

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



Análisis, filtrado en tiempo real y transmisión
de datos mediante comunicación por luz visible
de células fotovoltaicas

TRABAJO FIN DE GRADO

Junio -2025

AUTOR: Cristian Martínez Sánchez

DIRECTOR: Pablo Corral González

Índice

I.	RESUMEN.....	5
II.	ABSTRACT	6
III.	ÍNDICE DE TABLAS	7
IV.	ÍNDICE DE FIGURAS	7
1.	INTRODUCCION.....	9
1.1	MOTIVACION.....	9
1.2	OBJETIVOS	9
1.3	ESTADO DEL ARTE	10
1.3.1	COMUNICACIONES LI-FI	10
1.3.2	TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS	10
1.3.3	MACHINE LEARNING.....	11
3.	MATERIALES Y METODOS	11
3.1	HARDWARE	11
3.1.1	ANALOG DISCOVERY.....	12
3.1.2	LED COMERCIAL.....	13
3.1.3	PORTAPLACAS	13
3.1.4	ARDUINO DUE.....	14
3.1.5	AMPLIFICADOR OPERACIONAL	14
3.2	SOFTWARE	15
3.2.1	WAVEFORMS	15
3.2.2	ARDUINO	16
3.3	METODOLOGIA.....	17
3.3.1	PROCESO DE TOMA DE MEDIDAS.....	17
3.3.2	TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS.....	18
4.	RESULTADOS DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES.....	19
4.1	COMPARACIÓN CÉLULAS THF, DMSO, DMF, MeOH y Pb SIN APLICAR FILTRADO	19
4.2	COMPARACIÓN ENTRE LAS MEJORES CÉLULAS	26
4.4	CONFIGURACIÓN Y ACTIVACIÓN DEL FILTRO DIGITAL.	30
4.5	AJUSTE DINÁMICO DEL RANGO VERTICAL (RANGE)	30
4.6	EXPORTACIÓN AUTOMÁTICA DE DATOS.....	31
4.7	LECTURA Y ANÁLISIS DEL VALOR PICO A PICO.....	32
4.8	ACTIVACIÓN CONDICIONAL DEL FILTRO	32
4.9	RESULTADOS TRAS APLICACIÓN DEL FILTRO	32
4.11	COMPARACIÓN DE RESULTADOS TOTALES DE LAS MEDIDAS VARIANDO LA FRECUENCIA.	41
5.	SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS MEDIANTE	3

MODULACIÓN OOK	42
5.1 TRANSMISIÓN DE DATOS CON ARDUINO DUE Y CÉLULA DMF	43
5.2 RECEPCIÓN DE DATOS CON ARDUINO DUE Y CÉLULA DMF	44
6. CONCLUSIÓN Y LINEAS FUTURAS.....	47
6.1 CONCLUSIÓN	47
6.2 LINEAS FUTURAS	48
7. BIBLIOGRAFÍA	48
8. ANEXOS	50
9. ANEXO 1: LED ALTA LUMINOSIDAD.....	60
10. ANEXO 2: AMPLIFICADOR OPERACIONAL	70



I. RESUMEN

Este trabajo se divide en dos fases principales. La primera fase consiste en el diseño, desarrollo y análisis de un sistema de comunicación por luz visible (VLC) basado en tecnología Li-Fi, utilizando como emisor un LED comercial y como receptor una célula fotovoltaica. El objetivo principal es implementar un filtrado en tiempo real que mejore la calidad de la señal recibida. Para ello, se llevó a cabo una evaluación del comportamiento de distintas células bajo diversas condiciones de frecuencia y distancia.

En concreto, se analizaron cinco células fotovoltaicas dopadas con diferentes disolventes orgánicos e inorgánico (DMF, DMSO, THF, MeOH y Pb), seleccionando finalmente la célula dopada con DMF, debido a su mejor rendimiento en términos de amplitud y estabilidad. Las pruebas se realizaron con el osciloscopio Analog Discovery 2, controlado mediante el software WaveForms, el cual modifiqué un script para incluir un sistema automatizado de control de medidas con la capacidad de aplicar filtrado digital en tiempo real. Este sistema permite seleccionar entre distintos tipos de filtros según las condiciones del experimento; en nuestro caso, se utilizó un filtro Butterworth de segundo orden, paso bajo, con una frecuencia de corte de 1 MHz. Esta funcionalidad permitió visualizar en tiempo real el efecto del filtro sobre la señal dentro del propio osciloscopio, y además ofrecía la posibilidad de exportar automáticamente los datos medidos. Para la toma de medidas en función de la distancia, se utilizó un portaplacas fabricado en impresión 3D, el cual incluye un sistema métrico desplazable centímetro a centímetro, facilitando la recolección precisa de los datos a distintas distancias entre el emisor y el receptor.

En la segunda fase del trabajo, se llevó a cabo la transmisión real de datos codificados en ASCII. Para ello, se utilizó una placa Arduino Due en el lado del transmisor, encargada de generar tanto el preámbulo como los datos mediante modulación OOK. En el receptor, se empleó otra placa Arduino Due, a la cual se conectó un amplificador operacional LM741CN configurado en modo no inversor. Este amplificador permitió aumentar la señal captada por la célula, asegurando su correcta detección y decodificación. Gracias a este enfoque, fue posible transmitir información de forma estable y precisa, demostrando la viabilidad del uso de células fotovoltaicas orgánicas en sistemas Li-Fi de bajo coste, abriendo la puerta a futuras aplicaciones en entornos donde se requiere comunicación inalámbrica sin el uso de radiofrecuencia.

II. ABSTRACT

This work is divided into two main phases. The first phase consists of the design, development and analysis of a visible light communication (VLC) system based on Li-Fi technology, using a commercial LED as emitter and an photovoltaic cell as receiver. The main objective is to implement a real-time filtering that improves the quality of the received signal. For this purpose, an evaluation of the behavior of different cells under different frequency and distance conditions was carried out.

Specifically, five photovoltaic cells doped with different organic and inorganic solvents (DMF, DMSO, THF, MeOH and Pb) were tested, finally selecting the cell doped with DMF, due to its better performance in terms of amplitude and stability. The tests were performed with the Analog Discovery 2 oscilloscope, controlled by WaveForms software, which modified a script to include an automated measurement control system with the ability to apply digital filtering in real time. This system allows selecting between different types of filters according to the conditions of the experiment; in our case, a second order Butterworth filter, low pass, with a cut-off frequency of 1 MHz was used. This functionality allowed real-time visualization of the effect of the filter on the signal within the oscilloscope itself, and also offered the possibility of automatically exporting the measured data. For taking measurements as a function of distance, a plate holder made in 3D printing was used, which includes a metric system that can be moved centimeter by centimeter, facilitating the accurate collection of data at different distances between the transmitter and the receiver.

In the second phase of the work, the actual transmission of ASCII encoded data was carried out. For this purpose, an Arduino Due board was used on the transmitter side, in charge of generating both the preamble and the data through OOK modulation. At the receiver, another Arduino Due board was used, to which an LM741CN operational amplifier configured in non-inverting mode was connected. Thanks to this approach, it was possible to transmit information in a stable and accurate way, demonstrating the feasibility of using organic photovoltaic cells in low-cost Li-Fi systems, opening the door to future applications in environments where wireless communication is required without the use of radio frequency.

III. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las células orgánicas e inorgánica	20
Tabla 2. Células DMF	23
Tabla 3. Células DMSO.....	24
Tabla 4. Células THF.....	24
Tabla 5. Células MeOH.....	25
Tabla 6. Células Pb.....	26
Tabla 7. Comparación mejores células.....	26

IV. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Analog Discovery 2.....	12
Figura 2. Esquema de la distribución de pines	12
Figura 3. LED comercial	13
Figura 4. Portaplacas con célula orgánica fotovoltaica	13
Figura 5. Arduino Due.....	14
Figura 6. Amplificador operacional LM741CN.....	14
Figura 7. Interfaz de Waveforms.....	16
Figura 8. Interfaz de Arduino	16
Figura 9. Esquema del montaje eléctrico para toma de medidas.....	17
Figura 10. Esquema del montaje eléctrico para transmisión de datos.....	18
Figura 11. Esquema del montaje eléctrico para recepción de datos.....	19
Figura 12. Placas DMF	20
Figura 13. Placas DMSO	21
Figura 14. Placas THF	21
Figura 15. Placas MeOH	22
Figura 16. Placas Pb	22
Figura 17. Osciloscopio midiendo a 1 kHz a una distancia de 0 cm sin filtrado.....	27
Figura 18. Osciloscopio midiendo a 50 kHz a una distancia de 0 cm sin filtrado.....	28
Figura 19. Osciloscopio midiendo a 1000 kHz a una distancia de 0 cm sin filtrado.....	28
Figura 20. Osciloscopio midiendo a 50 kHz a una distancia de 4 cm	29
Figura 21. Osciloscopio midiendo a 50 kHz a una distancia de 2 cm	30
Figura 22. Histograma a 0 cm con frecuencia 50 kHz	33
Figura 23. Histograma a 5 cm con frecuencia 50 kHz	33
Figura 24. Histograma a 10 cm con frecuencia 50 kHz	33

Figura 25. Histograma a 15 cm con frecuencia 50 kHz	33
Figura 26. Histograma a 20 cm con frecuencia 50 kHz	33
Figura 27. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 1 kHz	34
Figura 28. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 2 kHz	35
Figura 29. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 5 kHz	35
Figura 30. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 10 kHz	36
Figura 31. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 20 kHz	36
Figura 32. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 50 kHz	37
Figura 33. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 100 kHz	37
Figura 34. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 200 kHz	38
Figura 35. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 500 kHz	38
Figura 36. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 1 MHz.....	39
Figura 37. Comparación de medidas de Voltaje frente a distancia	40
Figura 38. Zoom de la comparación de medidas de Voltaje frente a distancia	40
Figura 39. Comparación de medidas de Voltaje frente a frecuencia.....	41
Figura 40. Zoom de la comparación de medidas de Voltaje frente a frecuencia.....	42
Figura 41. Amplificador no inversor	42
Figura 42. Captura de transmisión de texto en osciloscopio	43
Figura 43. Transmisión de texto en Arduino	46
Figura 44. Recepción de texto en Arduino	46

1. INTRODUCCION

1.1 MOTIVACION

La comunicación por luz visible (VLC) es un método de comunicación óptica inalámbrica que transmite datos a través del medio de la luz dentro del espectro de luz visible. Una de sus aplicaciones más destacadas es el Li-Fi (Light Fidelity), una tecnología que permite la comunicación bidireccional utilizando la iluminación LED como canal de datos. Esta técnica aprovecha la capacidad de los LED para modular su intensidad a frecuencias muy altas, lo que permite enviar información sin interferir con la función principal de iluminación.

A diferencia de las tecnologías basadas en radiofrecuencia, como el Wi-Fi, el Li-Fi proporciona mayor seguridad, ya que la luz no atraviesa paredes, lo que limita el acceso a la información al espacio iluminado. Además, ofrece ventajas en cuanto a ancho de banda, eficiencia energética y disponibilidad, especialmente en entornos donde las señales de radio pueden causar interferencias o estar restringidas, como hospitales o aviones. Por estas razones, el Li-Fi se presenta como una solución complementaria de alto rendimiento para las comunicaciones inalámbricas de corto alcance.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es abordar el problema de la introducción de ruido en la señal que se produce al aumentar la frecuencia y la distancia durante la transmisión mediante células fotovoltaicas orgánicas e inorgánicas en sistemas de comunicación Li-Fi, integrando un sistema de filtrado de señal en tiempo real para solucionarlo. Para ello, se llevarán a cabo mediciones y análisis comparativos entre diferentes tipos de células, evaluando su desempeño en función de la frecuencia y la distancia. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionará la célula con mejor rendimiento. Posteriormente, se implementará un sistema de filtrado en tiempo real mediante el uso de la herramienta WaveForms, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema en distintas condiciones operativas. Finalmente, se desarrollará un sistema de transmisión y recepción de señales utilizando modulación OOK (On-Off Keying), que permitirá transmitir información a través de las células fotovoltaicas orgánicas.

Este trabajo no solo pretende demostrar la viabilidad del uso de células fotovoltaicas orgánicas e inorgánicas en aplicaciones de comunicación, sino también aportar al desarrollo de sistemas Li-Fi más eficientes y versátiles, integrando tecnologías avanzadas de análisis de datos para optimizar su rendimiento en entornos reales.

13 ESTADO DEL ARTE

1.3.1 COMUNICACIONES LI-FI

Li-Fi (Light Fidelity) es una tecnología de comunicación inalámbrica que utiliza la luz visible, infrarroja o ultravioleta para la transmisión de datos. Esta innovación se posiciona como una alternativa complementaria al Wi-Fi, aprovechando el espectro de luz, que es 10,000 veces más amplio que el espectro de radiofrecuencia usado por tecnologías inalámbricas convencionales. La principal ventaja de Li-Fi radica en su alta velocidad de transmisión, baja latencia, y en su potencial para descongestionar el saturado espectro de radio. [1]

El funcionamiento de Li-Fi se basa en la modulación de la intensidad de fuentes de luz. Estos pulsos de luz son detectados por fotodiodos en los dispositivos receptores, convirtiendo la señal luminosa en información digital. Debido a que la luz no puede atravesar paredes, Li-Fi proporciona un mayor nivel de seguridad, evitando interferencias y accesos no deseados desde otras habitaciones, a diferencia del Wi-Fi. [1]

Puede utilizarse simultáneamente con la iluminación LED convencional sin necesidad de infraestructura adicional. Esto la convierte en una solución viable para entornos como hospitales, aviones, oficinas, o lugares donde las ondas de radiofrecuencia pueden ser problemáticas o peligrosas [2]. Además, su capacidad para integrarse fácilmente en infraestructuras existentes permite que sea una opción rentable, escalable y sostenible para el despliegue de redes de comunicación avanzadas.

El concepto de Li-Fi fue propuesto inicialmente por el profesor Harald Haas en 2011, quien demostró que una bombilla LED podía transmitir video en alta definición. Desde entonces, el desarrollo de esta tecnología ha despertado gran interés académico e industrial, destacando por su capacidad de transmisión de datos a velocidades superiores a 10 Gbps en condiciones óptimas [3]. Esta demostración marcó el inicio de una nueva era en las comunicaciones ópticas, posicionando a Li-Fi como una tecnología prometedora para aplicaciones de alta velocidad y seguridad en entornos cada vez más conectados.

Las aplicaciones existentes y emergentes de redes inalámbricas requieren altas velocidades de datos para múltiples usuarios, seguridad de transmisión, conexión ininterrumpida y una reducción del rendimiento en despliegues densos. Para habilitar las LC en redes Wi-Fi, el Grupo de Trabajo IEEE 802.11 ha lanzado un nuevo estándar, el 802.11bb [4]. Este nuevo estándar representa un gran avance hacia la integración comercial de la comunicación por luz visible, al establecer un marco técnico común que facilita la interoperabilidad entre dispositivos Li-Fi y Wi-Fi.

1.3.2 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS

Para la realización de las siguientes mediciones, se emplearán células fotovoltaicas orgánicas e inorgánicas desarrolladas en la Universidad Miguel Hernández de Elche. Estas células han sido diseñadas con el propósito de impulsar el uso de tecnologías orientadas a las energías renovables, favoreciendo así una transición progresiva hacia fuentes energéticas más limpias y sostenibles.

En la actualidad, el creciente consumo de silicio plantea un posible escenario de escasez, lo cual podría provocar un aumento considerable en los costes de producción debido al desajuste entre oferta y demanda. Además, la extracción y procesamiento del silicio conlleva un elevado consumo energético y de recursos naturales.

Ante este panorama, las células solares orgánicas surgen como una alternativa viable y ecológica. Su principal ventaja radica en el uso de disolventes orgánicos dopantes, que optimizan la conductividad de la capa de transporte de huecos. En este estudio se analizarán cuatro tipos de células orgánicas y una inorgánica, cada una dopada con un disolvente distinto: dimetilformamida (DMF), tetrahidrofurano (THF), dimetilsulfóxido (DMSO), metanol (MeOH) y plomo (Pb).

1.3.3 MACHINE LEARNING

Machine Learning es un área de la inteligencia artificial que engloba un conjunto de técnicas que hacen posible el aprendizaje automático a través del entrenamiento con grandes volúmenes de datos. Hoy en día existen diferentes modelos que utilizan esta técnica y consiguen una precisión incluso superior a la de los humanos en las mismas tareas, por ejemplo, en el reconocimiento de objetos en una imagen [5].

En el desarrollo de este trabajo se ha recurrido al uso de inteligencia artificial (IA) como herramienta de apoyo para la predicción de datos experimentales. Esta decisión se tomó debido a que algunas de las células fotovoltaicas orgánicas e inorgánicas presentaron fallos que imposibilitaron la obtención de mediciones fiables o directamente impedían cualquier tipo de medición.

Concretamente, las células afectadas fueron la célula 3 correspondiente a la disolución en DMF y la célula 4 correspondiente a la disolución de Pb.

Ambas células presentaban un estado de deterioro debido al paso del tiempo, lo que afectó a su integridad funcional y las volvió inoperativas en el entorno experimental. Para no comprometer la coherencia del estudio y poder continuar con el análisis comparativo, se implementaron modelos basados en inteligencia artificial que permitieron estimar el comportamiento esperado de estas células a partir de los datos disponibles de las restantes.

Esta metodología permitió mantener la integridad del análisis global y completar el estudio sin necesidad de descartar información relevante.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 HARDWARE

En cuanto al hardware empleado, se han utilizado diversos dispositivos electrónicos que han permitido implementar y analizar el sistema de comunicación desarrollado.

3.1.1 ANALOG DISCOVERY

El Digilent Analog Discovery 2, desarrollado en colaboración con Analog Devices, es un instrumento multifunción compacto que permite medir, visualizar, generar, registrar y controlar circuitos de señales mixtas. A pesar de su reducido tamaño, este dispositivo ofrece un alto rendimiento que lo convierte en una alternativa versátil y económica frente a varios equipos de laboratorio convencionales. [6]



Figura 1. Analog Discovery 2.

Tal como se muestra en la figura anterior, en la parte frontal del dispositivo se encuentran diversas entradas y salidas. Estas conexiones están representadas de forma esquemática en la siguiente imagen, lo que permite identificar con claridad las funciones asignadas a cada uno de los pines del Analog Discovery 2.

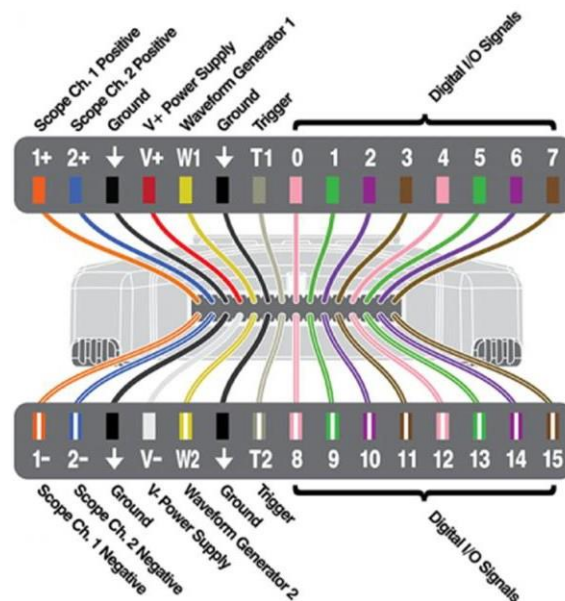


Figura 2. Esquema de la distribución de pines.

3.1.2 LED COMERCIAL

Como elemento transmisor se empleó un LED comercial blanco de 5 mm de alta luminosidad, con un voltaje de funcionamiento 3,2 V y una corriente nominal de 20 mA. La elección de este componente se debe a su bajo coste, fácil disponibilidad y buen rendimiento en este tipo de aplicaciones.



Figura 3. LED comercial.

Para más detalles técnicos sobre el componente utilizado, se incluye su datasheet en el anexo.

3.1.3 PORTAPLACAS

Para la realización de las mediciones, se utilizó un portaplacas fabricado mediante impresión 3D, diseñado específicamente para este tipo de ensayos. El sistema cuenta con una guía métrica ajustable, también impresa en 3D, que permite modificar con precisión la distancia entre el emisor y el receptor según las necesidades de cada prueba.

En el interior del portaplacas se coloca la célula fotovoltaica orgánica, compuesta por seis celdas individuales de 6 mm² cada una, con dimensiones de 1,5 mm × 4 mm. Estas celdas están numeradas de arriba abajo y de derecha a izquierda, facilitando su identificación durante los experimentos.

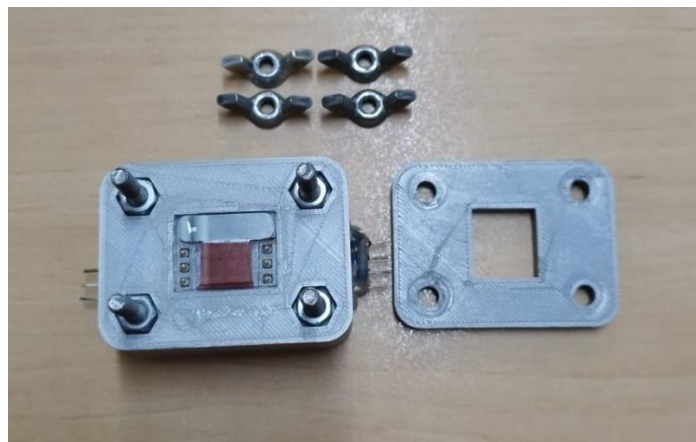


Figura 4. Portaplacas con célula orgánica fotovoltaica

3.1.4 ARDUINO DUE

Arduino Due es una placa de microcontrolador basada en la CPU Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 . Es la primera placa Arduino basada en un microcontrolador con núcleo ARM de 32 bits. Cuenta con 54 pines de entrada/salida digitales (de los cuales 12 se pueden usar como salidas PWM), 12 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un reloj de 84 MHz, una conexión USB OTG, 2 DAC (convertidores de digital a analógico), 2 TWI, un conector de alimentación, un conector SPI, un conector JTAG, un botón de reinicio y un botón de borrado [7]. Para el control tanto del elemento emisor como del receptor, se ha optado por el uso de dos placas Arduino Due. Esta elección se debe a la capacidad de procesamiento de dichas placas y a su compatibilidad con las necesidades del sistema, permitiendo una gestión eficiente de la generación y recepción de señales.

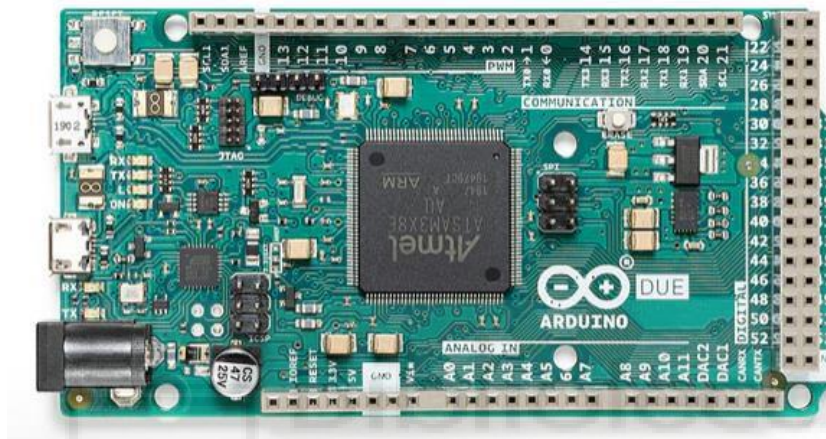


Figura 5. Arduino Due.

3.1.5 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

El LM741 es un circuito integrado (CI) de 8 pines también conocido como op-amp por sus siglas en inglés (operational amplifier). Estos amplificadores cuentan con numerosas funciones que hacen que su aplicación sea prácticamente infalible protección contra sobrecarga en entrada y salida, ausencia de enclavamiento cuando se excede el rango de modo común y libre de oscilaciones [8]. En este trabajo, se utilizará el componente para amplificar la señal recibida por el LED comercial en recepción, con el objetivo de mejorar la detección de la señal transmitida. Esta amplificación es fundamental para compensar la baja intensidad de la señal recibida y garantizar una lectura adecuada en el sistema de medición.

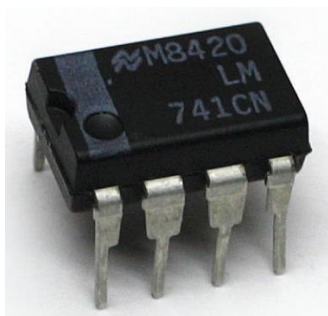


Figura 6. Amplificador operacional LM741CN.

