		Instrumentación Electrónica	Optativa	6	4,5	3,5	20	NO	
		Sistemas electrónicos industriales	Optativa	7	7,5	10	15	NO	
	Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación	Electrónica I	Obligatoria	2	6	12	30	NO	
		Electrónica II	Obligatoria	3	6	11	30	NO	
		Electrónica Analógica	Obligatoria	4	6	8	15	NO	
Universidad Politécnica de Valencia	Ingeniería en Tecnologías Industriales	Sistemas Electrónicos	Obligatoria	5	4,5	9	20	NO	
	Ingeniería Electrónica Industrial y Automática	Electrónica Analógica	Obligatoria	4	7,5	17,5	20	SÍ	20
		Instrumentación Electrónica	Obligatoria	6	6	20	10	SÍ	15
	Ingeniería de Tecnología y Servicios de Telecomunicación	Dispositivos electrónicos	Obligatoria	2	6	12	20	NO	
		Circuitos electrónicos	Obligatoria	3	6	12	20	NO	
Universidad Politécnica de Cataluña	Ingeniería en Tecnologías Industriales	Electrónica	Obligatoria	5	4,5	14	10	SÍ	15
	Ingeniería Electrónica Industrial y Automática	Sistemas electrónicos	Obligatoria	4	6	15	20	NO	
		Electrónica analógica	Obligatoria	6	6	15	20	SÍ	20
		Electrónica para audio y vídeo	Optativa	7	6	15	20	SÍ	50
	Ingeniería Electrónica de Telecomunicación	Componentes y circuitos electrónicos	Obligatoria	1	6	13	10	NO	
		Dispositivos electrónicos	Obligatoria	3	6	13	10	NO	
		Circuitos analógicos	Obligatoria	4	6	26	40	NO	
Universidad de Sevilla	Ingeniería en Tecnologías Industriales	Electrónica general	Obligatoria	3	4,5	15	20	NO	
		Diseño de circuitos y sistemas electrónicos	Optativa	6	6	15	25	NO	
	Ingeniería Electrónica Industrial	Electrónica Analógica	Obligatoria	4	6	15	10	NO	
	Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación	Electrónica Básica	Obligatoria	3	6	15	20	NO	
		Diseño de circuitos y sistemas electrónicos	Optativa	6	6	30	30	NO	
Universidad Pública de Navarra	Ingeniería en Tecnologías Industriales	Fundamentos de electrónica	Obligatoria	4	6	14	10	SÍ	40
		Instrumentación	Optativa	6	6	15	15	SÍ	30
		Sistemas electrónicos analógicos	Optativa	7	3	9	20	NO	
	Ingeniería Eléctrica y Electrónica	Fundamentos de electrónica	Obligatoria	4	6	14	10	SÍ	40
		Laboratorio de instrumentación	Obligatoria	6	6	15	25	SÍ	25
	Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación	Fundamentos de electrónica	Obligatoria	2	6	15	25	NO	
		Circuitos electrónicos	Obligatoria	3	6	15	30	NO	