En cuanto al software utilizado, el desarrollo del sistema de comunicación se ha apoyado principalmente en WaveForms y el entorno de programación de Arduino. Estas herramientas han permitido configurar y controlar los dispositivos de medida, así como gestionar la transmisión y recepción de señales, facilitando tanto el análisis en tiempo real como la automatización de ciertos procesos experimentales.

3.2.1 WAVEFORMS

WaveForms proporciona una interfaz intuitiva que permite al usuario interactuar con dispositivos de prueba y medición de Digilent, como el Analog Discovery 2. Aunque la aplicación incluye una completa interfaz gráfica, también ofrece un SDK con API pública, lo que permite desarrollar aplicaciones personalizadas para PC [9].

El uso de WaveForms ha sido clave en este proyecto, ya que permite un control preciso del sistema emisor, ajustando parámetros fundamentales como la frecuencia de la señal, el offset y la distancia experimental. Asimismo, la herramienta ofrece funcionalidades avanzadas que han sido aprovechadas para generar y aplicar un filtro digital a la señal en tiempo real, optimizando su calidad antes del análisis. Todo ello, junto con la posibilidad de guardar automáticamente los datos obtenidos, ha permitido llevar a cabo una caracterización completa y eficiente del sistema.

En la figura 7 observamos del entorno del software, utilizaremos cuatro ventanas principales que han sido fundamentales para el desarrollo del proyecto. En primer lugar, el generador de ondas, que permite configurar parámetros como la frecuencia y el voltaje de la señal que se inyectará en el sistema. En segundo lugar, el osciloscopio, herramienta clave para la visualización en tiempo real del comportamiento de los distintos canales: el canal 1 (emisor), canal 2 (receptor) y el canal matemático, donde se aplica el filtro.

La tercera ventana corresponde al editor de scripts, que representa el núcleo del sistema, ya que desde allí se programa y automatiza el funcionamiento global del experimento. A través de este script se controla tanto el generador como el osciloscopio, además de gestionar la exportación de datos y la aplicación de filtros.

Finalmente, se encuentra la fuente de alimentación, utilizada para alimentar el amplificador operacional con los voltajes necesarios para su funcionamiento, concretamente +5 V y -5 V. Esta configuración garantiza una operación estable y simétrica del circuito de amplificación.

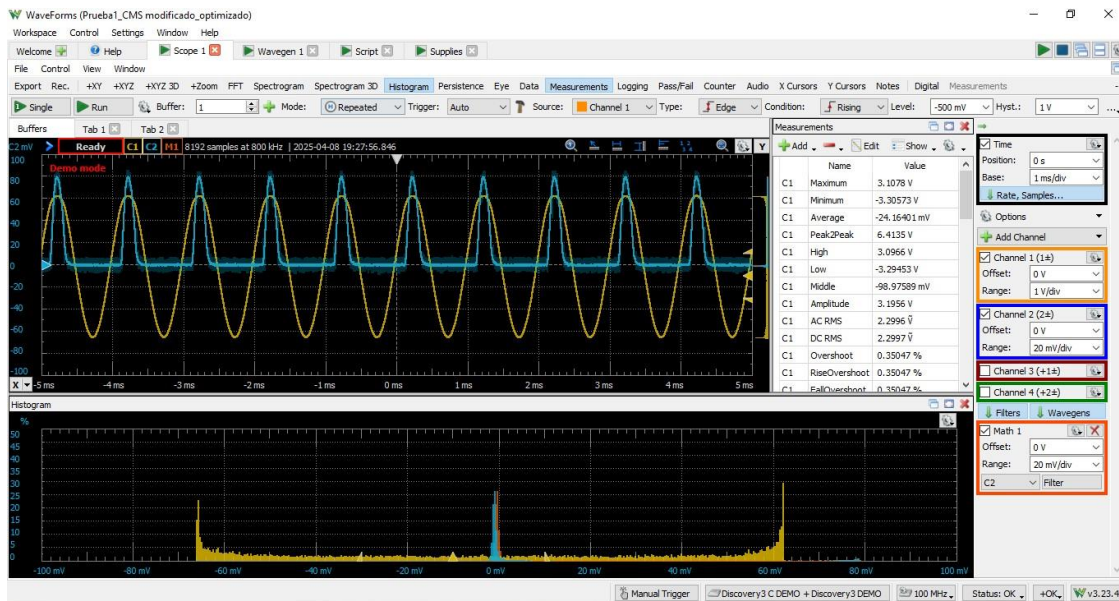


Figura 7. Interfaz de Waveforms.

3.2.2 ARDUINO

Para empezar a programar la placa Arduino es necesario descargar un IDE (Integrated Development Environment). El IDE es un conjunto de herramientas de software que permiten a los programadores desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que nuestro Arduino funcione como queramos. El IDE de Arduino nos permite escribir, depurar, editar y grabar nuestro programa (llamados «sketches» en el mundo Arduino) de una manera sumamente sencilla, en gran parte a esto se debe el éxito de Arduino, a su accesibilidad [10]. En este proyecto se ha utilizado el entorno de desarrollo Arduino IDE, el cual permite programar y cargar el código en las placas Arduino Due utilizadas. Gracias a su simplicidad y compatibilidad, ha sido fundamental para controlar tanto el emisor como el receptor del sistema, facilitando la comunicación entre hardware y software.

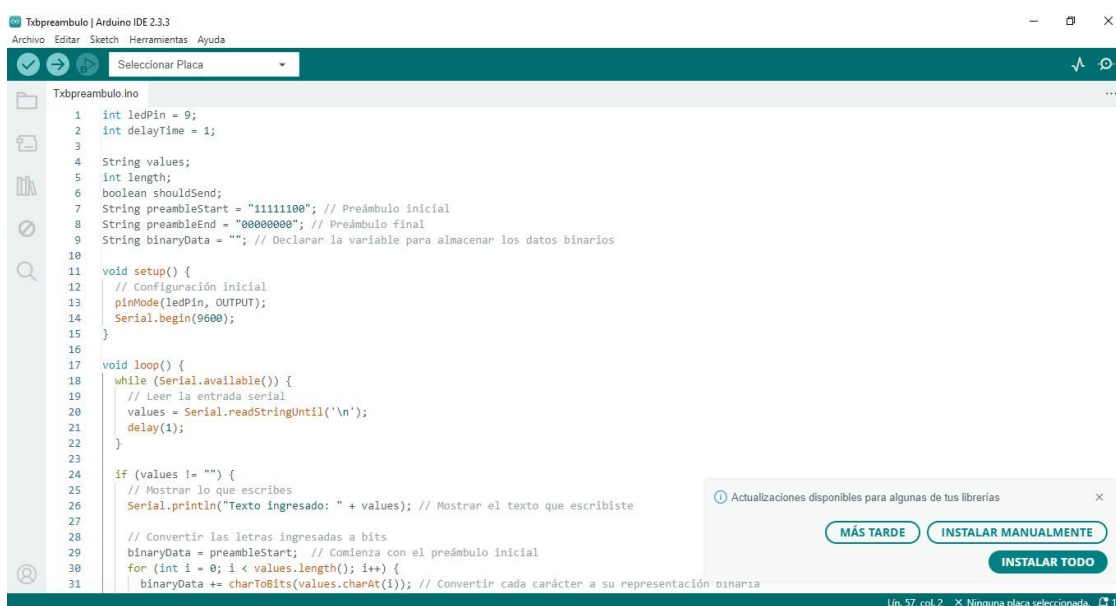


Figura 8. Interfaz de Arduino.

3.3.1 PROCESO DE TOMA DE MEDIDAS

Para la realización de las distintas mediciones, se ha diseñado un montaje experimental compuesto por dos bloques principales: el sistema de emisión y el sistema de recepción.

En el sistema emisor, se utiliza un LED comercial de 5 mm encargado de generar la señal óptica. Este LED es alimentado mediante el generador de señales W1 integrado en el osciloscopio Analog Discovery 2 (AD2), conectando el terminal positivo del generador a uno de los pines del LED, mientras que el otro terminal del LED se conecta directamente a masa (GND).

El sistema receptor está formado por una célula fotovoltaica orgánica o inorgánica, compuesta por un cátodo común y seis ánodos individuales. En cada medición, se selecciona el ánodo correspondiente en función de la célula a analizar. La salida de la célula se conecta a una resistencia de $1\text{ k}\Omega$, con el objetivo de normalizar la amplitud de la señal obtenida. Esta resistencia queda en serie entre el ánodo y el cátodo común de la célula. La señal resultante es captada por el canal 2 del osciloscopio, el cual, gracias a su resistencia interna de $1\text{ M}\Omega$, asegura que la corriente fluya correctamente hacia el sistema de adquisición.

La conexión de los canales del osciloscopio se puede observar de la siguiente manera:

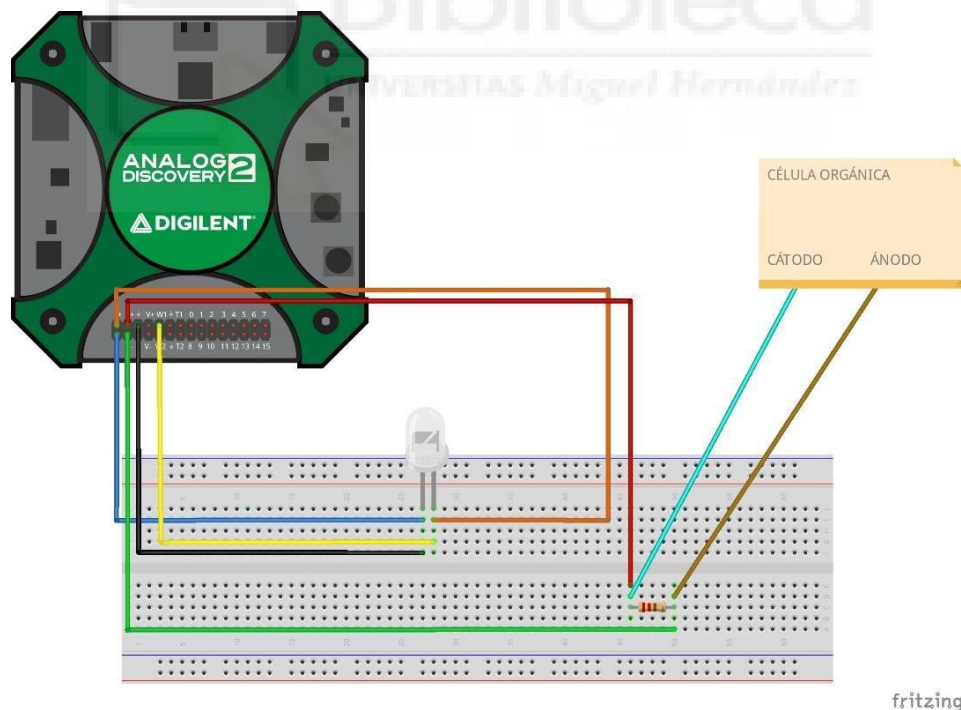


Figura 9. Esquema del montaje eléctrico para toma de medidas.

Para obtener las distintas medidas en función de la distancia, se emplea el portaplacas junto con el soporte métrico, que incorpora un sistema de ajuste preciso. Este sistema permite desplazar de forma controlada el receptor a lo largo del eje de propagación de la señal. El desplazamiento se realiza centímetro a centímetro, lo que permite registrar de

forma sistemática cómo varía la señal recibida con la distancia de transmisión. En cada posición, se registran los valores pico a pico de la señal para distintas frecuencias de trabajo.

3.3.2 TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS

Para la transmisión de datos, se incorpora una placa Arduino Due que reemplaza al generador de funciones del AD2 durante la transmisión de información. El Arduino genera una señal modulada OOK, codificando caracteres en formato ASCII que se convierten en pulsos de encendido y apagado del LED. De este modo, el LED actúa como transmisor de datos binarios.

La célula fotovoltaica sigue funcionando como receptor, pero en este caso la señal captada presenta una amplitud reducida, lo que dificulta la correcta detección de los datos. Para solucionar este problema, se incorpora un amplificador operacional LM741CN, configurado en modo no inversor, que permite aumentar la amplitud de la señal a niveles adecuados para su posterior decodificación.

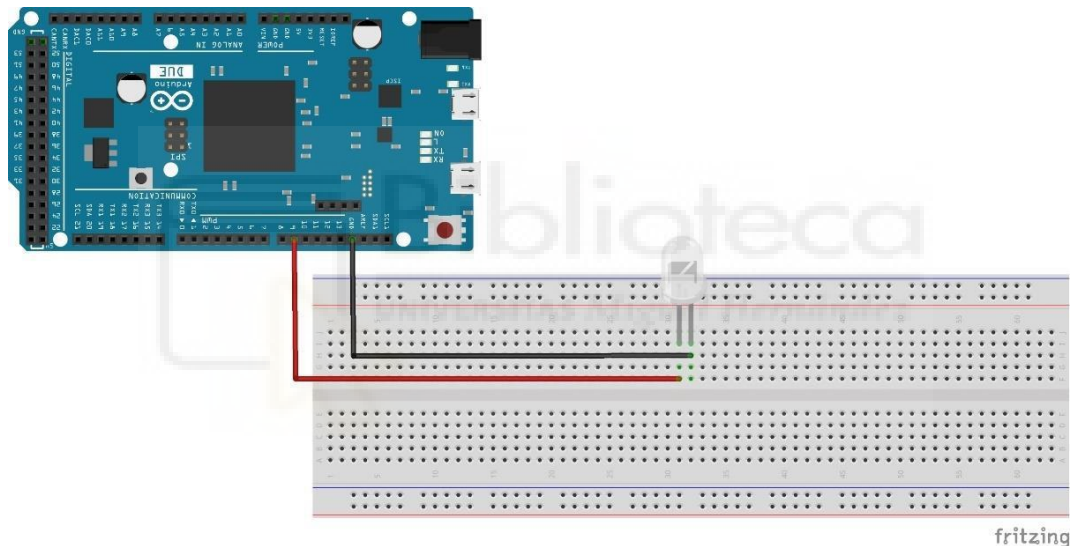


Figura 10. Esquema del montaje eléctrico para transmisión de datos.

El segundo Arduino Due, está conectado a la salida del amplificador. Este se encarga de leer la señal amplificada y decodificar los datos recibidos, permitiendo la reconstrucción del mensaje original enviado, esto se puede observar en la siguiente imagen.

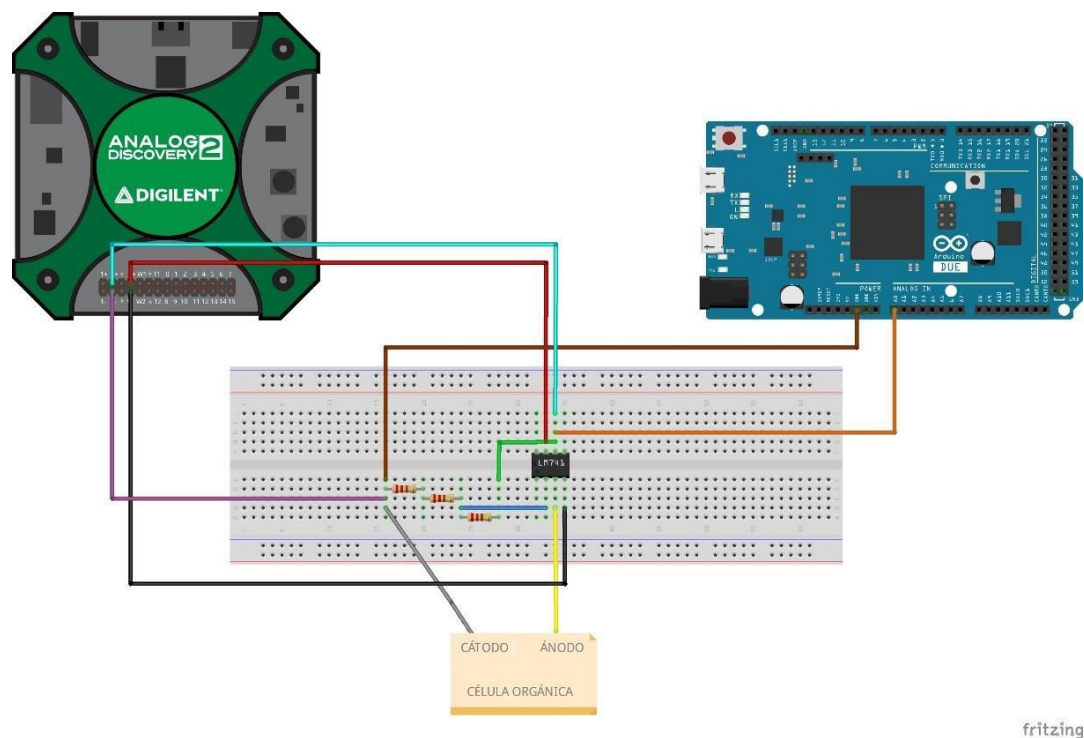


Figura 11. Esquema del montaje eléctrico para recepción de datos.

4. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas con las distintas configuraciones del sistema.

4.1 COMPARACIÓN CÉLULAS THF, DMSO, DMF, MeOH y Pb SIN APLICAR FILTRADO

Para este trabajo se emplea un conjunto de fotodetectores, los cuales están constituidos por células fotovoltaicas orgánicas e inorgánicas.

La característica principal de las células solares orgánicas e inorgánicas es que están dopadas con distintos disolventes, los cuales contribuyen a mejorar la conductividad de la capa de transporte de huecos. En este trabajo escogeremos entre estos cinco tipos de células dopadas con disolventes como dimetilformamida (DMF), tetrahidrofurano (THF) y dimetilsulfóxido (DMSO), metanol (MeOH) y plomo (Pb).

Para escoger una célula para realizar las mediciones haremos una comparación entre las células THF, DMSO, DMF, MeOH y Pb, que podemos ver en las figuras, respectivamente, con su correspondiente fecha de producción. Para las células THF, DMSO y DMF, disponemos de 6 células, para MeOH, disponemos de 5 células y para Pb disponemos 3 células, siendo la célula 1 la de referencia, que servirá para comparar el comportamiento del resto de células.

Vamos a realizar una comparativa de 6 células de un mismo tipo, por ejemplo, para las 6 células disponibles de DMF, medimos manualmente cual es la celda en la que se mide un mayor voltaje, y las comparamos entre sí. Estas medidas se hacen variando tanto la frecuencia como la distancia. A continuación, se presenta una tabla con la fecha de creación y las características principales de las células fotovoltaicas utilizadas en este trabajo.

Fecha	Material	Celdas	Características	Ratios
03/11/2022	ITO/PEDOT:PSS /DMF/P3HT:PCBM/Al	C1-6	P3HT:PCBM=300 rpm, 150 seg, 70° C (1 min)	P3HT:PCBM=1:0,8 (C1-6), PEDOT:PSS/DMF=1:0-1:3 (C1-6)
20/04/2023	ITO/PEDOT:PSS /DMSO/P3HT:PCBM/Al	C1-6		P3HT:PCBM=1:0,8 (C1-6), PEDOT:PSS/DMSO=1:0-1:5 (C1-6)
19/04/2023	ITO/PEDOT:PSS /THF/P3HT:PCBM/Al	C1-6		P3HT:PCBM=1:0,8 (C1-6), PEDOT:PSS/THF=1:0-1:2,5 (C1-6)
26/04/2023	ITO/PEDOT:PSS /MeOH/P3HT:PCBM/Al	C1-6		P3HT:PCBM=1:0,8 (C1-6), PEDOT:PSS/MeOH=1:0-1:5 (C1-6)
22/02/2024	ITO/PEDOT:PSS /P3HT:PCBM:[PbS (C2-4)]/Al	C1-4	PbS 1-3 ciclos (C2-4)	

Tabla 1. Características de las células orgánicas e inorgánica.

Asimismo, en las imágenes que se muestran a continuación, se pueden visualizar las células junto con sus respectivas fechas de fabricación

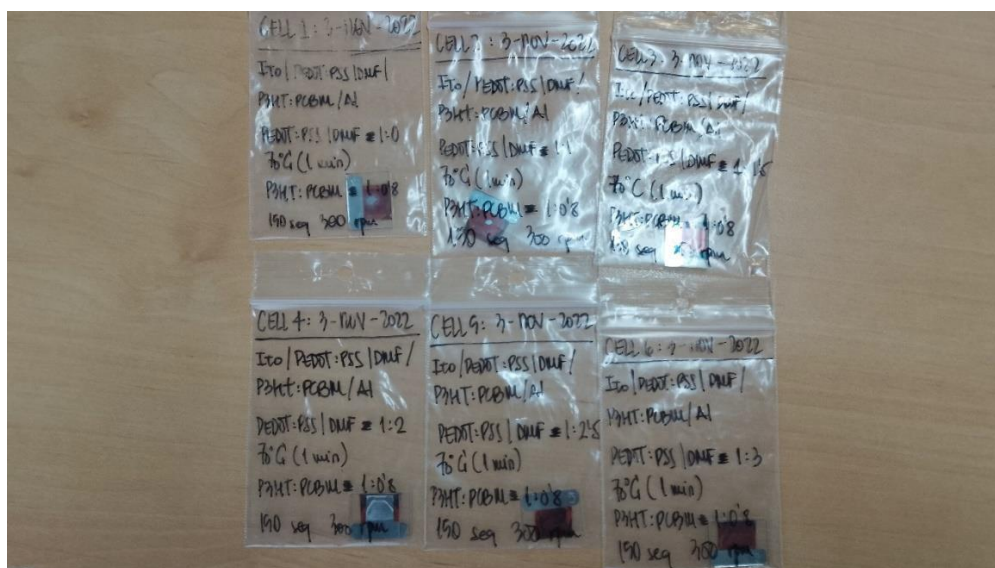


Figura 12. Placas DMF.



Figura 13. Placas DMSO.



Figura 14. Placas THF.



Figura 15. Placas MeOH.



Figura 16. Placas Pb.

A continuación, se presentan una serie de tablas con los valores obtenidos, donde realizaremos una comparación más adelante para seleccionar la célula en la que se efectuarán las medidas.

Se efectúan las medidas de las células correspondientes: DMF, DMSO, THF, MeOH y Pb

N° de células	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Célula 5	Célula 6
Frecuencias	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz
Distancia (cm)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)
0	53,757	36,295	79,500	147,92	95,188	107,17
1	42,115	54,784	71,100	122,92	79,780	78,752
2	31,843	47,594	53,400	91,079	55,811	57,866
3	21,914	39,034	44,000	69,165	44,512	48,621
4	17,462	32,528	36,700	53,415	35,610	39,719
5	14,381	29,104	29,700	43,485	28,419	31,501
6	11,642	24,311	25,300	34,583	23,626	27,050
7	9,9297	20,544	21,300	28,762	19,517	22,599
8	9,2448	17,805	18,500	25,338	16,778	19,859
9	7,5328	15,066	16,100	21,571	14,038	17,462
10	7,1904	13,696	14,100	18,490	12,669	15,066
11	6,1632	12,699	12,700	16,435	10,957	14,038
12	5,4784	11,299	11,500	15,066	9,9297	12,669
13	4,7936	10,272	10,600	14,381	9,2448	11,642
14	4,7936	9,5872	9,8000	13,011	8,2176	10,614
15	4,4512	9,2448	9,1000	11,984	7,8752	10,614
16	4,4512	8,5600	8,4000	10,614	7,5328	9,5872
17	4,1088	7,8752	8,0000	10,272	6,8480	9,2448
18	4,1088	7,1904	7,6000	9,9297	7,1904	8,9024
19	4,1088	6,5056	7,1000	9,5872	6,5056	8,2176
20	4,1088	6,1632	6,8000	9,5872	6,5056	7,8752

Tabla 2. Células DMF.

N° de células	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Célula 5	Célula 6
Frecuencias	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz
Distancia (cm)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)
0	97,927	96,557	80,464	34,240	74,986	39,034
1	70,877	78,068	63,687	29,104	52,730	30,474
2	47,251	54,442	43,485	18,832	35,952	19,174
3	35,267	38,691	30,816	14,723	27,050	12,669
4	23,283	28,419	23,626	11,984	19,174	10,614
5	16,435	23,968	18,147	9,5872	14,723	8,5600
6	12,669	18,832	15,408	7,8752	11,642	8,2176
7	13,354	15,750	12,669	6,5056	10,614	7,1904
8	13,011	13,696	10,957	6,1632	8,9024	6,1632

9	11,984	11,642	9,2448	5,4784	7,8752	5,8208
10	11,299	10,614	8,5600	5,4784	7,5328	5,4784
11	10,957	9,2448	7,5328	4,7936	6,8480	5,1360
12	10,272	8,5600	7,5328	4,7936	6,1632	5,1360
13	10,957	7,8752	7,1904	4,7936	6,1632	5,1360
14	6,5056	6,8480	6,1632	4,7936	5,4784	4,7936
15	6,8480	6,8480	6,1632	4,1088	5,8208	5,1360
16	5,8208	6,5056	5,8208	4,1088	5,4784	5,1360
17	5,4784	6,1632	5,4784	3,7664	5,4784	5,1360
18	5,1360	5,8208	4,7936	4,1088	6,8480	4,7936
19	5,1360	5,1360	5,1360	3,7664	4,7936	4,7936
20	4,7936	5,1360	5,4784	4,1088	4,7936	4,4512

Tabla 3. Células DMSO.

N° de células	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Célula 5	Célula 6
Frecuencias	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz
Distancia (cm)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)
0	47,936	40,746	86,628	93,476	48,963	143,47
1	31,159	28,762	79,095	83,204	47,594	83,888
2	23,283	20,202	62,660	60,605	43,485	57,523
3	17,120	15,066	51,360	46,224	36,637	42,458
4	13,354	11,642	38,691	35,610	30,131	32,871
5	10,614	9,5872	30,474	27,735	24,995	26,365
6	9,2448	8,2176	24,311	22,599	21,571	21,571
7	8,2176	6,8480	20,544	18,147	17,462	18,147
8	7,5328	6,1632	17,805	15,408	16,093	15,750
9	6,8480	5,4784	15,066	14,038	13,354	13,696
10	5,8208	5,1360	13,354	11,984	11,984	11,984
11	5,8208	4,4512	11,642	10,272	10,614	10,272
12	5,4784	4,4512	10,272	9,5872	9,9297	9,2448
13	5,8208	4,4512	9,2448	8,5600	8,5600	10,957
14	5,1360	3,7664	8,9024	7,5328	8,2176	9,2448
15	4,7936	3,7664	7,8752	7,8752	7,8752	7,5328
16	5,1360	3,7664	7,5328	6,8480	7,1904	8,2176
17	5,1360	3,7664	6,8480	6,8480	6,5056	7,5328
18	4,7936	3,4240	6,5056	7,8752	6,8480	7,5328
19	4,4512	3,0816	6,5056	6,1632	6,1632	7,1904
20	4,7936	3,4240	6,1632	5,8208	6,5056	6,8480

Tabla 4. Células THF.

Nº de células	Célula 1	Célula 3	Célula 4	Célula 5	Célula 6
Frecuencias	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz
Distancia (cm)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)
0	29,789	84,231	47,936	100,67	81,492
1	23,283	67,111	47,594	73,959	61,632
2	17,462	44,512	35,610	50,675	44,170
3	13,011	30,474	26,707	34,925	31,843
4	9,5872	25,680	20,887	26,365	22,941
5	8,2176	19,174	16,093	19,517	17,805
6	6,8480	15,408	13,011	15,408	14,723
7	5,8208	12,669	10,957	12,669	11,984
8	5,4784	10,957	9,5872	10,614	10,272
9	5,4784	9,2448	8,5600	9,2448	8,9024
10	4,7936	8,2176	8,2176	7,5328	8,2176
11	4,7936	7,5328	7,5328	7,5328	7,5328
12	4,4512	7,5328	6,5056	6,1632	6,5056
13	4,4512	6,5056	6,1632	5,8208	6,1632
14	4,1088	5,8208	5,4784	6,1632	5,8208
15	4,1088	6,1632	5,1360	5,1360	5,1360
16	4,4512	5,4784	5,4784	5,1360	5,4784
17	4,4512	5,8208	5,1360	4,4512	5,1360
18	4,4512	5,4784	4,4512	4,4512	5,1360
19	5,8208	5,4784	4,7936	4,7936	4,4512
20	4,7936	5,1360	5,1360	5,8208	4,4512

Tabla 5. Células MeOH.

Nº de células	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4
Frecuencias	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz
Distancia (cm)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)
0	59,578	66,768	55,469	60,610
1	45,539	55,811	33,898	45,080
2	35,952	42,800	23,626	34,130
3	27,392	31,843	15,066	24,770
4	21,571	24,653	10,614	18,950
5	16,778	19,174	7,1904	14,380
6	14,038	15,066	8,9024	12,670
7	10,957	12,326	8,2176	10,500
8	9,9297	10,957	7,5328	9,4700
9	7,5328	12,326	7,1904	9,0200
10	6,5056	8,2176	6,1632	6,9600
11	6,5056	7,5328	5,1360	6,3900
12	6,1632	7,1904	5,8208	6,3900
13	5,4784	7,1904	6,1632	6,2800
14	5,1360	6,8480	5,1360	5,7100
15	5,4784	6,5056	5,1360	5,7100

16	6,1632	7,1904	5,1360	6,1600
17	4,1088	5,4784	4,7936	4,7900
18	4,4512	6,1632	4,7936	5,1400
19	4,4512	5,8208	4,7936	5,0200
20	4,7936	5,1360	5,1360	5,0200

Tabla 6. Células Pb.

En el caso de las células DMF, se identificó un problema con la célula número 3, la cual resultó inservible para el análisis. Para resolver esta limitación, se ha empleado el uso de inteligencia artificial que ha permitido predecir el comportamiento esperado de dicha célula a partir de los datos disponibles, proporcionando así una estimación coherente con el resto de las mediciones.

42 COMPARACIÓN ENTRE LAS MEJORES CÉLULAS

En la siguiente tabla se comparan las mejores células seleccionadas para cada uno de los disolventes utilizados en el experimento: DMF (célula 4), DMSO (célula 1), THF (célula 6), MeOH (célula 5) y Pb (célula 2). La comparación se realiza a una frecuencia fija de 1 kHz, y se evalúa la evolución del valor pico a pico (Vpp) de la señal en función de la distancia.

	DMF	DMSO	THF	MeOH	Pb
	Célula 4	Célula 1	Célula 6	Célula 5	Célula 2
Frecuencias	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz	1 KHz
Distancia (cm)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)	Vpp (mV)
0	147,92	97,927	143,47	100,67	66,768
1	122,92	70,877	83,888	73,959	55,811
2	91,079	47,251	57,523	50,675	42,800
3	69,165	35,267	42,458	34,925	31,843
4	53,415	23,283	32,871	26,365	24,653
5	43,485	16,435	26,365	19,517	19,174
6	34,583	12,669	21,571	15,408	15,066
7	28,762	13,354	18,147	12,669	12,326
8	25,338	13,011	15,750	10,614	10,957
9	21,571	11,984	13,696	9,2448	12,326
10	18,490	11,299	11,984	7,5328	8,2176
11	16,435	10,957	10,272	7,5328	7,5328
12	15,066	10,272	9,2448	6,1632	7,1904
13	14,381	10,957	10,957	5,8208	7,1904
14	13,011	6,5056	9,2448	6,1632	6,8480
15	11,984	6,8480	7,5328	5,1360	6,5056
16	10,614	5,8208	8,2176	5,1360	7,1904
17	10,272	5,4784	7,5328	4,4512	5,4784
18	9,9297	5,1360	7,5328	4,4512	6,1632
19	9,5872	5,1360	7,1904	4,7936	5,8208

20	9,5872	4,7936	6,8480	5,8208	5,1360
----	--------	--------	--------	--------	--------

Tabla 7. Comparación mejores células.

Como puede observarse en los datos, la célula número 4 dopada con DMF presenta los valores de tensión pico a pico (V_{pp}) más altos a lo largo de todo el rango de distancias evaluadas. Su rendimiento es especialmente notable en las distancias cortas y medias (de 0 a 10 cm), lo que indica una mejor capacidad de captación y conducción de la señal, así como una menor atenuación con respecto al resto de células.

En comparación, la célula 6 con THF también muestra valores elevados en distancias cortas (como los 143,47 mV a 0 cm), sin embargo, su atenuación es más acusada conforme aumenta la distancia, disminuyendo su rendimiento de manera más acelerada que la de DMF. Un comportamiento similar se observa en la célula 5 con MeOH, aunque sus valores de V_{pp} en todas las distancias son ligeramente más bajos que los de la célula con THF, indicando una eficiencia intermedia.

Por otro lado, la célula 1 dopada con DMSO es la que refleja los valores más bajos en casi todo el rango de distancias, lo que sugiere una menor eficiencia general en la recepción de la señal. Finalmente, la célula 2 con plomo (Pb) también presenta valores inferiores en comparación con DMF y THF, aunque en algunas distancias largas (como 17–20 cm), su rendimiento es comparable o incluso superior al de MeOH y DMSO, lo que podría deberse a características particulares de su dopado.

Por tanto, tras analizar el comportamiento general de todas las células fotovoltaicas orgánicas e inorgánica evaluadas, se concluye que la célula número 4 dopada con DMF ofrece el mejor desempeño en términos de transmisión de señal. Debido a esta ventaja en eficiencia y estabilidad, se ha seleccionado esta célula como referencia para realizar el resto de las pruebas y experimentos del trabajo, incluyendo el filtrado de señal en tiempo real y la transmisión de datos mediante modulación OOK. Esta elección permitirá garantizar resultados más fiables y representativos del potencial del sistema.

A continuación, se presentan tres imágenes correspondientes a señales sin aplicar ningún tipo de filtrado. En la Figura 13, se observa que, a frecuencias bajas, la señal se mantiene estable y no es necesario aplicar un filtro, ya que no se detecta ruido significativo. Sin embargo, a partir de 50 kHz, tal como se aprecia en las Figuras 14 y 15, comienza a introducirse una cantidad notable de ruido, lo que hace evidente la necesidad de aplicar un filtrado adecuado para preservar la calidad de la señal recibida.

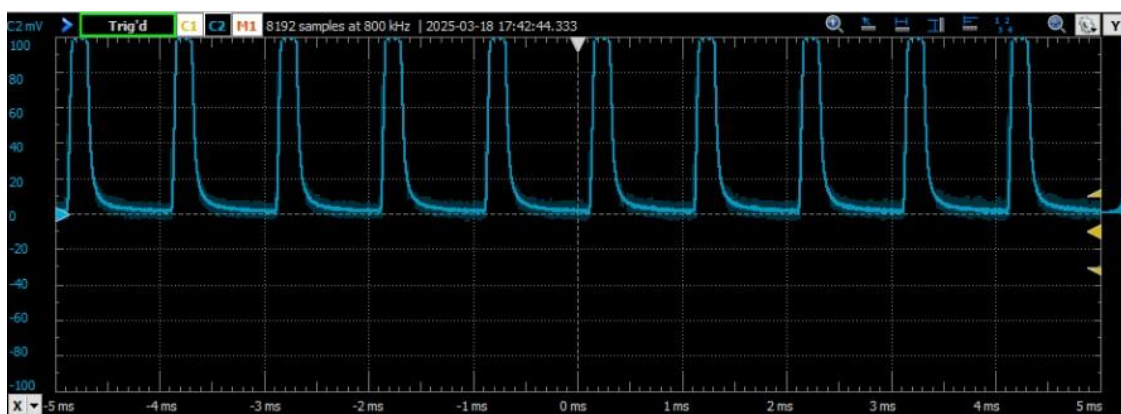


Figura 17. Osciloscopio midiendo a 1 kHz a una distancia de 0 cm sin filtrado.

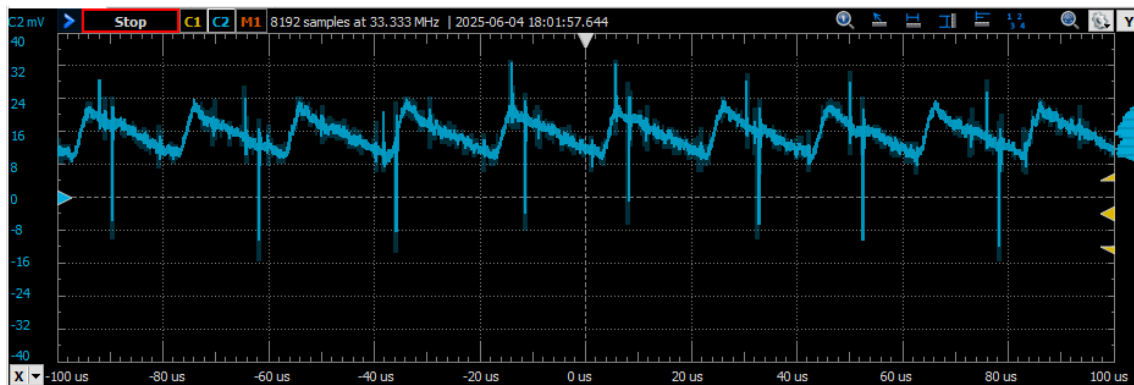


Figura 18. Osciloscopio midiendo a 50 kHz a una distancia de 0 cm sin filtrado.

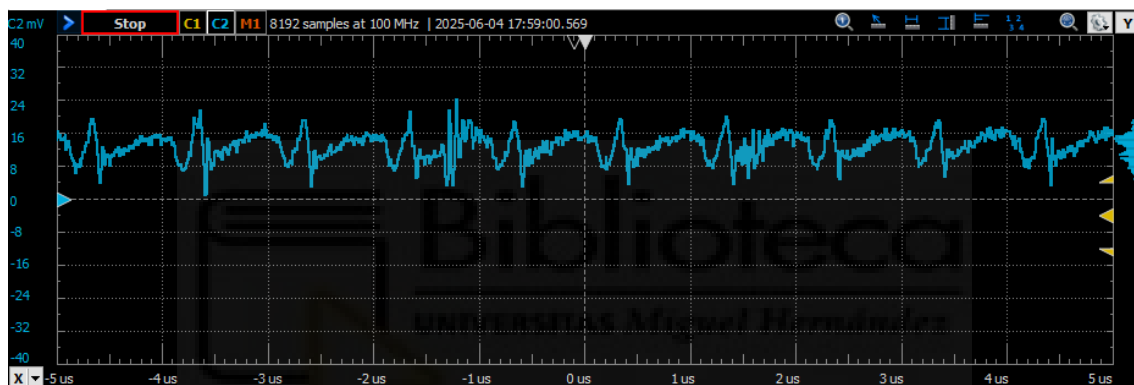


Figura 19. Osciloscopio midiendo a 1000 kHz a una distancia de 0 cm sin filtrado.

43 AUTOMATIZACIÓN DE MEDIDAS Y APLICACIÓN DE FILTRADO DIGITAL

El principal problema que teníamos con todas las placas era que, a partir de 50 kHz, comienza a introducirse ruido adicional en la señal emisora, lo que provoca errores en la señal recibida. Además, el aumento en la distancia entre el emisor y el receptor genera una atenuación significativa de la señal.

El incremento del ruido a medida que aumenta la frecuencia, junto con la atenuación que se intensifica con la distancia, representa un desafío significativo para la transmisión eficiente de información.

Para abordar los problemas identificados, era necesario implementar un sistema de filtrado que permitiera mejorar la calidad de la señal recibida. Para ello, modificamos un script previamente utilizado para la automatización de la toma de medidas, el cual ajustaba los valores de la frecuencia siguiendo la serie predefinida: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 kHz [11]. En esta actualización, añadimos la capacidad de aplicar

un filtrado en tiempo real, optimizando la precisión de los datos adquiridos y permitiendo su visualización directa sin requerir procesamiento adicional.

Dentro de esta modificación, se incorporó la posibilidad de utilizar diferentes tipos de filtros, entre ellos los filtros Chebyshev, Butterworth y filtros personalizados (Customizados), brindando flexibilidad en la selección de la técnica de filtrado según las necesidades específicas del experimento. Además, se añadió la opción de seleccionar el orden del filtro entre los valores 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16, así como la posibilidad de escoger entre filtro paso bajo, paso banda o paso alto. La incorporación de estos filtros es muy útil a partir de los 50 kHz, donde la señal comienza a verse afectada por ruido adicional, como se mencionó anteriormente. La capacidad de aplicar el filtrado en tiempo real representa una ventaja significativa en términos de eficiencia y optimización de los tiempos de procesamiento.

Finalmente, tras la realización de las pruebas, se estableció una frecuencia de corte del filtro es de 1 MHz, esta fue escogida para evitar la filtración excesiva de la señal útil, ya que un valor demasiado bajo podría distorsionar la información original, mientras que un valor demasiado alto permitiría el paso de ruido no deseado. Asimismo, la elección de un orden 2 responde a la necesidad de controlar el desfase de la señal, ya que un orden superior podría introducir alteraciones indeseadas en la forma de onda. En cuanto al tipo de filtro, se decidió utilizar un filtro Butterworth de tipo paso bajo, ya que ofrece una respuesta en frecuencia suave y sin ondulaciones, lo que permite preservar la forma de la señal original con un mínimo desfase. Por el contrario, se descartó el uso del filtro Chebyshev, debido a que este introduce un desfase considerable en frecuencias elevadas, lo cual podría afectar negativamente la integridad de la información transmitida.

En las imágenes mostradas a continuación, se puede observar el efecto del filtrado: la señal original se representa con color azul, mientras que la salida del filtro se muestra en color naranja, permitiendo visualizar claramente cómo actúa el filtro sobre la señal.

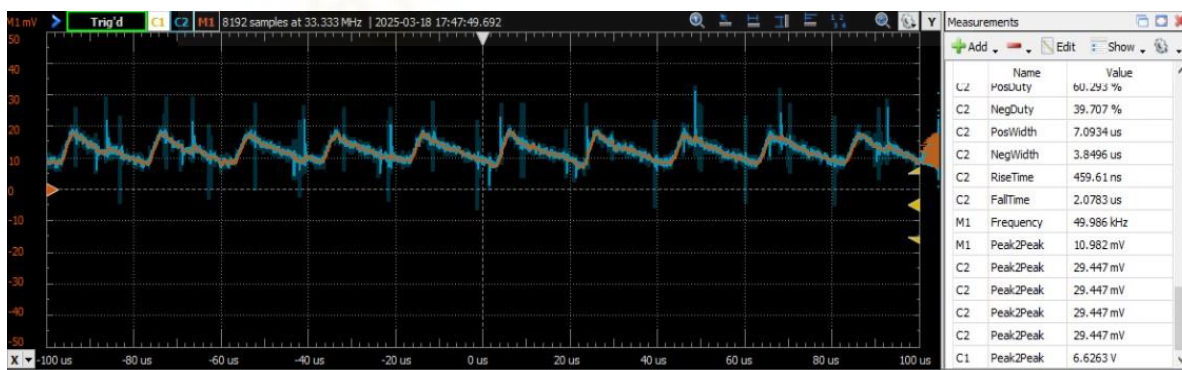


Figura 20. Osciloscopio midiendo a 50 kHz a una distancia de 4 cm.

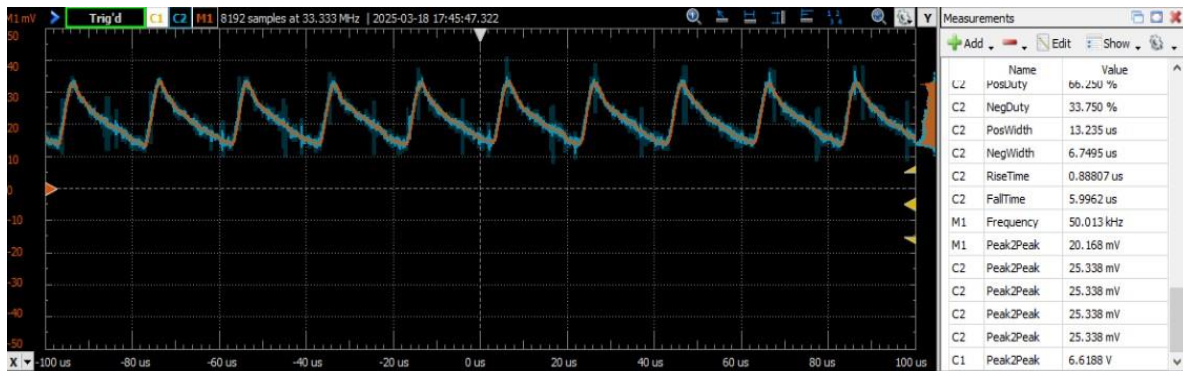


Figura 21. Osciloscopio midiendo a 50 kHz a una distancia de 2 cm.

En la figura 16 se puede apreciar como a partir de 50 kHz a una distancia de 4 cm empieza a colarse el ruido, mientras que a una distancia inferior no haría falta implementar el filtro ya que la señal pasa limpia como se puede ver en la figura 3. Esto implica que al aumentar la distancia y la frecuencia perdemos la señal y no podríamos transmitir información.

44 CONFIGURACIÓN Y ACTIVACIÓN DEL FILTRO DIGITAL.

En este apartado se describe la función encargada de configurar y activar el filtro digital aplicado sobre la señal capturada por el osciloscopio.

//Funcion Activar filtro

function activarFiltro (frequency, DISTANCIA){

Scope1.Math1.checked=**true**;

//Ajustar el tipo de filtro que queremos

Scope1.Math1.Input.text= 'C2' ; // Canal donde se aplica filtro

Scope1.Math1.Filter.text= 'Butterworth' ; // Tipo de filtro a aplicar: Chebyshev o Butterworth

Scope1.Math1.Order.text= '2' ; // Orden del filtro: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16

Scope1.Math1.Type.text= 'Low-pass' ; //Tipo de filtro a elegir: High-pass, Band-pass, Band-stop

Scope1.Math1.Freq1.text= '1 Mhz' ; //Frecuencia para el filtro

Este bloque activa el canal matemático del osciloscopio y aplica un filtro Butterworth paso bajo de segundo orden sobre la señal del canal 2. Este bloque te da la elección de elegir un filtro Butterworth o Chebyshev, el tipo de filtro que queremos implementar y variar la frecuencia para ajustar el filtro.

45 AJUSTE DINÁMICO DEL RANGO VERTICAL(RANGE)

En esta sección se describe cómo se realiza el ajuste automático del rango vertical en el canal matemático del osciloscopio, en función de la frecuencia de la señal y la distancia entre el emisor y el receptor.

```

//Ajustar valores OFFSET y RANGE Math1
//Math1 (Range)
if(DISTANCIA < 5 && frequency < 20){
Scope1.Math1.Range.text= '20 mV/div';
}
else if((DISTANCIA > 4) && (DISTANCIA < 8) || (frequency >= 20 && frequency <
100 )){
Scope1.Math1.Range.text= '10 mV/div';
}
else if(DISTANCIA > 7 || frequency >= 100 ){
Scope1.Math1.Range.text= '5 mV/div';
}
else{
Scope1.Math1.Range.text= '20 mV/div';
}
//Math1 (offset)
Scope1.Math1.Offset.text= '0 V';

//Espacio para ordenar la salida por pantalla
print();
print("--Filtro activado--");

}

```

Este segmento ajusta automáticamente la escala vertical de visualización de la señal filtrada. La lógica empleada permite optimizar la visibilidad en función de la distancia entre componentes emisores y receptores, y la frecuencia de la señal. A medida que aumentan la frecuencia o la distancia, se espera una disminución en la amplitud de la señal, por lo que se ajusta el rango a valores más sensibles (menor mV/div).

4.6 EXPORTACIÓN AUTOMÁTICA DE DATOS

Este apartado describe el proceso de exportación automatizada de datos medidos durante los ensayos. Esto facilita el análisis posterior.

```

//Exportar datos MEDIDAS canal1 y canal2 .csv

```

```

/**HAY QUE SELECCIONAR LAS MEDIDAS(measurements) QUE
NECESITAMOS EN EL OSCILOSCOPIO*/
Scope1.Export("C:/Users/Equipo/Desktop/UNIVERSIDAD/4Año/Practicas/Filtro1/Butt
erworth_orden_2.1/Frecuencia 1 Mhz con Distancia 20 cm/medidas celula
"+CELULA+" Å"+ANODO+" led alta luminosidad "+COLOR+" "+TAMAÑO+" mm
"+VOLTAJE+" " +frecuencias[j]+ " KHz " +DISTANCIA+ " cm.csv",
"Measurements")

```

Este comando exporta automáticamente los datos adquiridos a un archivo .csv, cuyo nombre incorpora variables relevantes como el tipo de célula, LED, frecuencia y distancia.

47 LECTURA Y ANÁLISIS DEL VALOR PICO A PICO

En esta sección se describe el procedimiento para la lectura automática del valor pico a pico (Vpp) de la señal registrada en el canal 2 del osciloscopio.

```
var rows = rg;
for (var i = 0; i < rows.length; i++) {
    rows[i] = rows[i].split(","); // Convertir cada fila en un array de valores
}

// Extraer un dato específico de la fila 67, columna 2
var fila = 69; // Fila 69 en índice 1
var columna = 2; // Columna 2 en índice 0
var PicoPicoCh2actual = rows[fila][columna];
```

Una vez guardado el archivo, se reabre y se procesa para extraer el valor pico a pico de la señal medida en el canal 2. En este caso el valor se localiza de forma fija en la fila 69, columna 2 del archivo .csv, en función del formato de salida del osciloscopio.

48 ACTIVACIÓN CONDICIONAL DEL FILTRO

En este apartado se presenta la lógica de activación del filtro digital en función de dos parámetros clave: la frecuencia de la señal y la distancia de transmisión.

```
//Condiciones para activar por frecuencia y distancia
if (frequency >= 50 && DISTANCIA < 7){
    activarFiltro (frequency, DISTANCIA);
}
else if (frequency >= 20 && DISTANCIA > 6){
    activarFiltro (frequency, DISTANCIA);
}
else if (frequency >= 10 && DISTANCIA > 11){
    activarFiltro (frequency, DISTANCIA);
}
else{
    Scope1.Math1.checked=false;
}
```

Este bloque establece las condiciones bajo las cuales se activa el filtro digital. Se emplea una lógica combinada entre frecuencia y distancia: a mayor frecuencia o distancia, es más probable que aparezcan ruidos o distorsiones, por lo que se decide aplicar el filtrado. En caso contrario, se desactiva para no alterar innecesariamente la señal.

49 RESULTADOS TRAS APLICACIÓN DEL FILTRO

Tras la implementación del filtro, se realizaron mediciones a distintas distancias y frecuencias con el objetivo de evaluar su eficacia. Los resultados obtenidos de la célula 4 dopada con DMF muestran que, incluso a mayores distancias y frecuencias, el filtro mantiene un rendimiento óptimo, permitiendo una clara diferenciación de la señal respecto al ruido. Además, se observa que su eficacia es mayor a partir de los 4 cm de

distancia, donde la atenuación del ruido y la diferenciación de la señal aumentan notablemente.

A modo de ejemplo, se presentan a continuación los histogramas correspondientes a una frecuencia de 50 kHz y distancias comprendidas entre 0 cm y 20 cm, en intervalos de 5 cm. En cada gráfico, la señal original se representa en color azul, mientras que la señal procesada mediante el filtro se muestra en color naranja. Se aprecia cómo el filtro actúa de manera consistente en todas las mediciones, cumpliendo su función de forma adecuada. Por el contrario, la señal sin filtrar presenta variaciones más significativas dependiendo de la distancia al fotorreceptor y la frecuencia de operación.

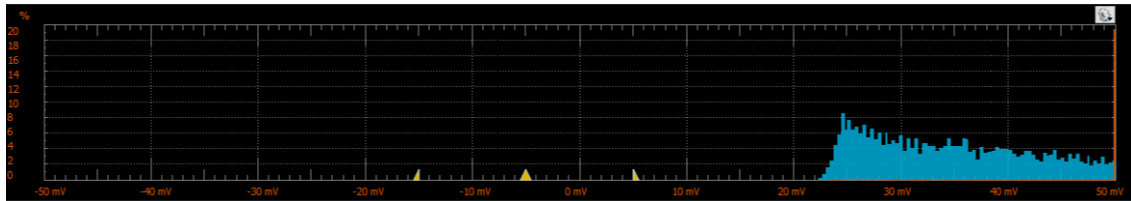


Figura 22. Histograma a 0 cm con frecuencia 50 kHz.

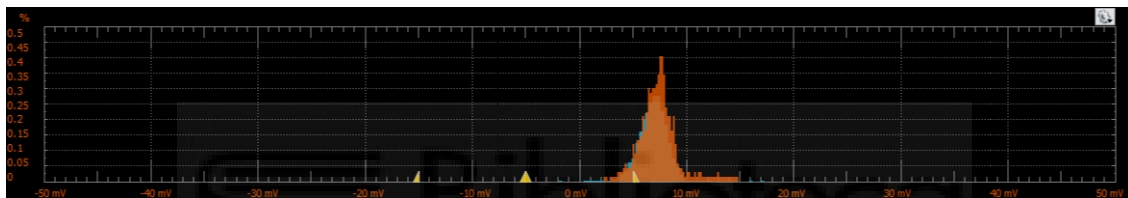


Figura 23. Histograma a 5 cm con frecuencia 50 kHz.

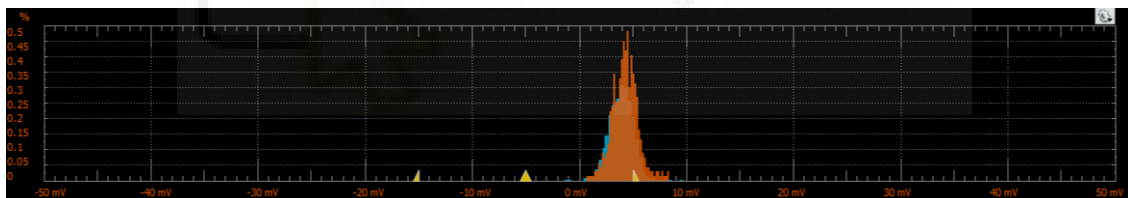


Figura 24. Histograma a 10 cm con frecuencia 50 kHz.

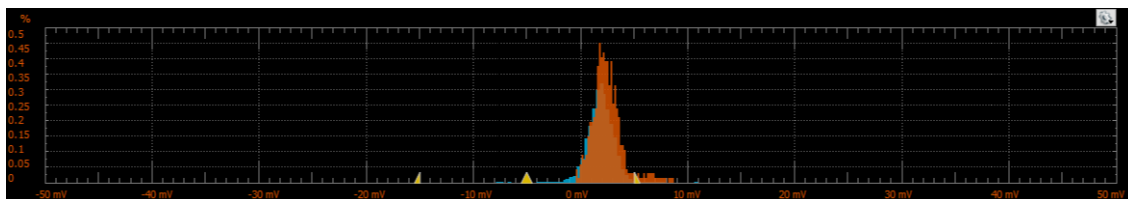


Figura 25. Histograma a 15 cm con frecuencia 50 kHz.

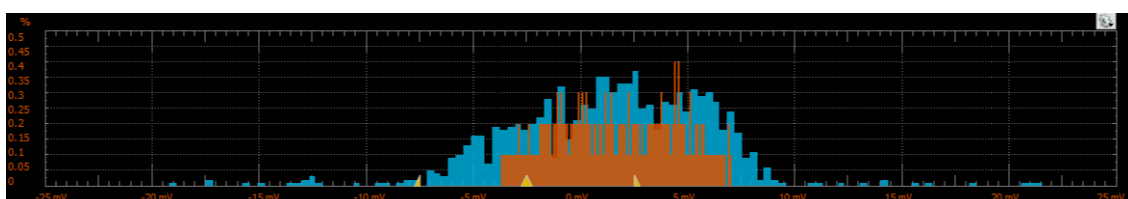


Figura 26. Histograma a 20 cm con frecuencia 50 kHz.

Las siguientes gráficas ilustran cómo varía el comportamiento del filtro en función de la frecuencia y la distancia. Para este análisis, se han considerado frecuencias de 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz, y 1000 kHz.

En el caso de las frecuencias más bajas, concretamente 1 kHz, 2 kHz y 5 kHz, se observa que el filtro se superpone completamente a la señal original. Esto ocurre porque, a estas frecuencias, la señal se transmite de forma limpia y sin presencia significativa de ruido, por lo que la acción del filtro no tiene un efecto visible. En consecuencia, ambas curvas coinciden, lo que indica que no es necesario aplicar filtrado en este rango de frecuencias.

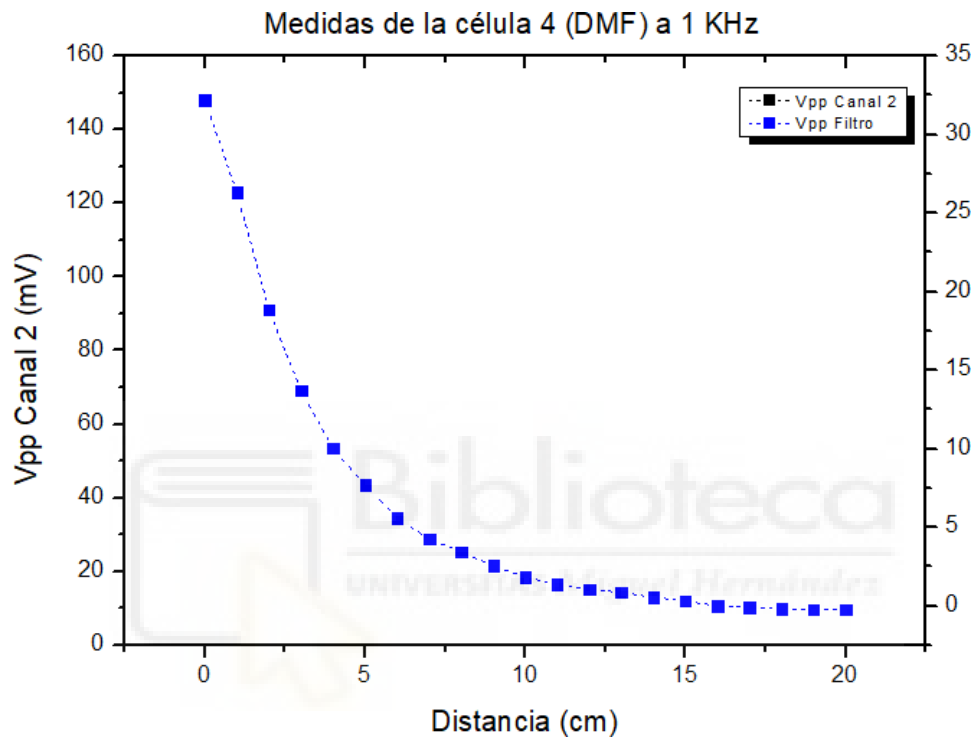


Figura 27. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 1 kHz.

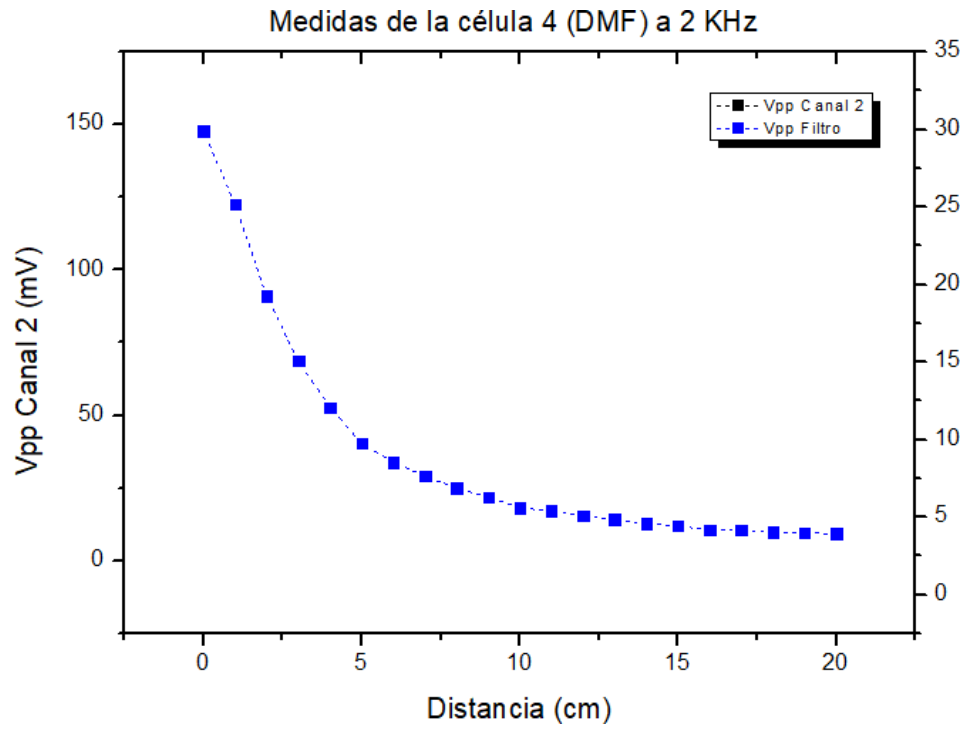


Figura 28. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 2 kHz.

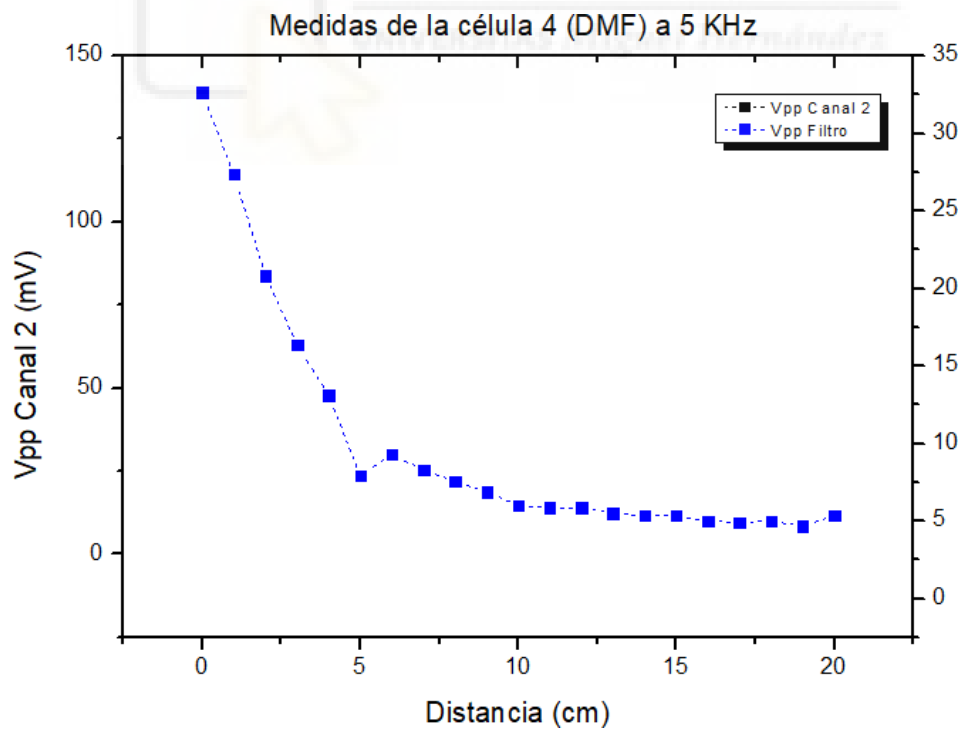


Figura 29. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 5 kHz.

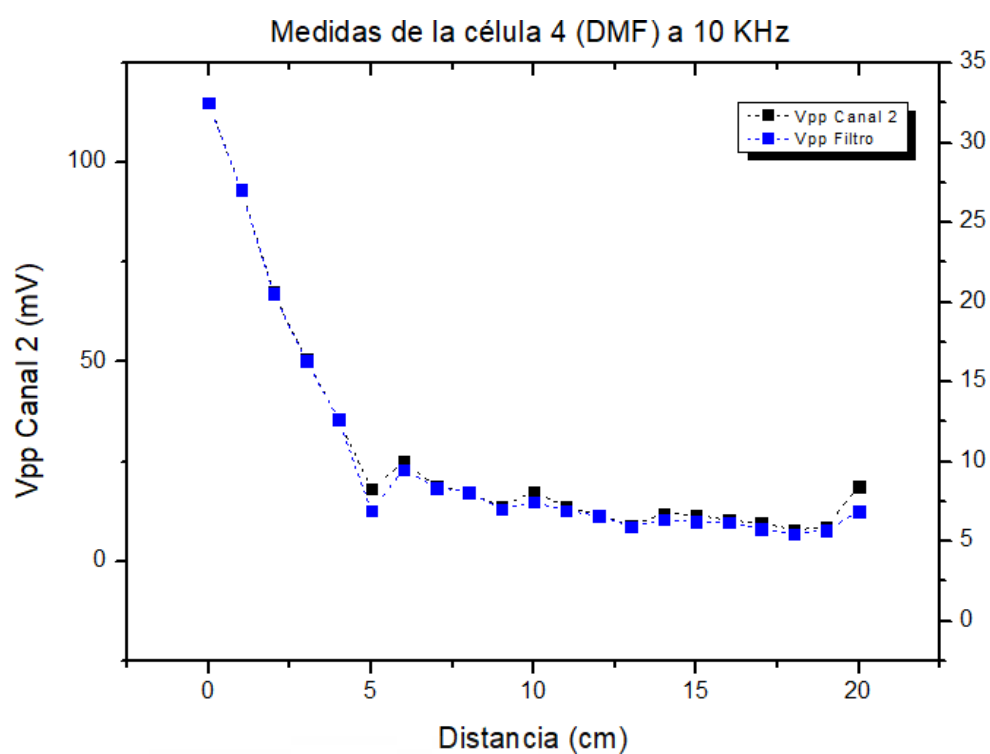


Figura 30. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 10 kHz.

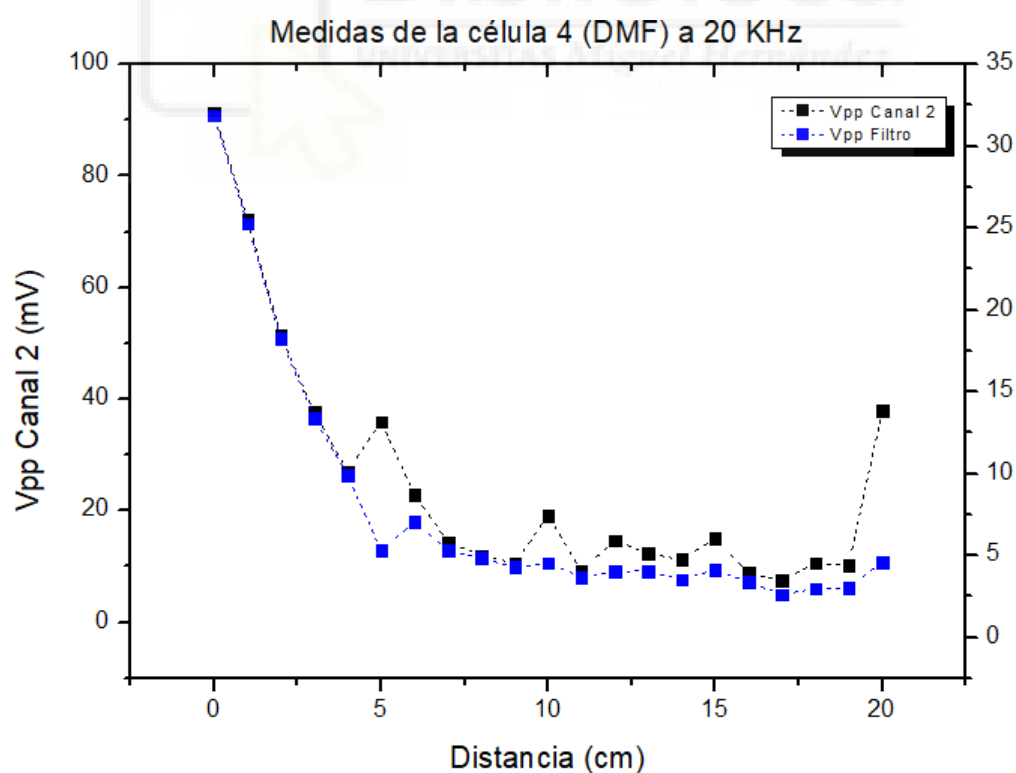


Figura 31. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 20 kHz.

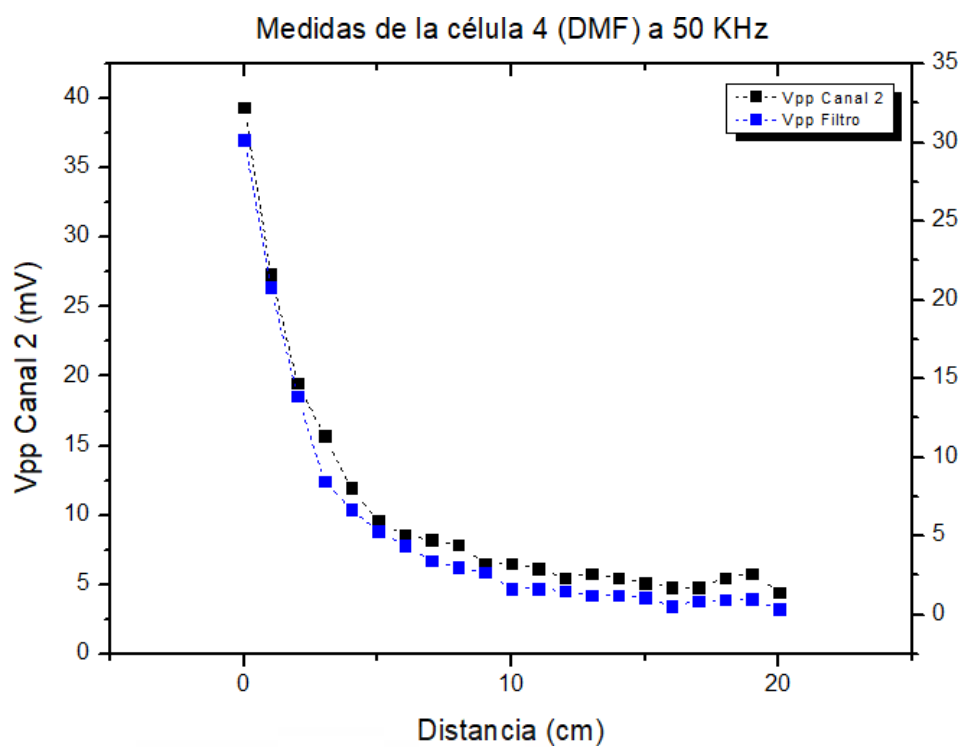


Figura 32. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 50 kHz.

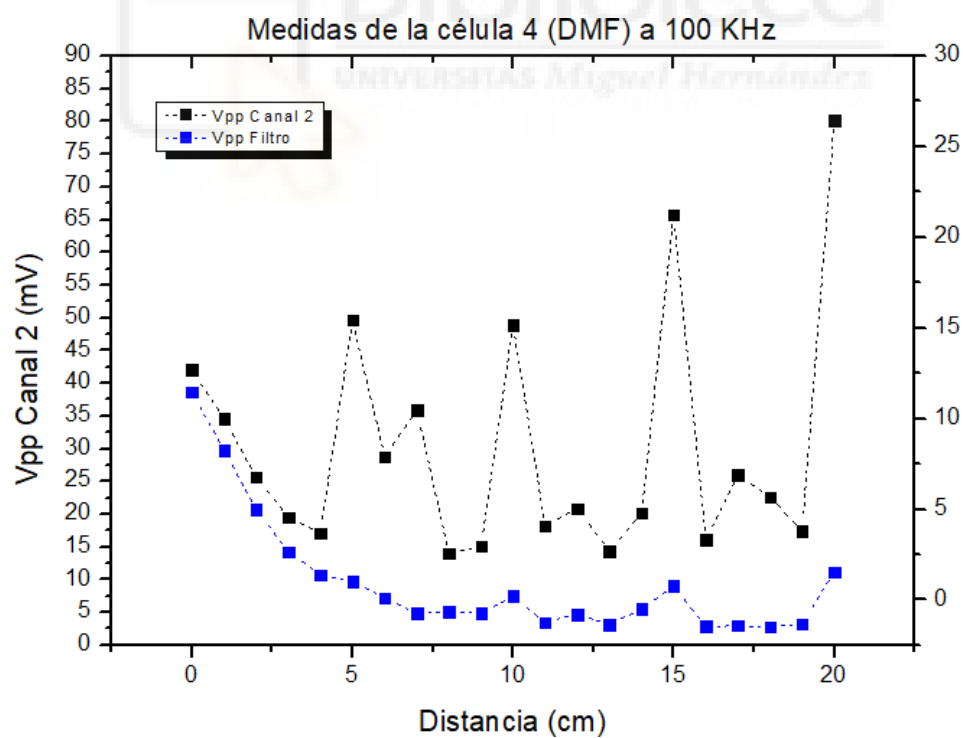


Figura 33. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 100 kHz.

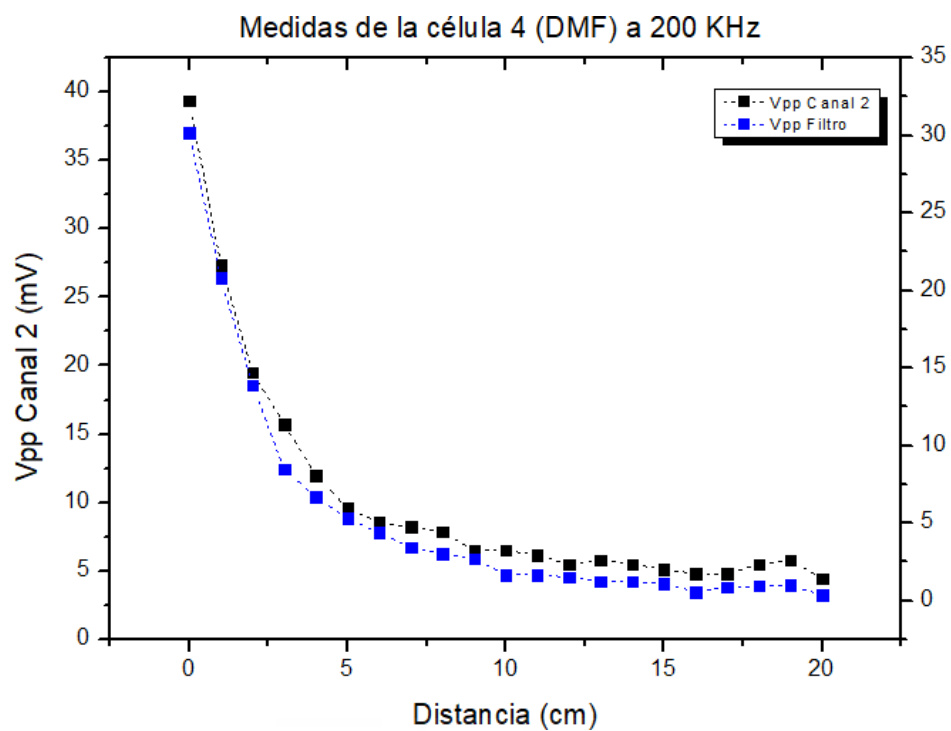


Figura 34. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 200 kHz.

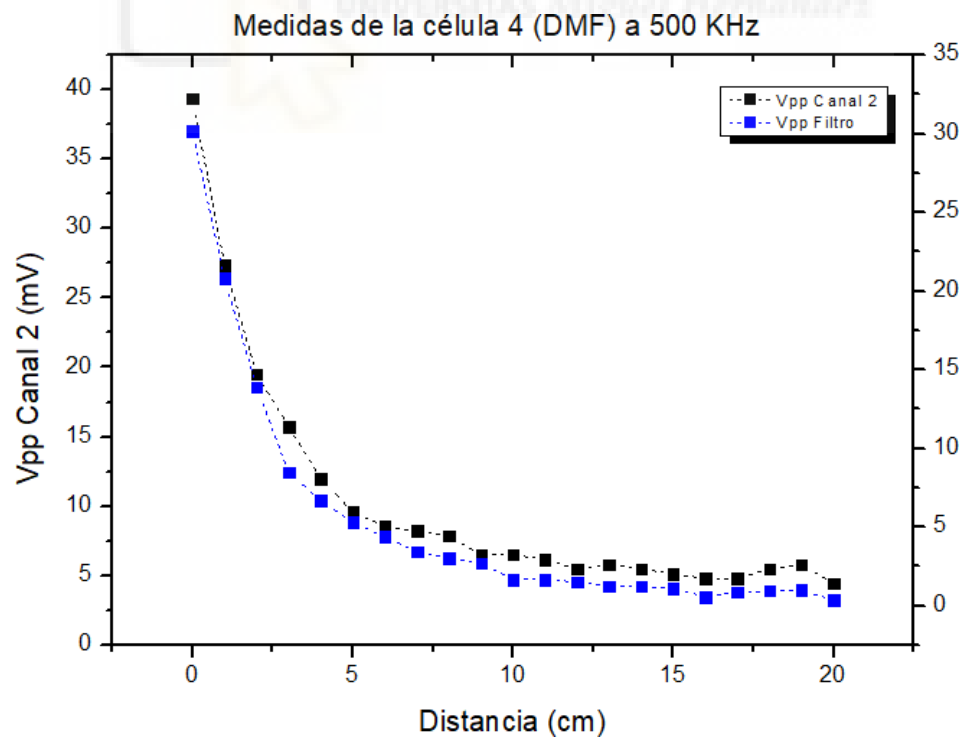


Figura 35. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 500 kHz.

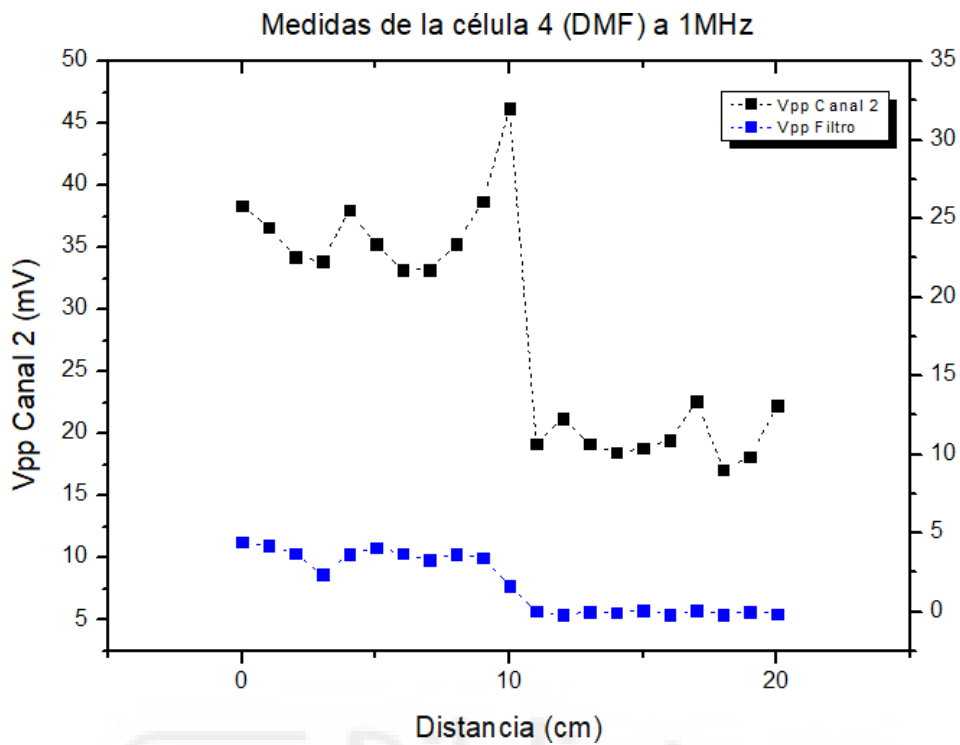


Figura 36. Voltaje frente a distancia con una frecuencia de 1 MHz.

4.10 COMPARACIÓN DE RESULTADOS TOTALES DE LAS MEDIDAS VARIANDO LA DISTANCIA

En este apartado se muestra la respuesta de la célula 4 dopada con DMF en función de la distancia entre el emisor y el receptor, para un conjunto de frecuencias comprendidas entre 1 kHz y 1000 kHz. En ella se representa el valor pico a pico (V_{pp}) de la señal medida tras aplicar el filtro, lo que permite analizar de forma visual cómo se comporta la señal filtrada a diferentes frecuencias y distancias.

Respuesta de la célula 4 (DMF) en función de la distancia para distintas frecuencias

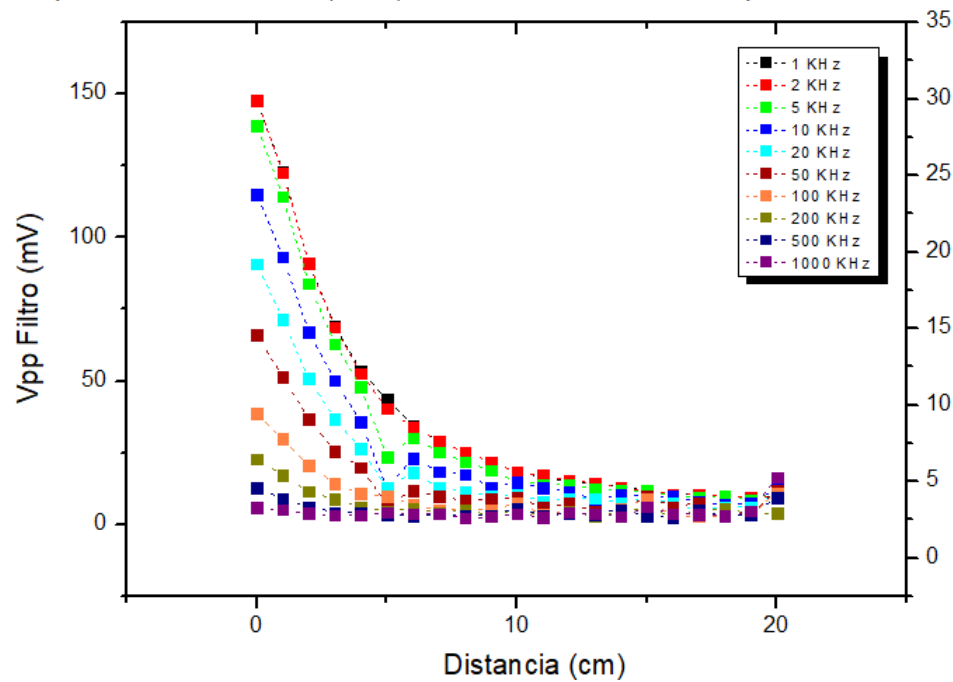


Figura 37. Comparación de medidas de Voltaje frente a distancia.

A continuación, se presenta una ampliación del tramo comprendido entre 0 cm y 7 cm, con el objetivo de visualizar con mayor claridad el comportamiento de la señal en las distancias más cercanas.

Respuesta de la célula 4 (DMF) en función de la distancia para distintas frecuencias

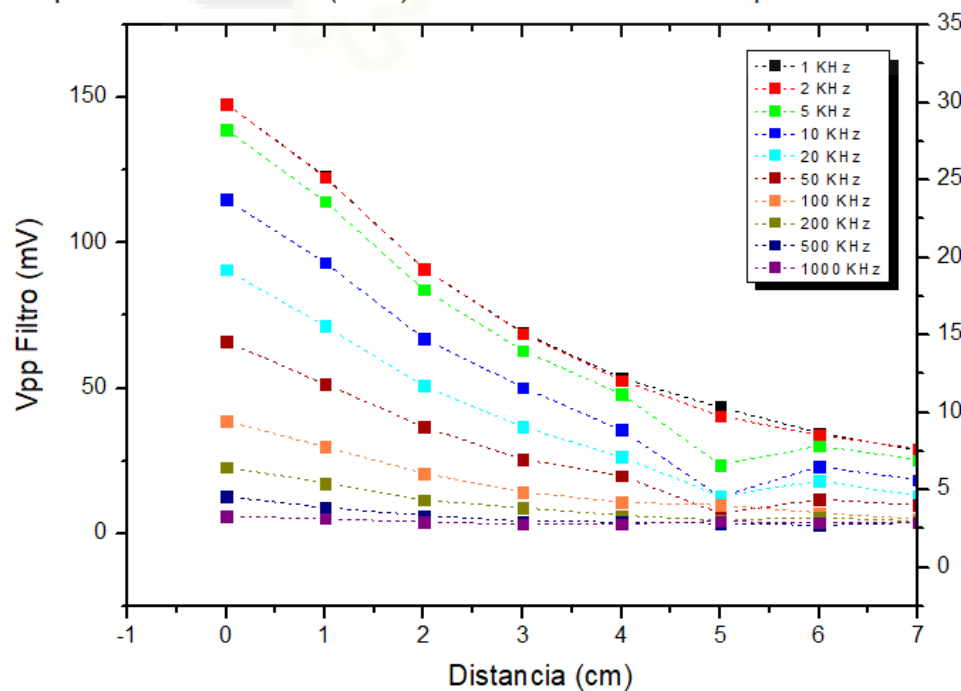


Figura 38. Zoom de la comparación de medidas de Voltaje frente a distancia.

4.11 COMPARACIÓN DE RESULTADOS TOTALES DE LAS MEDIDAS VARIANDO LA FRECUENCIA.

En este apartado muestra la respuesta de la célula 4 dopada con DMF en función de la frecuencia de la señal aplicada, para un conjunto de distancias comprendidas entre 0 y 20 cm. Se representa el valor pico a pico (V_{pp}) de la señal filtrada, permitiendo observar cómo afecta el incremento de la frecuencia a la amplitud de la señal recibida en cada punto de medición.

Respuesta de la célula 4 (DMF) en función de la frecuencia para distintas distancias

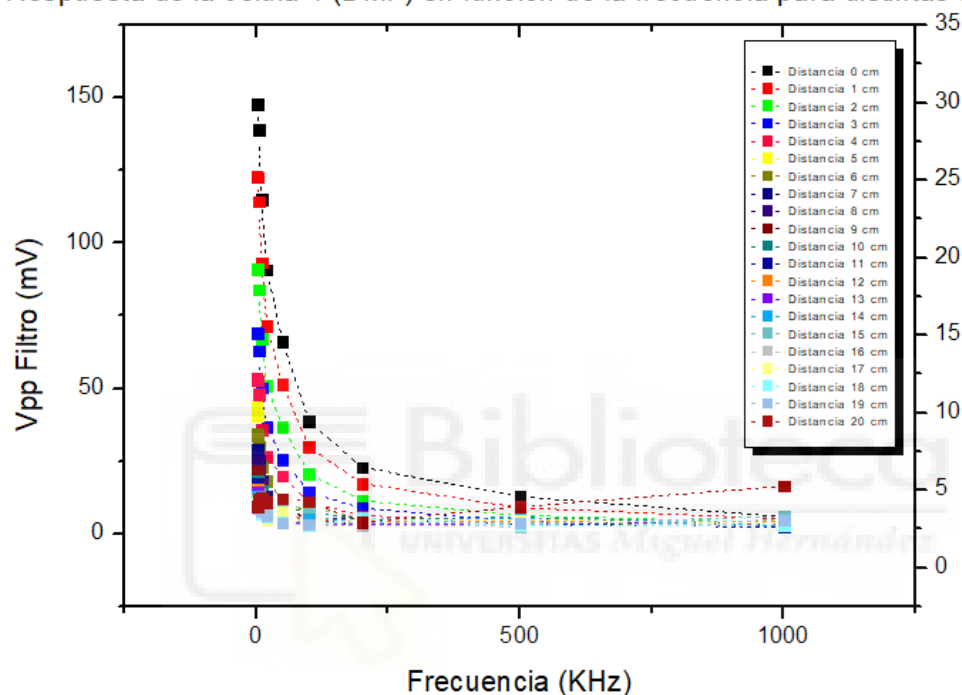


Figura 39. Comparación de medidas de Voltaje frente a frecuencia.

A continuación, se presenta una ampliación del tramo comprendido entre 1 kHz y 50 kHz, con el objetivo de visualizar con mayor detalle el comportamiento de la señal en las frecuencias más bajas.

Respuesta de la célula 4 (DMF) en función de la frecuencia para distintas distancias

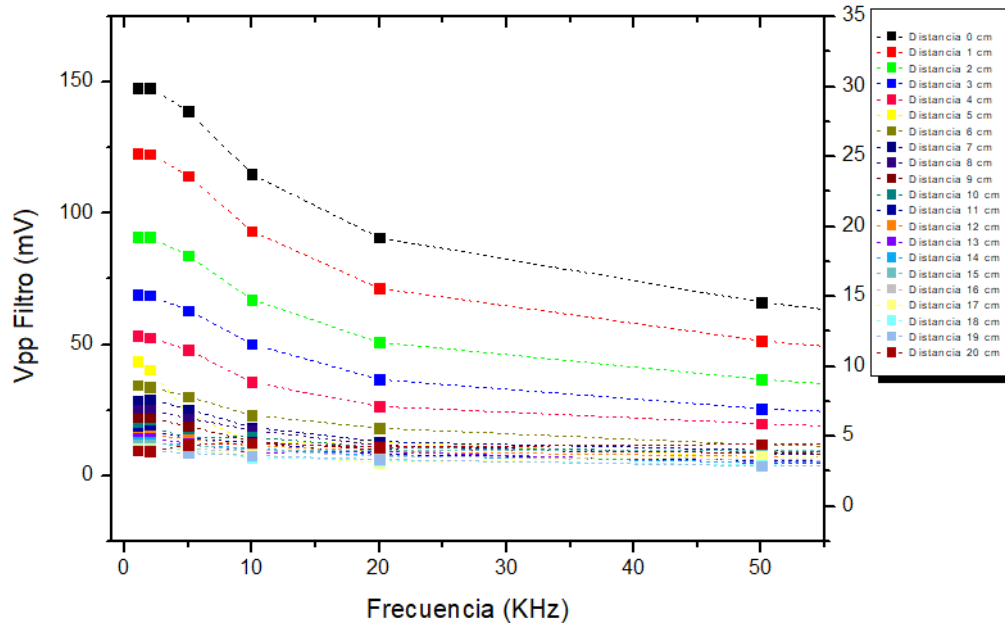


Figura 40. Zoom de la comparación de medidas de Voltaje frente a frecuencia.

5. SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS MEDIANTE MODULACIÓN OOK

Se realizaron pruebas adicionales utilizando la célula dopada con DMF, con el objetivo de lograr la transmisión de información mediante un LED comercial. Hasta el momento, este propósito no se había alcanzado, ya que con señales por debajo de 7,4 mV no era posible reconocer correctamente los caracteres en código ASCII, tal como se había evidenciado en estudios anteriores [12]. No obstante, al incorporar un amplificador no inversor para aumentar la amplitud de la señal, se consiguió llevar a cabo la transmisión de datos de forma satisfactoria. Para ello, se empleó un amplificador operacional LM741CN, que permitió amplificar eficazmente la señal recibida y asegurar su correcta interpretación.

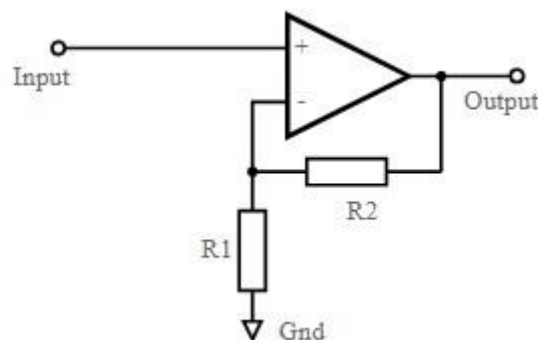


Figura 41. Amplificador no inversor.

El LM741CN está configurado con $R1 = 1 \text{ k}\Omega$ y $R2 = 5,6 \text{ k}\Omega$. Según la fórmula de ganancia para un amplificador no inversor:

$$G = 1 + \frac{R2}{R1} = 1 + \frac{5,6k\Omega}{1k\Omega} = 6,6$$

Sin embargo, debido a las características del circuito y las limitaciones del propio amplificador, se obtuvo una ganancia efectiva aproximada de $\times 4$, suficiente para elevar la señal por encima del umbral de detección necesario para la correcta decodificación.

Gracias a esta configuración, se ha logrado transmitir texto entre dos dispositivos Arduino Due a una frecuencia de 1 kHz, alcanzando una distancia de hasta 4 cm sin presentar errores en la transmisión. A continuación, se presenta una imagen obtenida con el osciloscopio, en la que se observa la señal original (traza amarilla) y la señal recibida (traza azul).

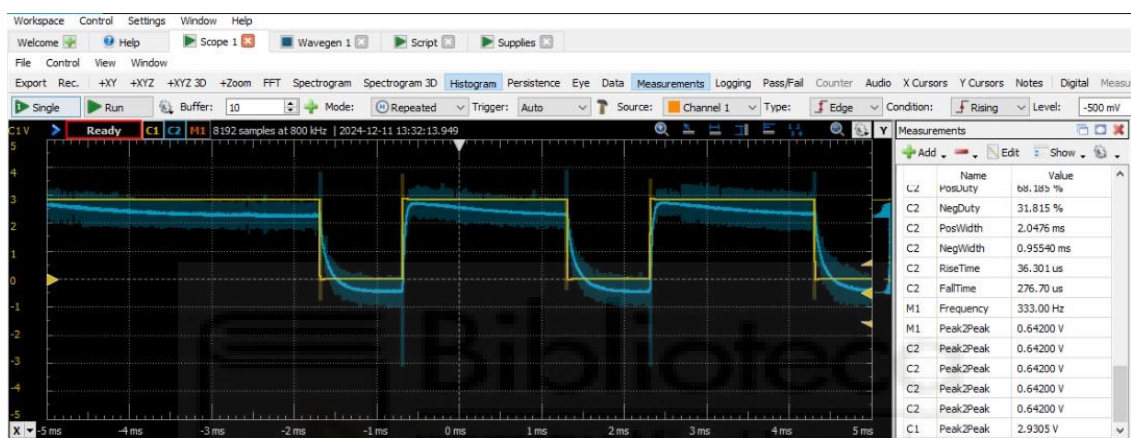


Figura 42. Captura de transmisión de texto en osciloscopio.

La comparación entre ambas señales permite apreciar que la célula DMF es capaz de transmitir la información de manera precisa, sin introducir distorsiones ni ruido apreciable en la señal. Esto demuestra la eficacia del sistema de transmisión implementado, en el que se ha utilizado un amplificador no inversor para potenciar la señal, permitiendo la comunicación a través de un LED comercial. Gracias a esta configuración, se ha conseguido transmitir texto entre dos dispositivos Arduino Due a una frecuencia de 1 kHz, alcanzando distancias de hasta 4 cm sin errores de transmisión.

5.1 TRANSMISIÓN DE DATOS CON ARDUINO DUE Y CÉLULA DMF

Para la transmisión de información, se ha desarrollado un código en Arduino Due que permite enviar texto mediante un sistema de modulación *On-Off Keying* (OOK). La información se transmite a través de un LED comercial, utilizado como emisor de luz, controlado mediante el pin digital 9 del microcontrolador.

El funcionamiento general consiste en recibir un mensaje de texto a través de la interfaz serie (`Serial.readStringUntil("\n")`), que posteriormente se convierte en una secuencia de bits utilizando una función de conversión personalizada (`charToBits()`). Esta función traduce cada carácter en su correspondiente representación binaria de 8 bits.

Para facilitar la sincronización en el proceso de recepción, se ha definido un preámbulo de inicio con la secuencia 11111100, que se añade al comienzo de la transmisión binaria. Además, se utiliza una secuencia de finalización compuesta por 00000000 para indicar el fin de la transmisión actuando como marcador de cierre. Ambas secuencias permiten al receptor identificar correctamente el inicio y el final del mensaje transmitido. Cabe destacar que la longitud máxima del mensaje es de 64 caracteres, incluyendo los espacios y signos de puntuación.

Preambulo	Datos	Marcador de cierre
11111100	Hasta 64 caracteres	00000000

La transmisión se realiza activando y desactivando el LED de acuerdo con el valor de cada bit. Si el bit es un '1', el LED se enciende (HIGH); si es un '0', el LED se apaga (LOW). Esta secuencia se envía a una frecuencia de 1 kHz, controlada por un retardo de 1 milisegundo entre bits (delayTime = 1).

```

if (shouldSend) {
    // Transmitir los datos con modulación OOK
    for (int i = 0; i < length; i++) {
        if (binaryData.charAt(i) == '0') {
            digitalWrite(ledPin, LOW);
        } else if (binaryData.charAt(i) == '1') {
            digitalWrite(ledPin, HIGH);
        }
        delay(delayTime);
    }

    // Apagar el LED al final de la transmisión
    digitalWrite(ledPin, LOW);

    // Resetear las variables
    values = "";
    shouldSend = false;
}
}

```

52 RECEPCIÓN DE DATOS CON ARDUINO DUE Y CÉLULA DMF

El sistema receptor está compuesto por un sensor fotosensible, en este caso una célula DMF, conectada al pin analógico A0 de un Arduino Due. La función principal de este dispositivo es captar la luz emitida por el LED transmisor y convertirla en una señal eléctrica que pueda ser procesada por el microcontrolador.

El código de recepción está diseñado para realizar una demodulación OOK, interpretando la intensidad de la luz recibida en función de dos umbrales:

- `int lowThreshold = 495;` // Umbral inferior para determinar un "0"
- `int highThreshold = 500;` // Umbral superior para determinar un "1"

Estas lecturas se obtienen a través del conversor analógico-digital (ADC) del Arduino Due, configurado en modo de lectura continua para maximizar la velocidad de muestreo:

```
ADC->ADC_MR |= 0x80; // Configura el ADC en modo de ejecución continua
ADC->ADC_CHER = 0x80; // Habilita el ADC en el pin A0
```

La secuencia de bits recibida se almacena en un búfer, que es monitoreado constantemente para detectar la aparición de los preámbulos de inicio y finalización del mensaje. Cuando se detecta el preámbulo inicial, se comienza a capturar el mensaje; este proceso continúa hasta que se identifica el preámbulo final.

Una vez recibidos todos los bits del mensaje, el código agrupa estos en bloques de 8 bits y los convierte en caracteres ASCII mediante la función `processMessage()`. Esta función recorre el mensaje binario recibido, dividiéndolo en segmentos de 8 bits, y utiliza la función `binaryToChar()` para transformar cada bloque en su correspondiente carácter ASCII. Finalmente, muestra el texto reconstruido en el monitor serie.

```
void processMessage(String binaryMessage) {
    // Divide el mensaje en bloques de 8 bits (1 byte)
    for (int i = 0; i < binaryMessage.length(); i += 8) {
        if (i + 8 <= binaryMessage.length()) {
            String byteStr = binaryMessage.substring(i, i + 8); // Extrae 8 bits
            char character = binaryToChar(byteStr); // Convierte los 8 bits a un carácter
            Serial.print(character); // Imprime el carácter en la salida serie
        }
    }
    Serial.println(); // Nueva línea al finalizar el mensaje
}

char binaryToChar(String binary) {
    int value = 0;
    for (int i = 0; i < binary.length(); i++) {
        value = (value << 1) | (binary[i] - '0'); // Convierte el binario a entero
    }
    return char(value); // Devuelve el carácter ASCII correspondiente
}
```

Durante el proceso de comunicación serial entre dispositivos mediante Arduino, el monitor serie muestra los siguientes resultados en dos fases diferenciadas que podemos observar en las siguientes figuras:

Transmisión: En esta etapa, se envía una cadena de caracteres desde el emisor. El sistema convierte esta cadena en su representación binaria antes de transmitirla. Previo al mensaje, se incluye un preámbulo que actúa como secuencia de sincronización, permitiendo al receptor identificar correctamente el inicio del mensaje.

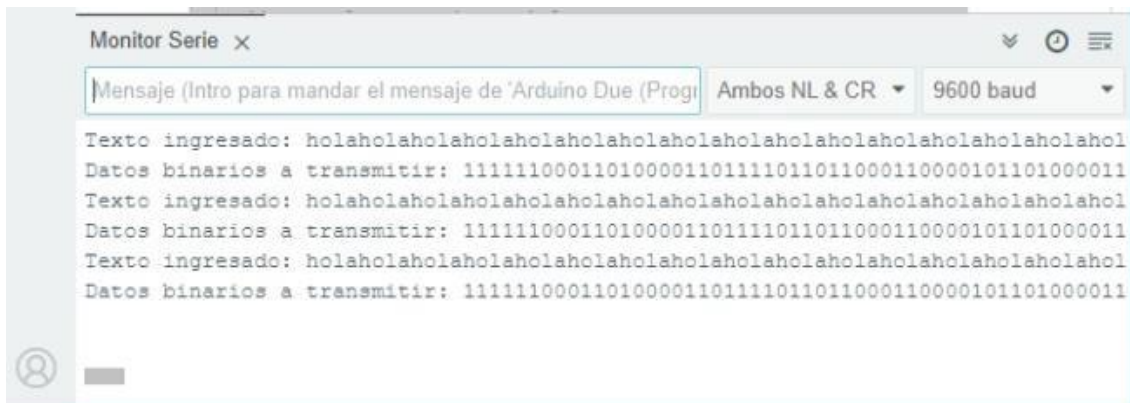
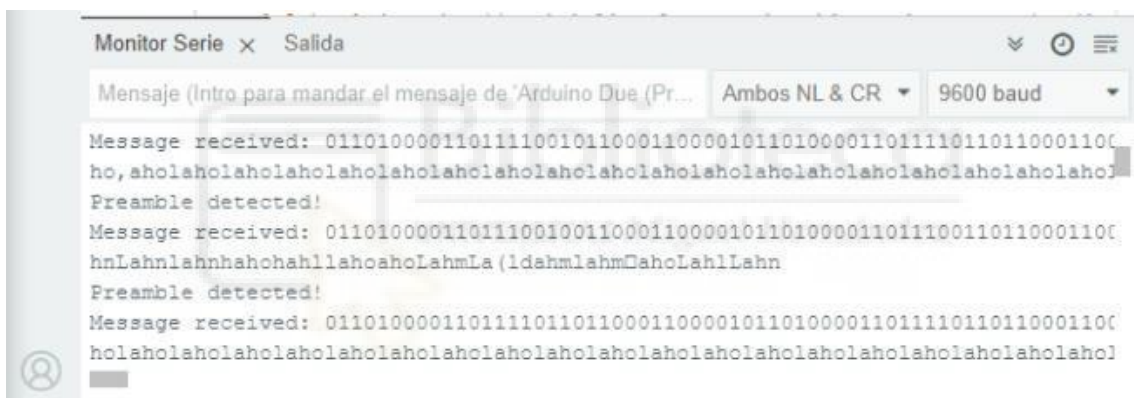


Figura 43. Transmisión de texto en Arduino.

Recepción: El receptor está continuamente monitorizando la línea en busca del preámbulo. Una vez detectado, comienza a recibir los bits del mensaje. El sistema muestra primero la secuencia binaria completa recibida. Posteriormente, esta secuencia es convertida a su equivalente en código ASCII, mostrando finalmente la cadena de caracteres original que fue transmitida.



$\hat{D}istancia\ (cm)$

Figura 44. Recepción de texto en Arduino.

6. CONCLUSIÓN Y LINEAS FUTURAS

6.1 CONCLUSIÓN

Este trabajo da continuidad al proyecto titulado “*Análisis de células fotovoltaicas para comunicaciones Li-Fi usando técnicas de aprendizaje automático mediante regresión y filtrado*” [13]. En esta nueva fase, se ha demostrado la viabilidad del uso de células fotovoltaicas orgánicas como receptores en sistemas de comunicación Li-Fi, integrando además un sistema de filtrado en tiempo real para mejorar la calidad de la señal recibida. A lo largo del desarrollo del proyecto se han llevado a cabo múltiples mediciones, tanto en función de la distancia como de la frecuencia, lo que ha permitido evaluar el rendimiento de distintas células dopadas con disolventes orgánicos e inorgánico, tales como DMF, DMSO, THF, MeOH y Pb.

Tras un análisis comparativo, se seleccionó la célula dopada con DMF (célula 4) como la más adecuada, gracias a su mayor estabilidad y mejor respuesta en amplitud frente a diferentes condiciones de transmisión. Esta célula permitió alcanzar niveles de señal superiores a 7,4 mV, umbral mínimo necesario para garantizar la detección correcta de caracteres en código ASCII, lo cual fue especialmente relevante en la etapa de transmisión de datos.

Uno de los aspectos más relevantes del proyecto ha sido la implementación de un filtro digital Butterworth de segundo orden tipo paso bajo, con una frecuencia de corte de 1 MHz. Esta configuración demostró ser eficaz para eliminar ruido sin distorsionar la señal útil, siendo especialmente necesaria a frecuencias superiores a 50 kHz, donde el ruido se vuelve más significativo. El sistema se complementó con un ajuste dinámico de escala vertical, una exportación automática de datos y un script en WaveForms que automatiza el proceso de medida, mejora la eficiencia y permite una mayor trazabilidad experimental.

Además, el uso de un amplificador operacional LM741CN permitió potenciar la señal recibida por la célula, haciendo posible por primera vez la transmisión exitosa de texto a través de un LED comercial blanco de 5 mm, lo que refuerza el potencial de esta tecnología en aplicaciones de bajo coste y fácil implementación.

En definitiva, este trabajo no solo valida el uso de tecnología Li-Fi basada en células orgánicas e inorgánicas, sino que también abre la puerta a nuevas líneas de investigación enfocadas en la mejora del filtrado, la transmisión de información más compleja y la integración de este tipo de sistemas en entornos reales. La combinación de eficiencia energética, seguridad, bajo coste y simplicidad hace del sistema propuesto una alternativa prometedora para futuras aplicaciones en comunicaciones ópticas inalámbricas.

62 LINEAS FUTURAS

A partir de los resultados obtenidos, se plantean varias líneas de trabajo futuro que permitirían seguir mejorando el rendimiento y la aplicabilidad del sistema propuesto:

- Optimización del filtrado: Explorar el uso de filtros adaptativos o de mayor orden que puedan ajustarse automáticamente a las condiciones del entorno en tiempo real, sin comprometer la forma de la señal.
- Ampliación del rango de transmisión: Analizar configuraciones ópticas, como el uso de lentes o guías de luz, que permitan extender la distancia efectiva entre emisor y receptor sin pérdida significativa de señal.
- Integración con otros protocolos de modulación: Implementar esquemas más complejos que el OOK (On-Off Keying), como PWM, QAM u otros, que podrían mejorar la velocidad y robustez del sistema de transmisión.
- Estudio de nuevos materiales: Investigar el uso de otros disolventes orgánicos o configuraciones de capas en las células fotovoltaicas para mejorar la eficiencia en la captación de luz y la respuesta en distintas condiciones ambientales.
- Desarrollo de un sistema portátil o autónomo: Integrar el sistema en una plataforma compacta y alimentada por energía solar, lo cual permitiría su despliegue en aplicaciones reales de bajo consumo energético.

Estas líneas de investigación no solo contribuirían a perfeccionar el sistema propuesto, sino que también ampliarían su ámbito de aplicación, consolidando el uso de Li-Fi con células fotovoltaicas orgánicas como una alternativa viable, eficiente y sostenible en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sharma, R. R., & Raunak, A. S. (2014). Li-Fi Technology. *International Journal of Computer Technology and Applications*
- [2] Hussein, Y. S., & Annan, A. C. (2019). Li-Fi Technology: High data transmission securely. *Journal of Physics: Conference Series*, 1228(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1228/1/012069>
- [3] Sarkar, A., Agarwal, S., & Nath, A. (2015). Li-Fi technology: data transmission through visible light. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*.
- [4] Khorov, E., & Levitsky, I. (2022). Current Status and Challenges of Li-Fi: IEEE 802.11bb. *IEEE Communications Standards Magazine*, 6(2), 35–41. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100104>

- [5] Russo, C., Ramón, H., Alonso, N., Cicerchia, B., Esnaola, L., & Tessore, J. P. (2016, 14 abril). *Tratamiento masivo de datos utilizando técnicas de machine learning*. <https://repositorio.unnoba.edu.ar/xmlui/handle/23601/107>
- [6] Digilent. (s.f.). “Analog Discovery 2: 100MS/s USB Oscilloscope, Logic Analyzer and Variable Power Supply”. Disponible en: <https://digilent.com/>. [Último acceso: 17-05-2025].
- [7] Arduino due. (s. f.). Arduino Official Store. https://store.arduino.cc/products/arduino-due?srltid=AfmBOorONMqcuVXVlrxl6lty9KQbV_Y-mI-Rp6QIB1mHie967-BByZ-7 [Último acceso: 17-05-2025].
- [8] LM741CN. (s. f.). Carrod. <https://www.carrod.mx/products/lm741-amplificador-operacional> [Último acceso: 17-05-2025]
- [9] Digilent. “WaveForms SDK Reference Manual”, Disponible en: <https://digilent.com/>. [Último acceso: 17-05-2025]
- [10] Software de Arduino | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea. Arduino.cl - Compra Tu Arduino En Línea. <https://arduino.cl/programacion/?srltid=AfmBOop7eX7sG9YWi-yRTFqHLonVdMw9VuFnirDjEpy9sGq0e0CcTMs9> [Último acceso: 12- 03- 2024].
- [11] Jorge García Brea, Trabajo de final de grado, Universidad Miguel Hernández, “Automatización de medidas para sistemas de comunicación por luz visible mediante células orgánicas fotovoltaicas”, Junio 2022.
- [12] Raquel Martínez Campillo, Trabajo de final de grado, Universidad Miguel Hernández, “Diseño de sistema inalámbrico óptico para comunicación y su aplicación en el internet de las cosas”, Septiembre 2018.
- [13] Luis Carlos Mena Rojas, Trabajo de final de grado, Universidad Miguel Hernández, “Análisis de células fotovoltaicas para comunicaciones li-fi usando técnicas de aprendizaje automático mediante regresión y filtrado”, Septiembre 2024.

8. ANEXOS



ANEXO 1: LED ALTA LUMINOSIDAD

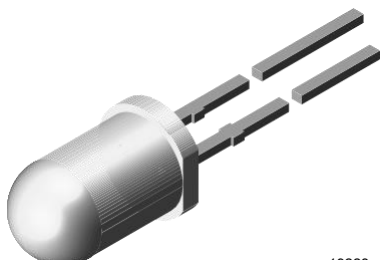


www.vishay.com

TLCS5100, TLCR5100, TLCYG5100, TLCPG5100

Vishay Semiconductors

Ultrabright LED, Ø 5 mm Untinted Non-Diffused Package



19223

DESCRIPTION

The TLC.51.. series is a clear, non-diffused 5 mm LED for high end applications where supreme luminous intensity required.

These lamps with clear untinted plastic case utilize the highly developed ultrabright AlInGaP (AS).

The lens and the viewing angle is optimized to achieve best performance of light output and visibility.

PRODUCT GROUP AND PACKAGE DATA

- Product group: LED
- Package: 5 mm
- Product series: power
- Angle of half intensity: $\pm 9^\circ$

FEATURES

- Untinted non-diffused lens
- Utilizing ultrabright AlInGaP (AS)
- High luminous intensity
- High operating temperature: T_j (chip junction temperature) up to 125 °C for AlInGaP devices
- Luminous intensity and color categorized for each packing unit
- ESD-withstand voltage: up to 2 kV according to JESD22-A114-B
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



RoHS
COMPLIANT
HALOGEN
FREE
GREEN
(5-2008)

APPLICATIONS

- Interior and exterior lighting
- Outdoor LED panels
- Instrumentation and front panel indicators
- Central high mounted stop lights (CHMSL) for motor vehicles
- Replaces incandescent lamps
- Traffic signals
- Light guide design

PARTS TABLE

PART	COLOR	LUMINOUS INTENSITY (mcd)			at I_F (mA)	WAVELENGTH (nm)			at I_F (mA)	FORWARD VOLTAGE (V)			at I_F (mA)	TECHNOLOGY
		MIN.	TYP.	MAX.		MIN.	TYP.	MAX.		MIN.	TYP.	MAX.		
TLCS5100	Super red	2400	7500	-	50	626	630	638	50	-	2.1	2.7	50	AlInGaP on GaAs
TLCR5100	Red	4300	11 000	-	50	611	616	622	50	-	2.1	2.7	50	AlInGaP on GaAs
TLCYG5100	Yellow green	1350	3500	-	50	565	572	576	50	-	2.2	2.7	50	AlInGaP on GaAs
TLCPG5100	Pure green	430	1250	-	50	555	562	567	50	-	2.1	2.7	50	AlInGaP on GaAs

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)

TLCS5100, TLCR5100, TLCYG5100, TLCPG5100

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage ⁽¹⁾		V_R	5	V
DC forward current	$T_{amb} \leq 85^\circ\text{C}$	I_F	50	mA
Surge forward current	$t_p \leq 10 \mu\text{s}$	I_{FSM}	1	A
Power dissipation		P_V	135	mW
Junction temperature		T_j	125	$^\circ\text{C}$
Operating temperature range		T_{amb}	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	$t \leq 5 \text{ s}$, 2 mm from body	T_{sd}	260	$^\circ\text{C}$
Thermal resistance junction to ambient		R_{thJA}	300	K/W

**OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)
TLCS5100, SUPER RED

PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Luminous intensity ⁽¹⁾	$I_F = 50\text{ mA}$	TLCS5100	I_V	2400	7500	-	mcd
Dominant wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_d	626	630	638	nm
Peak wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_p	-	641	-	nm
Spectral bandwidth at 50 % $I_{rel\ max.}$	$I_F = 50\text{ mA}$		$\otimes\lambda$	-	20	-	nm
Angle of half intensity	$I_F = 50\text{ mA}$		ϕ	-	± 9	-	$^{\circ}$
Forward voltage	$I_F = 50\text{ mA}$		V_F	-	2.1	2.7	V
Reverse voltage	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$		V_R	5	-	-	V
Temperature coefficient of V_F	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{VF}	-	-2	-	mV/K
Temperature coefficient of λ_d	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{λ_d}	-	0.04	-	nm/K

Note⁽¹⁾ In one packing unit $I_{Vmax}/I_{Vmin.} \leq 2.0$ **OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)
TLCR5100, RED

PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Luminous intensity ⁽¹⁾	$I_F = 50\text{ mA}$	TLCR5100	I_V	4300	11 000	-	mcd
Dominant wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_d	611	616	622	nm
Peak wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_p	-	622	-	nm
Spectral bandwidth at 50 % $I_{rel\ max.}$	$I_F = 50\text{ mA}$		$\otimes\lambda$	-	18	-	nm
Angle of half intensity	$I_F = 50\text{ mA}$		ϕ	-	± 9	-	$^{\circ}$
Forward voltage	$I_F = 50\text{ mA}$		V_F	-	2.1	2.7	V
Reverse voltage	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$		V_R	5	-	-	V
Temperature coefficient of V_F	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{VF}	-	-3.5	-	mV/K
Temperature coefficient of λ_d	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{λ_d}	-	0.05	-	nm/K

Note⁽¹⁾ In one packing unit $I_{Vmax}/I_{Vmin.} \leq 2.0$ **OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)
TLCYG5100, YELLOW GREEN

PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Luminous intensity ⁽¹⁾	$I_F = 50\text{ mA}$	TLCYG5100	I_V	1350	3500	-	mcd
Dominant wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_d	565	572	576	nm
Peak wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_p	-	574	-	nm
Spectral bandwidth at 50 % $I_{rel\ max.}$	$I_F = 50\text{ mA}$		$\otimes\lambda$	-	15	-	nm
Angle of half intensity	$I_F = 50\text{ mA}$		ϕ	-	± 9	-	$^{\circ}$
Forward voltage	$I_F = 50\text{ mA}$		V_F	-	2.2	2.7	V
Reverse voltage	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$		V_R	5	-	-	V
Temperature coefficient of V_F	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{VF}	-	-4.5	-	mV/K
Temperature coefficient of λ_d	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{λ_d}	-	0.1	-	nm/K

Note⁽¹⁾ In one packing unit $I_{Vmax}/I_{Vmin.} \leq 2.0$

**OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)
TLCPG5100, PURE GREEN

PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Luminous intensity ⁽¹⁾	$I_F = 50\text{ mA}$	TLCPG5100	I_V	430	1250	-	mcd
Dominant wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_d	555	562	567	nm
Peak wavelength	$I_F = 50\text{ mA}$		λ_p	-	563	-	nm
Spectral bandwidth at 50 % $I_{rel\text{ max.}}$	$I_F = 50\text{ mA}$		$\otimes\lambda$	-	20	-	nm
Angle of half intensity	$I_F = 50\text{ mA}$		ϕ	-	± 9	-	$^{\circ}$
Forward voltage	$I_F = 50\text{ mA}$		V_F	-	2.1	2.7	V
Reverse voltage	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$		V_R	5	-	-	V
Temperature coefficient of V_F	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{VF}	-	-3.5	-	mV/K
Temperature coefficient of λ_d	$I_F = 50\text{ mA}$		TC_{λ_d}	-	0.1	-	nm/K

Note

⁽¹⁾ In one packing unit $I_{Vmax}/I_{Vmin.} \leq 2.0$

LUMINOUS INTENSITY CLASSIFICATION

GROUP STANDARD	LUMINOUS INTENSITY (mcd)	
	MIN.	MAX.
BB	430	860
CC	575	1150
DD	750	1500
EE	1000	2000
FF	1350	2700
GG	1800	3600
HH	2400	4800
II	3200	6400
KK	4300	8600
LL	5750	11 500
MM	7500	15 000
NN	10 000	20 000
PP	13 500	27 000
QQ	18 000	36 000
RR	24 000	48 000
SS	32 000	64 000
TT	43 000	86 000
UU	57 500	115 000

Note

- Luminous intensity is tested at a current pulse duration of 25 ms and an accuracy of $\pm 11\%$.
The above type numbers represent the order groups which include only a few brightness groups. Only one group will be shipped on each bag (there will be no mixing of two groups on each bag).
In order to ensure availability, single brightness groups will not be orderable.
In a similar manner for colors where wavelength groups are measured and binned, single wavelength groups will be shipped in any one bag.
In order to ensure availability, single wavelength groups will not be orderable



COLOR CLASSIFICATION						
GROUP	DOM. WAVELENGTH (nm)					
	RED		YELLOW GREEN		PURE GREEN	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
0	-	-	-	-	555	559
1	611	618	-	-	558	561
2	614	622	-	-	560	563
3	-	-	-	-	562	565
4	-	-	-	-	564	567
5	-	-	565	570	-	-
6	-	-	567	572	-	-
7	-	-	569	574	-	-
8	-	-	571	576	-	-

Note

- Wavelengths are tested at a current pulse duration of 25 ms and an accuracy of ± 1 nm

TYPICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)

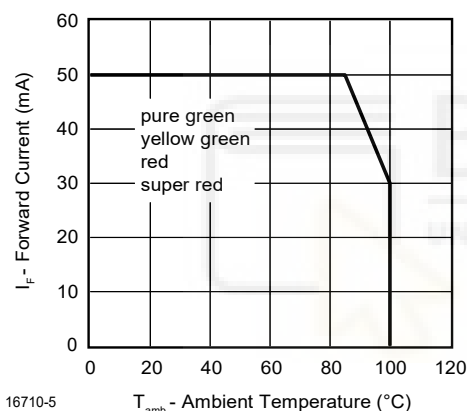


Fig. 1 - Forward Current vs. Ambient Temperature

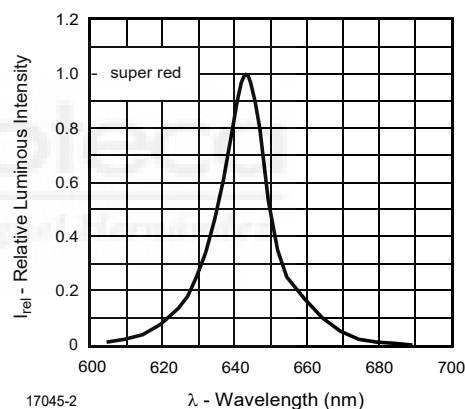


Fig. 3 - Relative Intensity vs. Wavelength

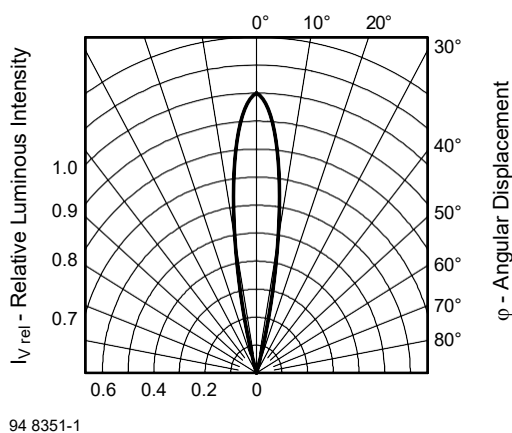


Fig. 2 - Relative Luminous Intensity vs. Angular Displacement

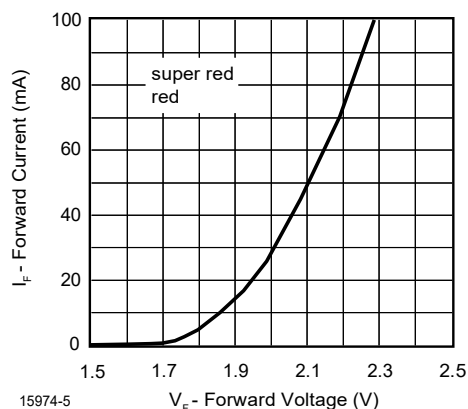


Fig. 4 - Forward Current vs. Forward Voltage

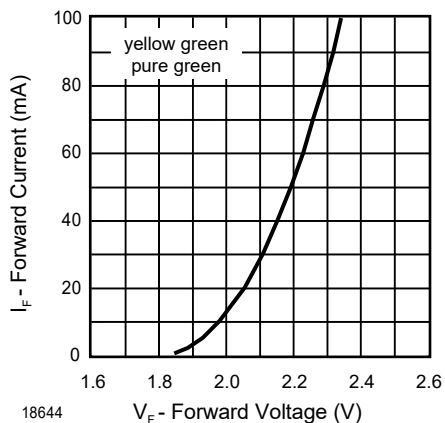


Fig. 5 - Forward Current vs. Forward Voltage

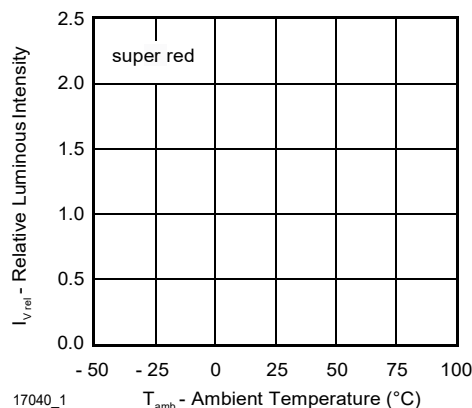


Fig. 8 - Relative Luminous Intensity vs. Ambient Temperature

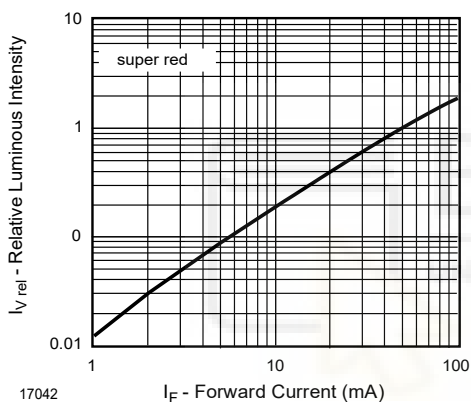


Fig. 6 - Relative Luminous Intensity vs. Forward Current

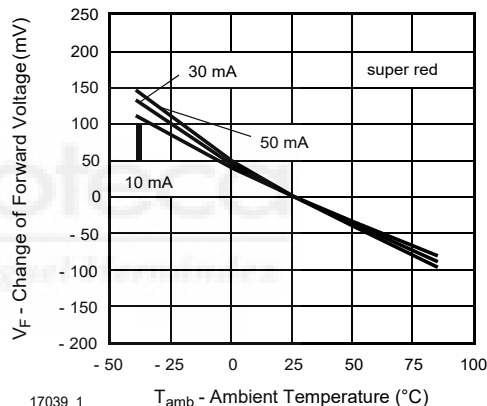


Fig. 9 - Change of Forward Voltage vs. Ambient Temperature

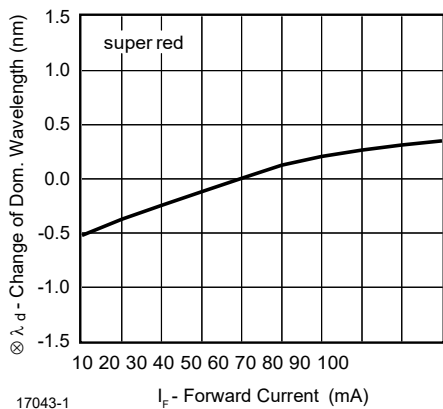


Fig. 7 - Change of Dominant Wavelength vs. Ambient Temperature

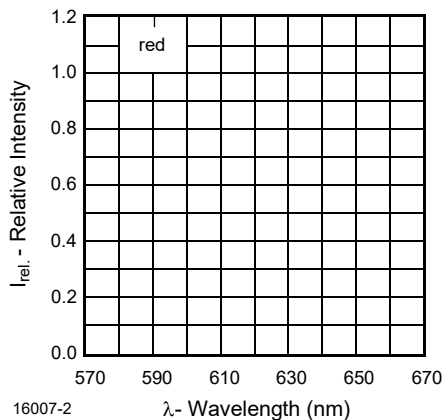


Fig. 10 - Relative Intensity vs. Wavelength

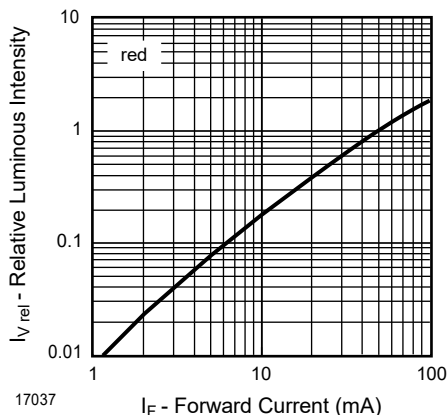


Fig. 11 - Relative Luminous Intensity vs. Forward Current

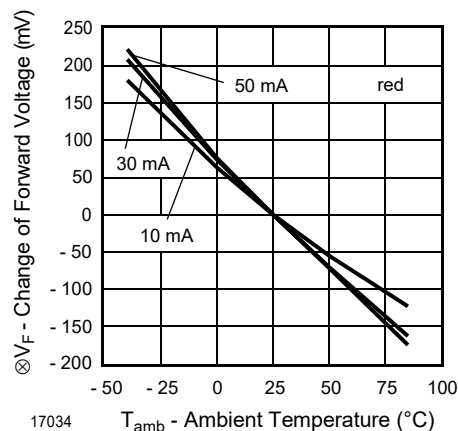


Fig. 14 - Change of Forward Voltage vs. Ambient Temperature

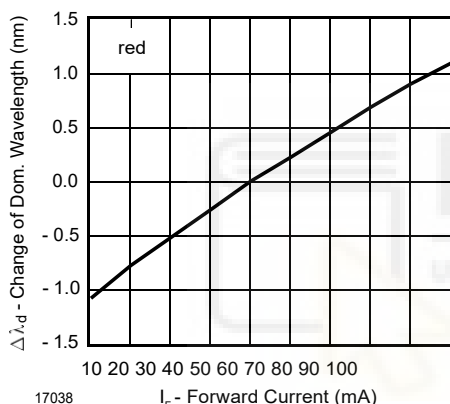


Fig. 12 - Changes of Dominant Wavelength vs. Forward Current

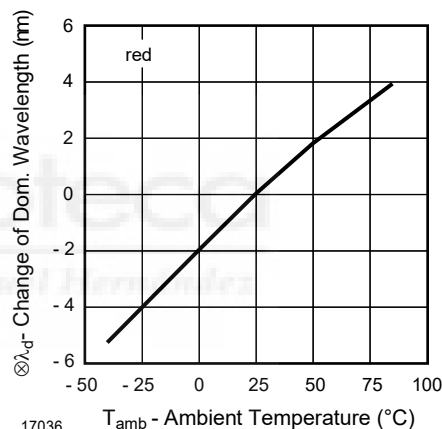


Fig. 15 - Change of Dominant Wavelength vs. Ambient Temperature

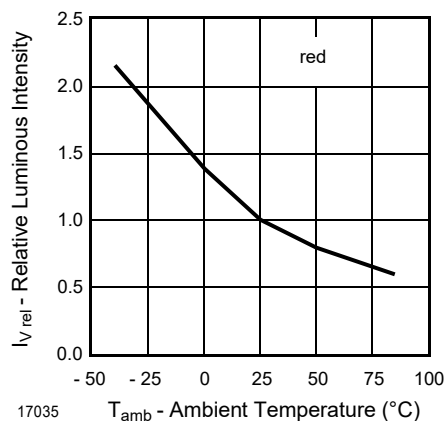


Fig. 13 - Relative Luminous Intensity vs. Ambient Temperature

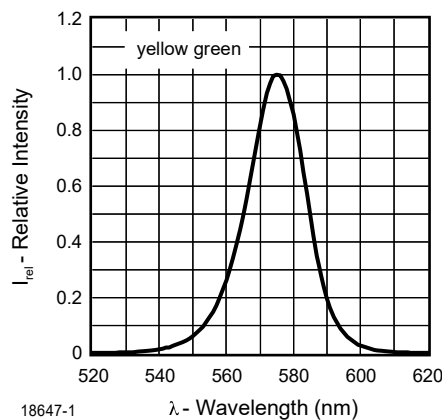


Fig. 16 - Relative Intensity vs. Wavelength

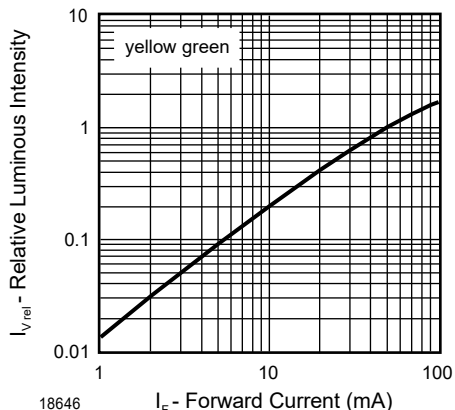


Fig. 17 - Relative Luminous Intensity vs. Forward Current

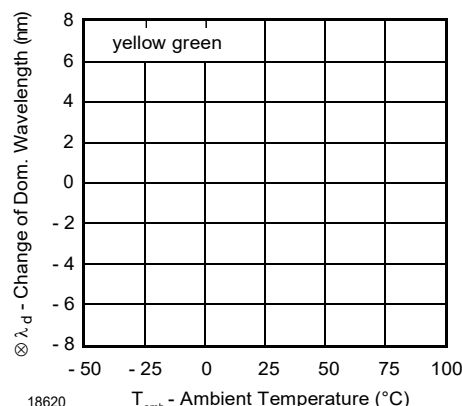


Fig. 20 - Change of Dominant Wavelength vs. Ambient Temperature

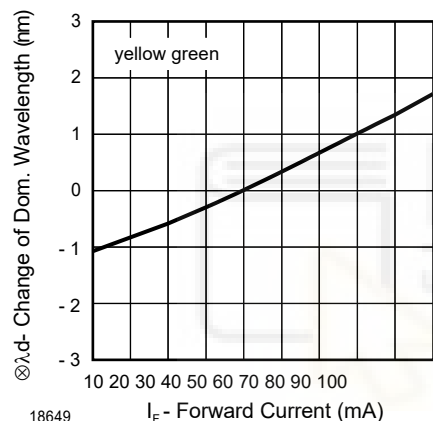


Fig. 18 - Change of Dominant Wavelength vs. Forward Current

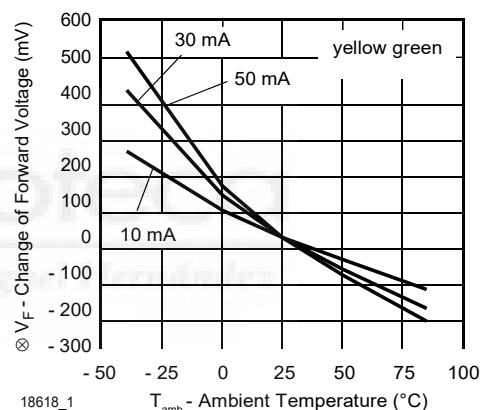


Fig. 21 - Change of Forward Voltage vs. Ambient Temperature

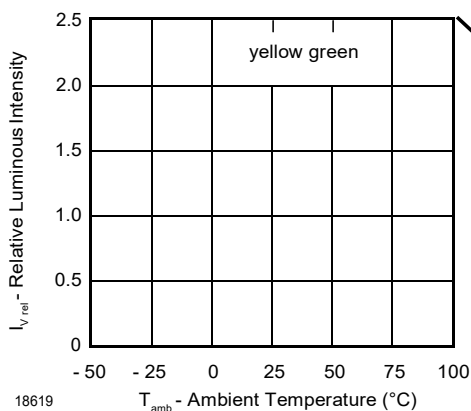


Fig. 19 - Relative Luminous Intensity vs. Ambient Temperature

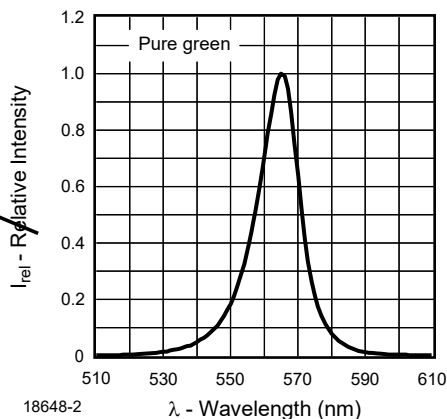


Fig. 22 - Relative Intensity vs. Wavelength

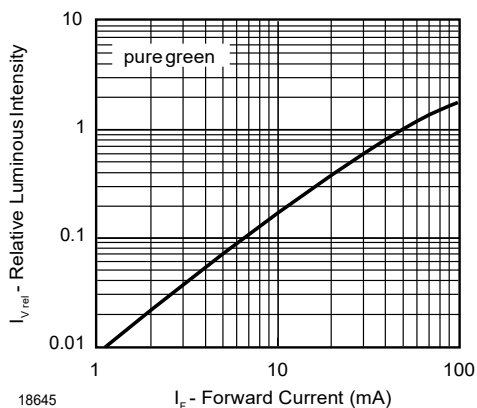


Fig. 23 - Relative Luminous Intensity vs. Forward Current

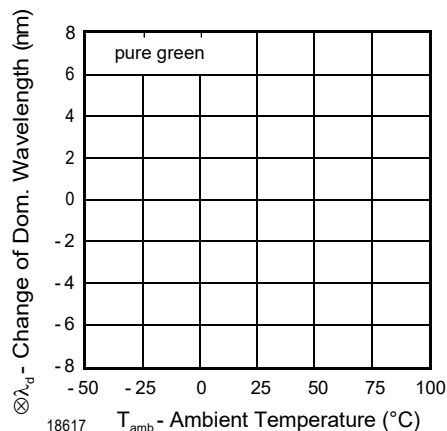


Fig. 26 - Change of Dominant Wavelength vs. Ambient Temperature

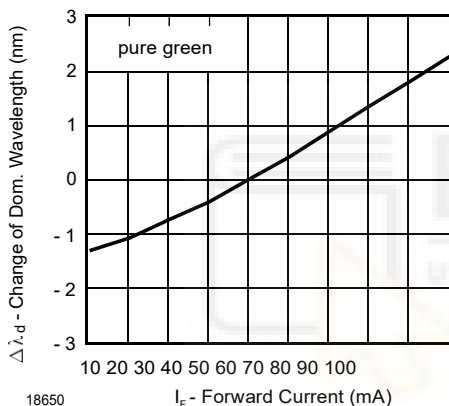


Fig. 24 - Change of Dominant Wavelength vs. Forward Current

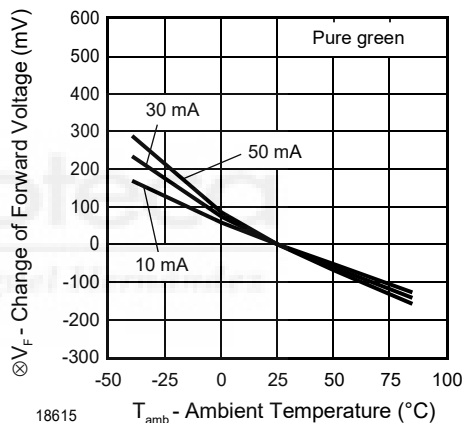


Fig. 27 - Change of Forward Voltage vs. Ambient Temperature

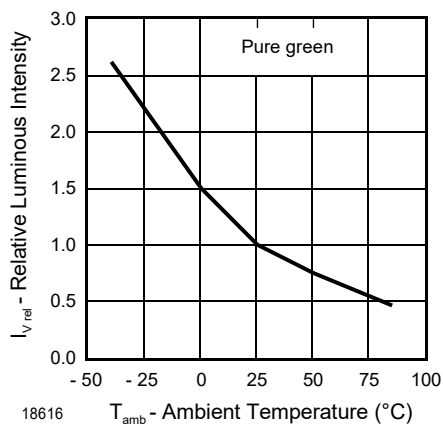
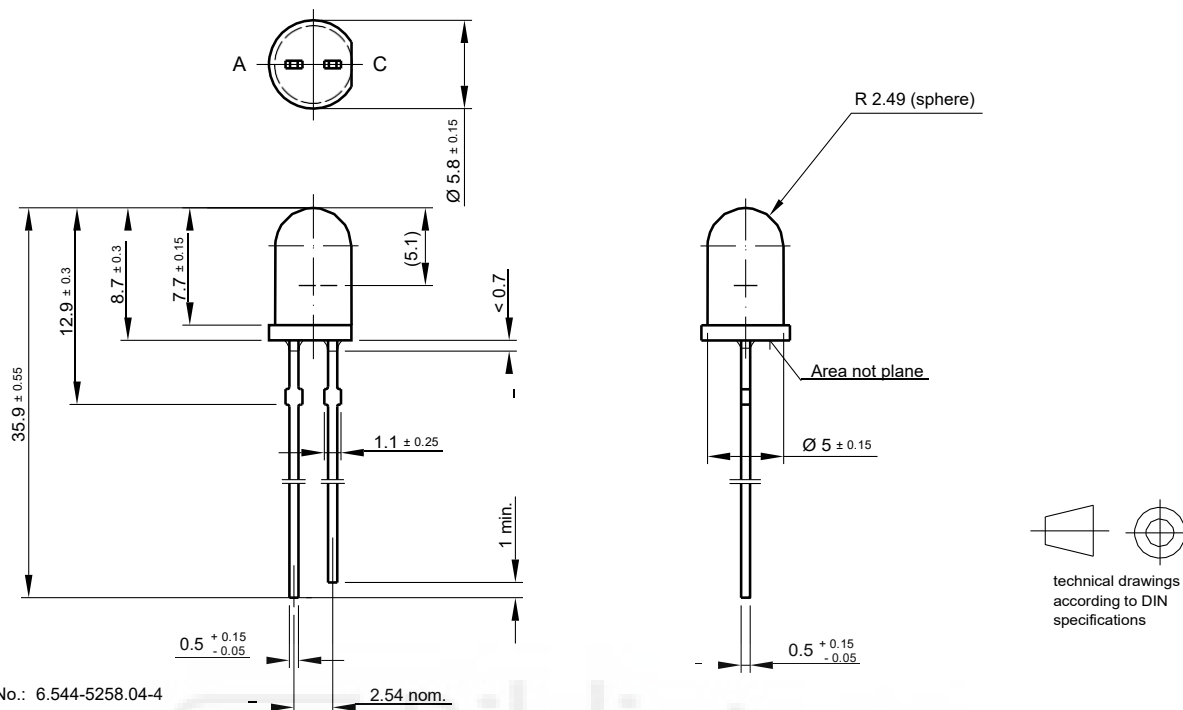


Fig. 25 - Relative Luminous Intensity vs. Ambient Temperature



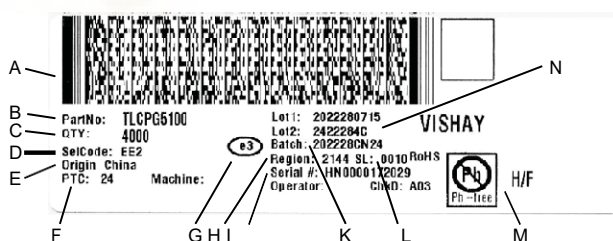
PACKAGE DIMENSIONS in millimeters



Drawing-No.: 6.544-5258.04-4
Issue: 9; 23.07.10
96 12121

PACKING		
MATERIAL	PACKING	QUANTITY
TLCx5100	Bulk	4000

BAR CODE PRODUCT LABEL (example)



- A. 2D barcode
- B. Part No: Vishay part number
- C. QTY: quantity
- D. SelCode: selection bin code
- E. Country of origin
- F. PTC: production plant code
- G. Termination finish
- H. Region code
- I. Serial#: serial number
- K. Batch number: year, week, country code, plant code
- L. SL: storage location
- M. Environmental symbols: RoHS, lead (Pb)-free, halogen-free
- N. Lot numbers



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Hyperlinks included in this datasheet may direct users to third-party websites. These links are provided as a convenience and for informational purposes only. Inclusion of these hyperlinks does not constitute an endorsement or an approval by Vishay of any of the products, services or opinions of the corporation, organization or individual associated with the third-party website. Vishay disclaims any and all liability and bears no responsibility for the accuracy, legality or content of the third-party website or for that of subsequent links.

Vishay products are not designed for use in life-saving or life-sustaining applications or any application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death unless specifically qualified in writing by Vishay. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

ANEXO 2: AMPLIFICADOR OPERACIONAL



LM741

SNOSC25D –MAY 1998–REVISED OCTOBER 2015

LM741 Operational Amplifier

1 Features

- Overload Protection on the Input and Output
- No Latch-Up When the Common-Mode Range is Exceeded

2 Applications

- Comparators
- Multivibrators
- DC Amplifiers
- Summing Amplifiers
- Integrator or Differentiators
- Active Filters

3 Description

The LM741 series are general-purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439, and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common-mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

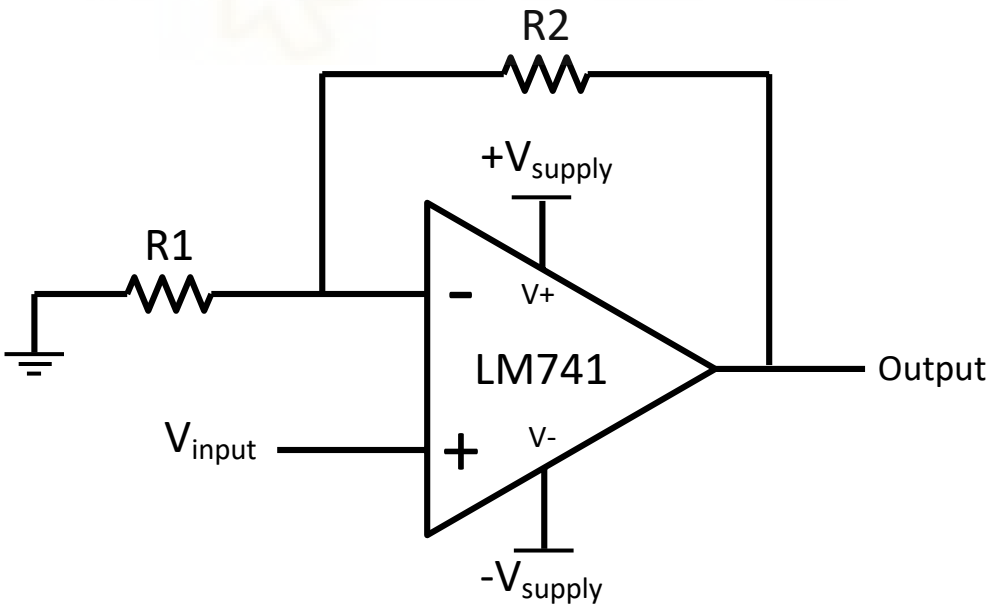
The LM741C is identical to the LM741 and LM741A except that the LM741C has their performance ensured over a 0°C to +70°C temperature range, instead of –55°C to +125°C.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM741	TO-99 (8)	9.08 mm × 9.08 mm
	CDIP (8)	10.16 mm × 6.502 mm
	PDIP (8)	9.81 mm × 6.35 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Typical Application



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Table of Contents

1 Features	1	7.3 Feature Description	7
2 Applications	1	7.4 Device Functional Modes	8
3 Description	1	8 Application and Implementation	9
4 Revision History	2	8.1 Application Information	9
5 Pin Configuration and Functions	3	8.2 Typical Application	9
6 Specifications	4	9 Power Supply Recommendations	10
6.1 Absolute Maximum Ratings	4	10 Layout	11
6.2 ESD Ratings	4	10.1 Layout Guidelines	11
6.3 Recommended Operating Conditions	4	10.2 Layout Example	11
6.4 Thermal Information	4	11 Device and Documentation Support	12
6.5 Electrical Characteristics, LM741	5	11.1 Community Resources	12
6.6 Electrical Characteristics, LM741A	5	11.2 Trademarks	12
6.7 Electrical Characteristics, LM741C	6	11.3 Electrostatic Discharge Caution	12
7 Detailed Description	7	11.4 Glossary	12
7.1 Overview	7	12 Mechanical, Packaging, and Orderable Information	12
7.2 Functional Block Diagram	7		

4 Revision History

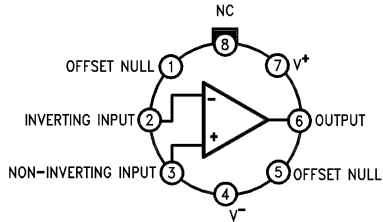
NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

Changes from Revision C (October 2004) to Revision D	Page
• Added <i>Applications</i> section, <i>Pin Configuration and Functions</i> section, <i>ESD Ratings</i> table, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i> , <i>Application and Implementation</i> section, <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section	1
• Removed NAD 10-Pin CLGA pinout	3
• Removed obsolete M (S0-8) package from the data sheet	4
• Added recommended operating supply voltage spec	4
• Added recommended operating temperature spec	4

Changes from Revision C (March 2013) to Revision D	Page
• Added <i>Applications</i> section, <i>Pin Configuration and Functions</i> section, <i>ESD Ratings</i> table, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i> , <i>Application and Implementation</i> section, <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section	1
• Removed NAD 10-Pin CLGA pinout	3
• Removed obsolete M (S0-8) package from the data sheet	4
• Added recommended operating supply voltage spec	4
• Added recommended operating temperature spec	4

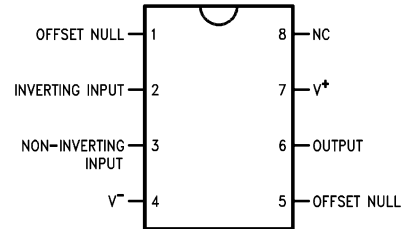
5 Pin Configuration and Functions

**LMC Package
8-Pin TO-99
Top View**



LM741H is available per JM38510/10101

**NAB Package
8-Pin CDIP or PDIP
Top View**



Pin Functions

PIN		I/O	DESCRIPTION
NAME	NO.		
INVERTING INPUT	2	I	Inverting signal input
NC	8	N/A	No Connect, should be left floating
NONINVERTING INPUT	3	I	Noninverting signal input
OFFSET NULL	1, 5	I	Offset null pin used to eliminate the offset voltage and balance the input voltages.
OFFSET NULL			
OUTPUT	6	O	Amplified signal output
V+	7	I	Positive supply voltage
V-	4	I	Negative supply voltage

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage	LM741, LM741A		±22	V
	LM741C		±18	
Power dissipation ⁽⁴⁾			500	mW
Differential input voltage			±30	V
Input voltage ⁽⁵⁾			±15	V
Output short circuit duration			Continuous	
Operating temperature	LM741, LM741A	–50	125	°C
	LM741C	0	70	
Junction temperature	LM741, LM741A		150	°C
	LM741C		100	
Soldering information	PDIP package (10 seconds)		260	°C
	CDIP or TO-99 package (10 seconds)		300	°C
Storage temperature, T _{stg}		–65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.
- (3) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/Distributors for availability and specifications.
- (4) For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and T_j max. (listed under “Absolute Maximum Ratings”). T_j = T_A + (θ_{JA} P_D).
- (5) For supply voltages less than ±15 V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

6.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
V _(ESD)	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	±400	V

- (1) Level listed above is the passing level per ANSI, ESDA, and JEDEC JS-001. JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage (VDD-GND)	LM741, LM741A	±10	±15	±22	V
	LM741C	±10	±15	±18	
Temperature	LM741, LM741A	–55		125	°C
	LM741C	0		70	

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾	LM741			UNIT
	LMC (TO-99)	NAB (CDIP)	P (PDIP)	
	8 PINS	8 PINS	8 PINS	
R _{θJA} Junction-to-ambient thermal resistance	170	100	100	°C/W
R _{θJC(top)} Junction-to-case (top) thermal resistance	25	—	—	°C/W

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).

6.5 Electrical Characteristics, LM741⁽¹⁾

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage		$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
			$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range		$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{ V}$			± 15		mV
Input offset current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	μA
Input resistance		$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{ V}$		0.3	2		M Ω
Input voltage range		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		± 12	± 13		V
Large signal voltage gain		$V_S = \pm 15\text{ V}$, $V_O = \pm 10\text{ V}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
			$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	25			
Output voltage swing		$V_S = \pm 15\text{ V}$	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	± 12	± 14		V
			$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	± 10	± 13		
Output short circuit current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			25		mA
Common-mode rejection ratio		$R_S \leq 10\text{ }\Omega$, $V_{\text{CM}} = \pm 12\text{ V}$, $T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		80	95		dB
Supply voltage rejection ratio		$V_S = \pm 20\text{ V}$ to $V_S = \pm 5\text{ V}$, $R_S \leq 10\text{ }\Omega$, $T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		86	96		dB
Transient response	Rise time	$T_A = 25^\circ\text{C}$, unity gain			0.3		μs
	Overshoot				5%		
Slew rate		$T_A = 25^\circ\text{C}$, unity gain			0.5		V/ μs
Supply current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			1.7	2.8	mA
Power consumption		$V_S = \pm 15\text{ V}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	85		mW
			$T_A = T_{\text{AMIN}}$	60	100		
			$T_A = T_{\text{AMAX}}$	45	75		

(1) Unless otherwise specified, these specifications apply for $V_S = \pm 15 \text{ V}$, $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$.

6.6 Electrical Characteristics, LM741A⁽¹⁾

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 50 \text{ }\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.8	3	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			4	mV
Average input offset voltage drift					15	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20 \text{ V}$		± 10			mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			3	30	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				70	
Average input offset current drift					0.5	nA/ $^\circ\text{C}$
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			30	80	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				0.21	μA
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20 \text{ V}$		1	6		M Ω
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$, $V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.5			
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 20 \text{ V}$, $V_O = \pm 15 \text{ V}$, $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50			V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	32			
	$V_S = \pm 5 \text{ V}$, $V_O = \pm 2 \text{ V}$, $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$, $T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		10			

(1) Unless otherwise specified, these specifications apply for $V_S = \pm 15 \text{ V}$, $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$.

LM741

SNOSC25D – MAY 1998 – REVISED OCTOBER 2015

www.ti.com

Electrical Characteristics, LM741A⁽¹⁾ (continued)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Output voltage swing		$V_S = \pm 20\text{ V}$	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	± 16			V
			$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	± 15			
Output short circuit current		$T_A = 25^\circ\text{C}$		10	25	35	mA
		$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$		10		40	
Common-mode rejection ratio		$R_S \leq 50\ \Omega$, $V_{CM} = \pm 12\text{ V}$, $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$		80	95		dB
Supply voltage rejection ratio		$V_S = \pm 20\text{ V}$ to $V_S = \pm 5\text{ V}$, $R_S \leq 50\ \Omega$, $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$		86	96		dB
Transient response	Rise time	$T_A = 25^\circ\text{C}$, unity gain		0.25		0.8	μs
	Overshoot			6%		20%	
Bandwidth ⁽²⁾		$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.437	1.5		MHz
Slew rate		$T_A = 25^\circ\text{C}$, unity gain		0.3	0.7		V/ μs
Power consumption		$V_S = \pm 20\text{ V}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	80		150	mW
			$T_A = T_{AMIN}$			165	
			$T_A = T_{AMAX}$			135	

(2) Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time (μs).

6.7 Electrical Characteristics, LM741C⁽¹⁾

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage		$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		2	6	mV
			$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			7.5	mV
Input offset voltage adjustment range		$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{ V}$			± 15		mV
Input offset current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
		$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				300	
Input bias current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
		$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				0.8	μA
Input resistance		$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{ V}$		0.3	2		M Ω
Input voltage range		$T_A = 25^\circ\text{C}$		± 12	± 13		V
Large signal voltage gain		$V_S = \pm 15\text{ V}$, $V_O = \pm 10\text{ V}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	20	200		V/mV
			$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	15			
Output voltage swing		$V_S = \pm 15\text{ V}$	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	± 12	± 14		V
			$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	± 10	± 13		
Output short circuit current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			25		mA
Common-mode rejection ratio		$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$, $V_{CM} = \pm 12\text{ V}$, $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$		70	90		dB
Supply voltage rejection ratio		$V_S = \pm 20\text{ V}$ to $V_S = \pm 5\text{ V}$, $R_S \leq 10\text{ }\Omega$, $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$		77	96		dB
Transient response	Rise time	$T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain			0.3		μs
	Overshoot				5%		
Slew rate		$T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain			0.5		V/ μs
Supply current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			1.7	2.8	mA
Power consumption		$V_S = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$			50	85	mW

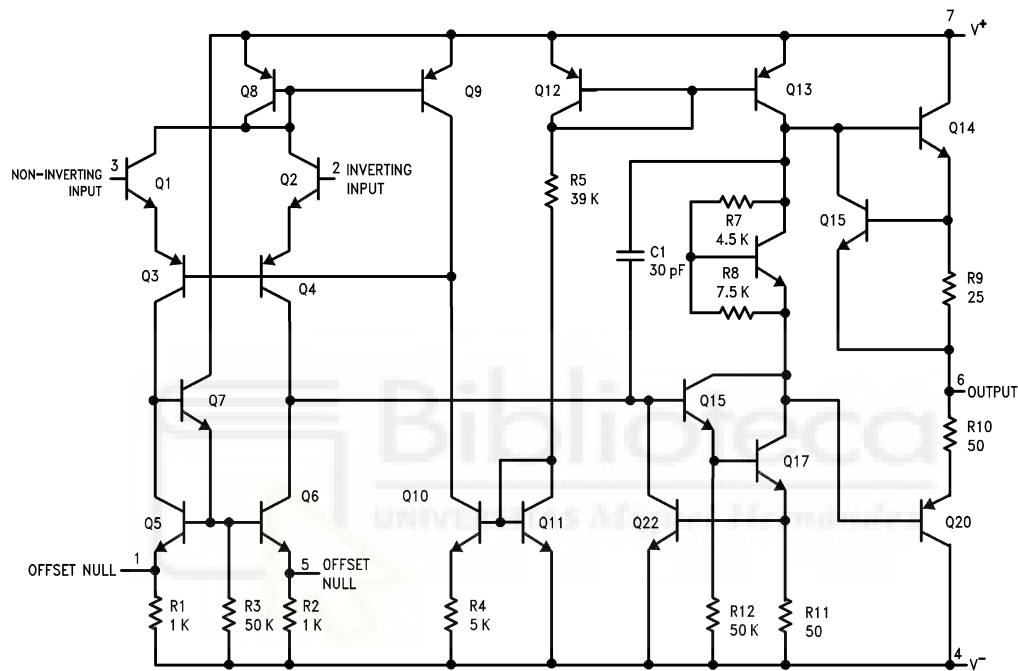
(1) Unless otherwise specified, these specifications apply for $V_S = \pm 15\text{ V}$, $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$.

7 Detailed Description

7.1 Overview

The LM74 devices are general-purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. It is intended for a wide range of analog applications. The high gain and wide range of operating voltage provide superior performance in integrator, summing amplifier, and general feedback applications. The LM741 can operate with a single or dual power supply voltage. The LM741 devices are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439, and 748 in most applications.

7.2 Functional Block Diagram



7.3 Feature Description

7.3.1 Overload Protection

The LM741 features overload protection circuitry on the input and output. This prevents possible circuit damage to the device.

7.3.2 Latch-up Prevention

The LM741 is designed so that there is no latch-up occurrence when the common-mode range is exceeded. This allows the device to function properly without having to power cycle the device.

7.3.3 Pin-to-Pin Capability

The LM741 is pin-to-pin direct replacements for the LM709C, LM201, MC1439, and LM748 in most applications. Direct replacement capabilities allows flexibility in design for replacing obsolete parts.

7.4 Device Functional Modes

7.4.1 Open-Loop Amplifier

The LM741 can be operated in an open-loop configuration. The magnitude of the open-loop gain is typically large thus for a small difference between the noninverting and inverting input terminals, the amplifier output will be driven near the supply voltage. Without negative feedback, the LM741 can act as a comparator. If the inverting input is held at 0 V, and the input voltage applied to the noninverting input is positive, the output will be positive. If the input voltage applied to the noninverting input is negative, the output will be negative.

7.4.2 Closed-Loop Amplifier

In a closed-loop configuration, negative feedback is used by applying a portion of the output voltage to the inverting input. Unlike the open-loop configuration, closed loop feedback reduces the gain of the circuit. The overall gain and response of the circuit is determined by the feedback network rather than the operational amplifier characteristics. The response of the operational amplifier circuit is characterized by the transfer function.



8 Application and Implementation

NOTE

Information in the following applications sections is not part of the TI component specification, and TI does not warrant its accuracy or completeness. TI's customers are responsible for determining suitability of components for their purposes. Customers should validate and test their design implementation to confirm system functionality.

8.1 Application Information

The LM741 is a general-purpose amplifier that can be used in a variety of applications and configurations. One common configuration is in a noninverting amplifier configuration. In this configuration, the output signal is in phase with the input (not inverted as in the inverting amplifier configuration), the input impedance of the amplifier is high, and the output impedance is low. The characteristics of the input and output impedance is beneficial for applications that require isolation between the input and output. No significant loading will occur from the previous stage before the amplifier. The gain of the system is set accordingly so the output signal is a factor larger than the input signal.

8.2 Typical Application

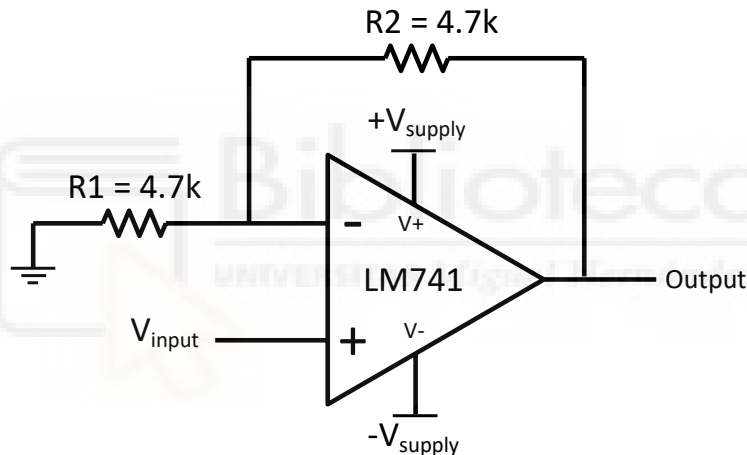


Figure 1. LM741 Noninverting Amplifier Circuit

8.2.1 Design Requirements

As shown in [Figure 1](#), the signal is applied to the noninverting input of the LM741. The gain of the system is determined by the feedback resistor and input resistor connected to the inverting input. The gain can be calculated by [Equation 1](#):

$$\text{Gain} = 1 + (R2/R1) \quad (1)$$

The gain is set to 2 for this application. R1 and R2 are 4.7-k resistors with 5% tolerance.

8.2.2 Detailed Design Procedure

The LM741 can be operated in either single supply or dual supply. This application is configured for dual supply with the supply rails at ± 15 V. The input signal is connected to a function generator. A 1-V_{pp}, 10-kHz sine wave was used as the signal input. 5% tolerance resistors were used, but if the application requires an accurate gain response, use 1% tolerance resistors.

Typical Application (continued)

8.2.3 Application Curve

The waveforms in [Figure 2](#) show the input and output signals of the LM741 non-inverting amplifier circuit. The blue waveform (top) shows the input signal, while the red waveform (bottom) shows the output signal. The input signal is 1.06 V_{pp} and the output signal is 1.94 V_{pp}. With the 4.7-k Ω resistors, the theoretical gain of the system is 2. Due to the 5% tolerance, the gain of the system including the tolerance is 1.992. The gain of the system when measured from the mean amplitude values on the oscilloscope was 1.83.

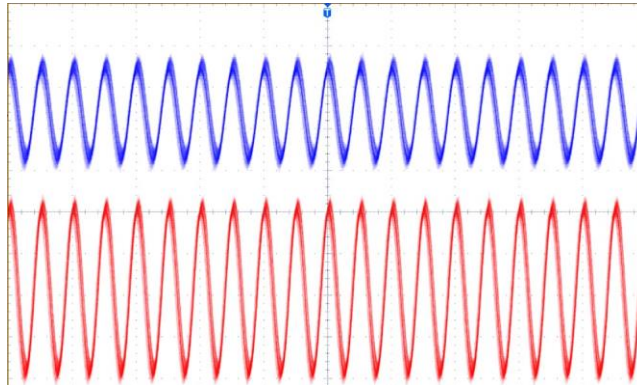


Figure 2. Waveforms for LM741 Noninverting Amplifier Circuit

9 Power Supply Recommendations

For proper operation, the power supplies must be properly decoupled. For decoupling the supply lines, a 0.1- μ F capacitor is recommended and should be placed as close as possible to the LM741 power supply pins.

10 Layout

10.1 Layout Guidelines

As with most amplifiers, take care with lead dress, component placement, and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to an input should be placed with the body close to the input to minimize pick-up and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to ground. As shown in Figure 3, the feedback resistors and the decoupling capacitors are located close to the device to ensure maximum stability and noise performance of the system.

10.2 Layout Example

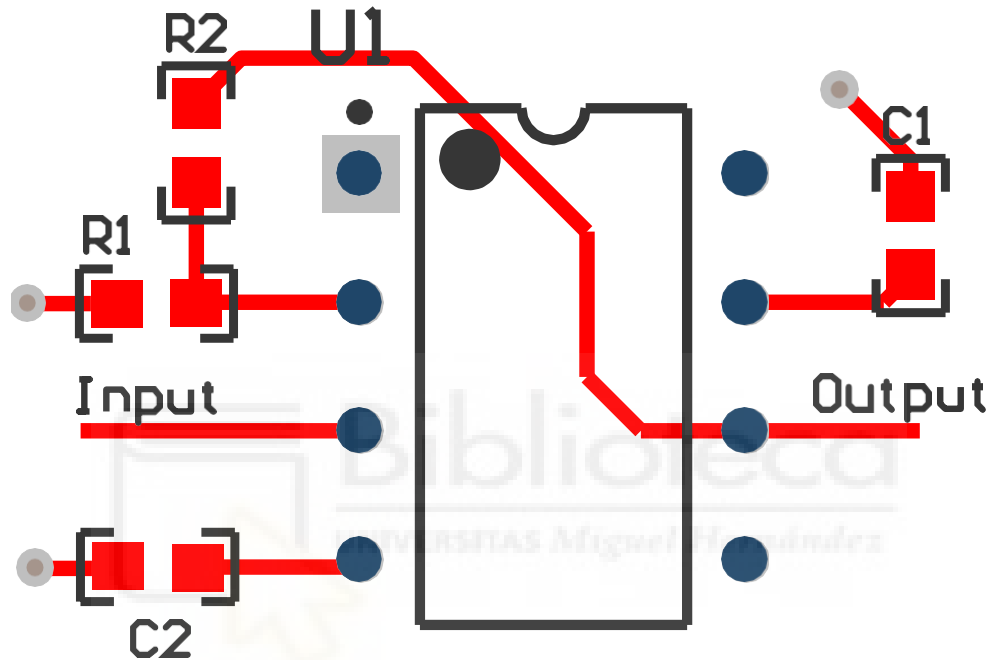


Figure 3. LM741 Layout

11 Device and Documentation Support

11.1 Community Resources

The following links connect to TI community resources. Linked contents are provided "AS IS" by the respective contributors. They do not constitute TI specifications and do not necessarily reflect TI's views; see TI's [Terms of Use](#).

TI E2E™ Online Community *TI's Engineer-to-Engineer (E2E) Community*. Created to foster collaboration among engineers. At e2e.ti.com, you can ask questions, share knowledge, explore ideas and help solve problems with fellow engineers.

Design Support *TI's Design Support* Quickly find helpful E2E forums along with design support tools and contact information for technical support.

11.2 Trademarks

E2E is a trademark of Texas Instruments.

All other trademarks are the property of their respective owners.

11.3 Electrostatic Discharge Caution



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

11.4 Glossary

[SLYZ022](#) — *TI Glossary*.

This glossary lists and explains terms, acronyms, and definitions.

12 Mechanical, Packaging, and Orderable Information

The following pages include mechanical, packaging, and orderable information. This information is the most current data available for the designated devices. This data is subject to change without notice and revision of this document. For browser-based versions of this data sheet, refer to the left-hand navigation.

PACKAGING INFORMATION

Orderable part number	Status (1)	Material type (2)	Package Pins	Package qty Carrier	RoHS (3)	Lead finish/ Ball material (4)	MSL rating/ Peak reflow (5)	Op temp (°C)	Part marking (6)
LM741C-MWC	Active	Production	WAFERSALE (YS) 0	1 null	Yes	Call TI	Level-1-NA-UNLIM	-40 to 85	
LM741CN/NOPB	Active	Production	PDIP (P) 8	40 TUBE	Yes	NIPDAU	Level-1-NA-UNLIM	0 to 70	LM 741CN

⁽¹⁾ **Status:** For more details on status, see our [product life cycle](#).

⁽²⁾ **Material type:** When designated, preproduction parts are prototypes/experimental devices, and are not yet approved or released for full production. Testing and final process, including without limitation quality assurance, reliability performance testing, and/or process qualification, may not yet be complete, and this item is subject to further changes or possible discontinuation. If available for ordering, purchases will be subject to an additional waiver at checkout, and are intended for early internal evaluation purposes only. These items are sold without warranties of any kind.

⁽³⁾ **RoHS values:** Yes, No, RoHS Exempt. See the [TI RoHS Statement](#) for additional information and value definition.

⁽⁴⁾ **Lead finish/Ball material:** Parts may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

⁽⁵⁾ **MSL rating/Peak reflow:** The moisture sensitivity level ratings and peak solder (reflow) temperatures. In the event that a part has multiple moisture sensitivity ratings, only the lowest level per JEDEC standards is shown. Refer to the shipping label for the actual reflow temperature that will be used to mount the part to the printed circuit board.

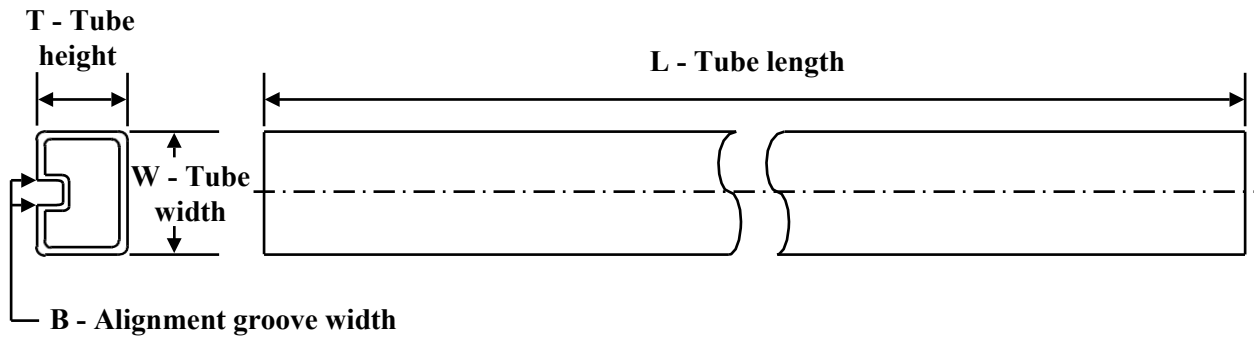
⁽⁶⁾ **Part marking:** There may be an additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category of the part.

Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TUBE



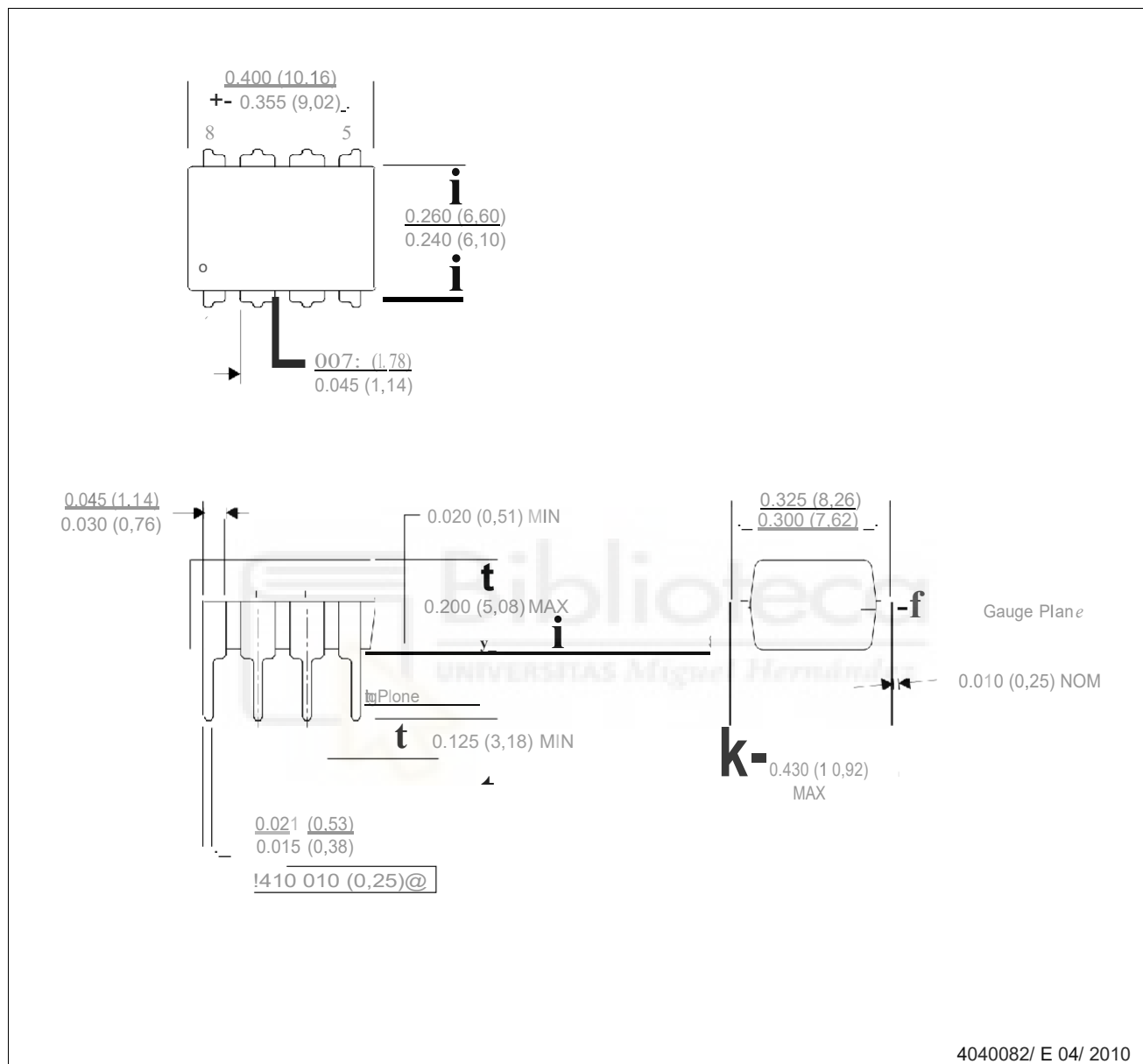
*All dimensions are nominal

Device	Package Name	Package Type	Pins	SPQ	L (mm)	W (mm)	T (μm)	B (mm)
LM741CN/NOPB	P	PDIP	8	40	502	14	11938	4.32



P (R-PDIP-T8)

PLAS TIC DUAL-IN-LINE PACKAGE



4040082/ E 04/ 2010

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Falls within JEDEC MS-001 variation BA.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

